



Accumulo di energia: scelta della strategia e modellazione

Candidato: Marco Zanin

Relatore: Prof. Andrea Lazzaretto

Correlatore: Ing. Sergio Rech

Laurea in Ingegneria Energetica
Dipartimento di Ingegneria Industriale
A.A. 2018/2019

Indice

SOMMARIO	1
ABSTRACT	3
INTRODUZIONE	5
1 SISTEMI DI ACCUMULO DI ENERGIA	7
1.1 Sistemi di accumulo di energia meccanica	8
1.1.1 CAES (Compressed Air Energy Storage)	8
1.1.2 PHS (Pumped Hydro Storage)	9
1.1.3 Volani	10
1.1.4 LAES (Liquid Air Energy Storage)	11
1.1.5 PTES (Pumped Thermal Energy Storage System) . .	12
1.2 Sistemi di accumulo di energia chimica	13
1.2.1 Accumulo di idrogeno	13
1.2.2 Power to Gas	14
1.2.3 Cella a combustibile	15
1.3 Sistemi di accumulo di energia elettrochimica	16
1.4 Sistemi di accumulo di energia elettrica	19
1.4.1 SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage) . .	19
1.4.2 Supercondensatori	20
1.5 Sistemi di accumulo di energia termica	21
1.5.1 Sistema di accumulo a calore sensibile (SHTES)	21
1.5.2 Sistema di accumulo a calore latente (LHTES)	22
1.5.3 Accumulo di energia termochimica	22
1.6 Conclusioni	23
2 PARAMETRI DI PRESTAZIONE: ANALISI E CONFRONTO	25
2.1 Indici di prestazione	25
2.2 Confronto tra i sistemi tramite diversi indici	28
2.2.1 Potenza in funzione del campo di applicazione	28
2.2.2 Efficienza energetica per ciclo	29
2.2.3 Costi di investimento	29

2.2.4	Costi di investimento per ciclo di carica e scarica . . .	30
2.2.5	Densità di energia	32
2.3	Conclusioni	33
3	CONFIGURAZIONE FONTI-ACCUMULI-UTILIZZI	35
3.1	Nuovo approccio per la definizione della configurazione generale fonti-accumuli-utilizzi	35
3.2	Scelta del percorso migliore	37
3.2.1	Fonti primarie di energia	39
3.2.2	Sistema di conversione dell'energia	39
3.2.3	Sistema di accumulo di energia	40
3.3	Analisi della configurazione fonti-accumuli-utilizzi	41
3.3.1	Vincoli dei sistemi	41
3.3.2	Rendimento dei sistemi	45
3.3.3	Costi dei sistemi	46
3.4	Conclusioni	48
4	ESEMPI APPLICATIVI DI UN DETERMINATO PROBLEMA ENERGETICO	49
4.1	Utilizzo dell'energia solare per la produzione di energia elettrica	49
4.1.1	Configurazioni possibili	50
4.1.2	Modelli delle configurazioni	58
4.1.3	Risultati	64
4.2	Utilizzo della biomassa per la produzione di energia elettrica	68
4.2.1	Configurazioni possibili	68
4.2.2	Modelli delle configurazioni	69
4.2.3	Risultati	69
4.3	Confronto tra le applicazioni esaminate	69
4.4	Conclusioni	70
	CONCLUSIONI	73
	Bibliografia	75

Sommario

L'esigenza di contenere le problematiche legate all'approvvigionamento e all'impatto ambientale nel settore energetico sta spingendo sempre più verso l'utilizzo intensivo di fonti rinnovabili. Tuttavia, la disponibilità della maggior parte di esse è fortemente variabile nel tempo e solitamente non è contemporanea alle richieste delle utenze. Si rende quindi sempre più necessario l'utilizzo di sistemi di accumulo di energia.

Questa tesi è focalizzata quindi sulle diverse strategie per l'accumulo di energia che permettono di disaccoppiare in termini temporali la disponibilità delle fonti dalla richiesta delle utenze. Questo disaccoppiamento comporta delle perdite, non solo dovute all'accumulo di energia in sé, ma anche alla necessità di convertire le fonti di energia in altre forme, anche intermedie, al fine di poterle accumulare. L'obiettivo è di individuare la migliore configurazione di sistema energetico che include sistemi di accumulo per rendere disponibili le fonti di energia primaria nella forma e nei tempi richieste dalle utenze.

Nella prima parte della tesi sono descritte le applicazioni dei sistemi di accumulo e lo stato dell'arte delle principali tecnologie, attraverso l'analisi e la rielaborazione degli indici di prestazione più utilizzati in letteratura, per classificare i sistemi di accumulo in relazione alle loro applicazioni. Nella seconda parte viene definita la configurazione fonti-accumuli-utilizzi come struttura in grado di collegare le diverse fonti di energia primaria alle forme di energia richieste dalle utenze, tramite l'utilizzo di sistemi di accumulo. Tale diagramma viene descritto nelle sue principali componenti e nel suo utilizzo per determinare le possibili soluzioni in grado di soddisfare una determinata problematica energetica. Nell'ultima parte questo approccio è applicato ad alcuni esempi di richiesta energetica a partire da una determinata fonte di energia e sono mostrate le principali soluzioni tecnologiche ricavabili dal diagramma. Le soluzioni sono analizzate dal punto di vista del rendimento, dei costi e dei vincoli applicativi. I risultati ottenuti mostrano come, a seconda delle condizioni operative, la soluzione che produce efficienza migliore, costi più bassi o minori vincoli operativi non sia sempre la stessa.

Abstract

The need to contain the problems related to supply and environmental impact in the energy sector is pushing more and more towards the intensive use of renewable sources. However, the availability of most of them is highly variable over time and is usually not contemporary to user requests. The use of energy storage systems therefore becomes increasingly necessary. This thesis is therefore focused on the different strategies for the accumulation of energy that make it possible to split the availability of sources from the users' demand in temporal terms. This decoupling leads to losses, not only because of the accumulation of energy in itself, but also to the need to convert the sources of energy into other forms, even intermediate ones, to accumulate them. The goal is to identify the best configuration of the energy system that includes storage systems to make primary energy sources available in the form and time required by users.

The first part of the thesis describes the applications of storage systems and the state of the art of the main technologies, through the analysis and the re-elaboration of the most used performance indices in the literature, to classify the storage systems in relation to their applications. . The second part defines the configuration of use-accumulation of sources as a structure able to connect the different primary energy sources to the forms of energy required by users, through the use of storage systems. This diagram is described in its main components and in its use to determine the possible solutions able to satisfy a given energy problem. In the last part this approach is applied to some examples of energy demand starting from a given energy source and the main technological solutions shown in the diagram are shown. Solutions are analyzed from the point of view of performance, costs and application constraints. The results obtained show that, depending on the operating conditions, the solution that produces better efficiency, lower costs or lower operational constraints is not always the same.

Introduzione

Nel secolo scorso la rete elettrica era in gran parte alimentata dalla combustione di combustibili fossili. I sistemi basati su questa tipologia di combustibile permettono di rendere disponibile l'energia direttamente nella forma nell'esatto istante in cui essa viene richiesta dalle utenze. Le preoccupazioni per l'inquinamento atmosferico, le importazioni di energia e il riscaldamento globale hanno garantito la crescita delle energie rinnovabili. Dato il loro carattere intermittente è necessario valutare un sistema per rendere disponibile tale energia in qualsiasi momento in cui sia necessario.

In questa tesi vengono analizzati i principali sistemi di accumulo e i loro parametri di prestazione allo scopo di costruire un diagramma esplicativo delle principali soluzioni tecnologiche a disposizione che comprenda le principali soluzioni di accumulo termico per rendere disponibile una determinata forma di energia, a partire da una fonte primaria, in qualunque momento venga richiesta, al fine di poterle poi confrontare con la finalità di scegliere la soluzione migliore.

Molti letteratura si concentrano sui sistemi di accumulo di energia, tuttavia la quai totalità di essi è basata sul solo componente "accumulo" e non considera il sistema energetico nella sua complessità.

Mukrimin Sevket Guneya at al.[1] presenta le principali soluzioni ingegneristiche per l'accumulo di energia analizzando principalmente le caratteristiche impiantistiche, i parametri prestazionali e i principali sviluppi tecnologici futuri allo scopo di avere una panoramica generale di tutti i sistemi a disposizione, senza però valutarli all'interno di una determinata richiesta energetica.

Del Pero at al.[2] definisce i principali indici di prestazione dei sistemi di accumulo, identificati per semplificare la comparazione tra i sistemi nella fase decisionale, progettuale e operativa della scelta di una determinata soluzione tecnologica.

Dimopoulos at al.[3] analizza il problema di ottimizzazione di un sistema energetico dovuto alla presenza di molteplici vincoli operativi e possibilità di design, attraverso l'uso di diversi algoritmi, determinando quello più efficiente.

Bouvy at al.[4] dimostra come un fattore cruciale per lo sviluppo di una

nuova area urbana sia la soddisfazione della richiesta energetica ad alta efficienza sulla base di sistemi energetici integrati. Tale fattore risulta però complesso da gestire, visto l'enorme numero di variabili in gioco e dei calcoli matematici necessari.

Lanyu et al.[5] mostra come i vari sistemi di accumulo siano soggetti a diversi vincoli, operativi e non, che ne limitano l'utilizzo in determinate soluzioni e la scelta della migliore soluzione di accumulo deve tener conto di questi vincoli.

Tra i pochissimi contributi in cui i sistemi di accumulo sono analizzati come parte di un sistema energetico, risultano essere molto interessanti [6] e [7].

Philip Voll et al.[6] presenta un framework per la generazione e l'ottimizzazione di un sistema automatizzato per la sintesi ottimale dei sistemi di distribuzione di energia distribuita a livello di progettazione concettuale. In questa analisi viene tenuto conto delle possibili variazioni dei carichi di energia richiesti dalle utenze nel tempo e della variazione delle prestazioni dei sistemi di conversione al variare del carico. Per rispondere a queste variazioni vengono utilizzate delle unità rindondanti multiple. Viene però a mancare l'implementazione dei sistemi di accumulo per la gestione dell'energia quando non viene richiesta o prodotta in eccesso.

Philip Voll et al.[7] riprende la problematica di generare una struttura automatizzata per la scelta della migliore soluzione tecnologica di conversione dell'energia per sistemi di distribuzione di energia. In questo caso viene definito un operatore di sostituzione in grado di sostituire, all'interno di determinate soluzioni che producano lo stesso effetto a partire dagli stessi input, una determinata soluzione con una alternativa, ma conveniente da un determinato punto di vista operativo. Neanche in questo elaborato vengono presi in considerazione i sistemi di accumulo energetico.

In questa tesi vengono riprese le principali soluzioni tecnologiche per l'accumulo di energia e inserite all'interno della configurazione fonti-accumuli-utilizzi, con la finalità di dare una struttura delle principali soluzioni tecnologiche per passare da una determinata fonte di energia primaria a disposizione ad una specifica richiesta energetica da parte di un'ipotetica utenza, tramite l'utilizzo di sistemi di accumulo, in modo da disaccoppiare il momento della produzione da quello dell'utilizzo. Una volta definito e presentata la configurazione generale vengono analizzate alcune soluzioni in grado di rispondere a una ipotetica problematica energetica, dal punto di vista del rendimento, dei costi e dei vincoli operativi. Questa analisi permette di determinare, tra le possibili soluzioni, quella più efficiente dal punto di vista di un determinato parametro e dimostrare che, al variare di questo, cambia anche la soluzione migliore.

Capitolo 1

SISTEMI DI ACCUMULO DI ENERGIA

Le varie tecnologie di accumulo dell'energia possono essere utilizzate in varie applicazioni: ciascuna di esse può essere opportunamente selezionata per applicazioni specifiche in base alle caratteristiche che possiede. Esistono molti metodi adatti per classificare le diverse tecnologie di accumulo, come ad esempio in termini di tempi di risposta, dimensione dell'accumulo e durata di conservazione. Uno degli approcci più comunemente usati è basato sulla forma fisica di energia che il sistema è in grado di memorizzare. Questa classificazione si riferisce a: energia meccanica, elettrochimica, elettrica, chimica e termica.

Per stoccaggio di energia si intende la cattura di energia prodotta in un certo istante per l'uso in un momento successivo. Un dispositivo che immagazzina energia è chiamato accumulatore o batteria. L'energia da immagazzinare può essere fornita in molteplici forme tra cui radiazione, chimica, potenziale gravitazionale, potenziale elettrico, elettricità, temperatura elevata, calore latente e cinetica. Lo stoccaggio di energia comporta la conversione dell'energia da forme difficili da immagazzinare in forme più facilmente conservabili dal punto di vista tecnico o economico. Alcune tecnologie forniscono un accumulo di energia a breve termine, mentre altre possono garantire conservazione a lungo termine.

Nel ventesimo secolo la rete elettrica era in gran parte alimentata dalla combustione di combustibili fossili. Quando era richiesta meno energia veniva bruciato meno carburante e viceversa nei momenti di alta richiesta. Le preoccupazioni per l'inquinamento atmosferico, le importazioni di energia e il riscaldamento globale hanno garantito la crescita delle energie rinnovabili come l'energia solare ed eolica per fare un esempio. L'energia eolica è intermittente e potrebbe generare in un momento in cui non è necessaria alcuna potenza aggiuntiva così come l'energia solare varia a seconda della copertura

nuvolosa e nella migliore delle ipotesi è disponibile solo durante le ore diurne, mentre la domanda spesso raggiunge il picco dopo il tramonto. L'interesse per l'accumulo di energia da queste fonti intermittenti quali sono le fonti rinnovabili è aumentato man mano che l'industria delle energie rinnovabili ha raggiunto una generazione pari a una frazione importante del consumo complessivo di energia.

L'idea di accumulare energia in un primo momento per poi essere utilizzata in un successivo nasce dalla necessità di soddisfare la richiesta energetica di una certa utenza anche nei momenti in cui i sistemi a disposizione non riescano a farlo anche lavorando alla massima potenza. Un secondo fattore a vantaggio dei sistemi di accumulo, strettamente legato a quello precedente, deriva dal fatto di sfruttare la produzione di energia nell'arco di tempo in cui questa sia conveniente economicamente: la produco all'istante economicamente vantaggioso e in cui la richiesta me lo permette, la accumulo e la utilizzo nel momento in cui ne ho bisogno.

Il principio base di funzionamento dei sistemi di accumulo consiste nell'accumulare energia tramite l'innalzamento di un determinato parametro a seconda del tipo di storage, quali possono essere la temperatura, l'energia potenziale, l'energia chimica, ecc., per poi, tramite processo inverso, scaricare quando precedentemente accumulato e trasformare tale potenziale in energia utilizzabile.

1.1 Sistemi di accumulo di energia meccanica

Tra i sistemi di accumulo di energia che tengono conto della forma di energia intermedia in cui è immagazzinata l'elettricità abbiamo il sistema di accumulo di energia meccanica, in cui l'elettricità viene immagazzinata come energia cinetica o potenziale (gravitazionale o elastica) utilizzando processi meccanici come pompaggio, compressione, espansione, accelerazione e decelerazione.

1.1.1 CAES (Compressed Air Energy Storage)

Il sistema CAES (Compressed Air Energy Storage) è un tipo di tecnologia di accumulo commercializzata in grado di fornire potenza per oltre 100 MW con una singola unità. Durante i periodi di carica l'elettricità aziona un'unità motore/generatore che alimenta una catena di compressor per l'iniezione di aria in un contenitore di stoccaggio, costituito da una caverna sotterranea o serbatoi fuori terra. L'energia viene immagazzinata sotto forma di aria ad alta pressione. Durante la fase di scarica l'aria compressa immagazzinata

viene rilasciata e riscaldata da una fonte di calore che può provenire dalla combustione di combustibile fossile o dal calore recuperato dal processo di compressione. L'energia dell'aria compressa nell'ultimo stadio di espansione alimenta delle turbine. Il calore residuo proveniente dallo scarico può essere riciclato da un recuperatore di calore.

Il sistema CAES può essere costruito per avere grandi capacità di potenza. La tecnologia CAES può fornire una discreta velocità di risposta e buone prestazioni a carico parziale[22]. Gli usi pratici di impianti CAES su larga scala comprendono applicazioni di griglia per lo spostamento del carico, la rasatura dei picchi e il controllo della frequenza e della tensione. Il principale ostacolo all'implementazione di impianti CAES su larga scala è la ricerca di siti geografici appropriati che determinano il costo di investimento principale dell'impianto.

Attualmente è in via di sviluppo l'Adiabatic Advanced CAES (AA-CAES). La tecnologia AA-CAES è normalmente integrata con un sottosistema di accumulo di energia termica, che non comporta combustione del carburante nella fase di espansione in modo da recuperare il calore prodotto e ridurre i costi di funzionamento.

1.1.2 PHS (Pumped Hydro Storage)

L'accumulo di energia idroelettrica (Pumped Hydroelec Storage, PHS) è una tecnologia di accumulo di energia meccanica con una lunga storia, massima maturità tecnica e grande capacità energetica. Durante la fase di carica l'acqua viene pompata dal serbatoio a livello inferiore verso il serbatoio a livello superiore; durante i periodi di scarico, l'acqua viene rilasciata verso il serbatoio di partenza. Nel processo di scarico l'acqua che cade verso il basso alimenta turbine che a loro volta azionano generatori elettrici per la produzione di energia elettrica. La quantità di energia immagazzinata dipende dalla differenza di altezza tra i due serbatoi e il volume totale di acqua immagazzinata. La potenza nominale degli impianti PHS dipende dalla pressione e dalla portata dell'acqua attraverso le turbine e la potenza nominale della pompa/turbina e del gruppo generatore/motore. Gli impianti PHS hanno potenze che vanno da 1 MW a 3000 MW, con un'efficienza del ciclo di circa il 70-85% e una durata superiore a 40 anni[18][22]. Lo svantaggio di questa tecnologia riguarda la limitazione della selezione dei siti, per la quale gli impianti PHS subiscono lunghi tempi di costruzione e alti investimenti iniziali. Recentemente questo campo è stato influenzato da alcuni sviluppi: sono stati progettati impianti PHS che utilizzano pozzi di miniera allagati, grotte sotterranee e oceani come serbatoi o sono già in funzione. Il PHS può essere accoppiato con la produzione di energia eolica o solare, e questo potrebbe migliorare l'adozione di energia rinnovabile in reti isolate o distribuite. La tendenza allo sviluppo di ricerca e sviluppo di PHS

riguarda l'implementazione di impianti idroelettrici con maggiore velocità e maggiore capacità rispetto alle attuali applicazioni.

1.1.3 Volani

Un sistema di accumulo tramite volano (Flywheel Energy Storage, FES) è composto da cinque componenti primari: un volano, un gruppo di cuscinetti, un motore/generatore elettrico reversibile, un'unità elettronica di potenza e una camera a vuoto. Questi dispositivi utilizzano l'elettricità per accelerare o decelerare il volano e l'energia immagazzinata viene trasferita al o dal volano attraverso un motore/generatore integrato. Per ridurre la perdita di energia dovuta alla resistenza dell'aria, il sistema del volano deve essere collocato in un ambiente sottovuoto. La quantità di energia immagazzinata dipende dalla velocità di rotazione del volano e dalla sua inerzia. L'equazione per l'energia cinetica immagazzinata è:

$$E = J\omega^2 \quad (1.1)$$

dove ω è la velocità angolare del rotore e J rappresenta il momento di inerzia che è definito come

$$J = \frac{1}{4}kmr^2 \quad (1.2)$$

dove m è massa del rotore (kg), r è raggio del rotore (m) e k è una costante inerziale dipendente dalla forma del rotore.

I sistemi di volani possono essere classificati in due categorie:

- FES a bassa velocità: utilizza l'acciaio come materiale del volano e ruota al di sotto di 6×10^3 giri al minuto. Sistemi a volano a bassa velocità sono generalmente utilizzati per applicazioni a breve e medio/alto consumo. L'energia specifica dei volani a bassa velocità è circa 5 Wh/kg;

- FES ad alta velocità: utilizza materiali compositi avanzati per il volano, come la fibra di carbonio, che può arrivare a circa 10^5 giri al minuto. I sistemi FES ad alta velocità utilizzano cuscinetti magnetici senza contatto per mitigare l'usura dei cuscinetti, migliorando in tal modo l'efficienza. Le aree applicative di FES ad alta velocità sono in continua espansione, principalmente in termini di qualità dell'energia e servizio di guida in trazione nell'industria aerospaziale. Il rotore ad alta velocità può raggiungere un'energia specifica fino a 100 Wh/kg. Il FES ad alta velocità è generalmente molto più costoso del volano tradizionale in metallo.

Le caratteristiche vantaggiose di FES sono l'efficienza del ciclo elevata (fino al 95% alla potenza nominale), densità di potenza relativamente elevata,

assenza di effetti di profondità di scarica e facilità di manutenzione[22]. Attualmente, la ricerca e lo sviluppo delle applicazioni del volano si sposta verso il materiale del volano per aumentare le capacità di rotazione e densità di potenza, le macchine elettriche ad alta velocità, l'elevata capacità di carico dei cuscinetti e la tecnologia del sistema di volano. Un altro interessante sviluppo della tecnologia FES è rappresentato dai cuscinetti High Temperature Superconductor (HTS), un'opzione promettente per migliorare le prestazioni dei cuscinetti.

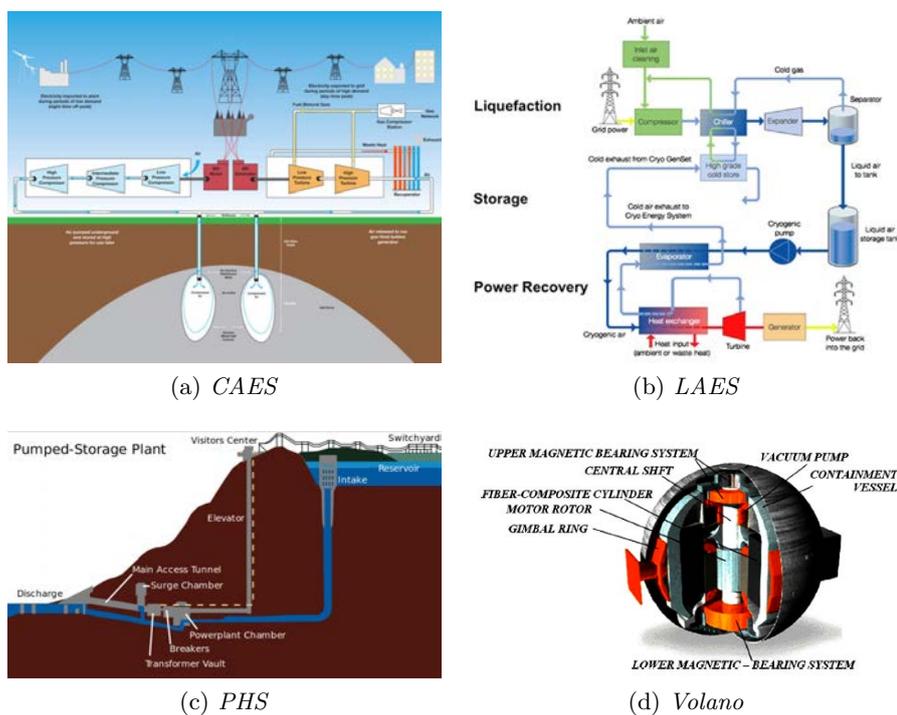


Figura 1.1: Esempi dei principali sistemi di accumulo di energia meccanica. Immagini tratte da [1], [14] e [20].

1.1.4 LAES (Liquid Air Energy Storage)

Lo stoccaggio di energia ad aria liquida (Liquid Air Energy Storage, LAES), come suggerisce il nome, comporta lo stoccaggio di energia elettrica sotto forma di aria liquefatta. La prima fase del processo è simile alla fase di compressione del CAES. L'aria compressa viene quindi liquefatta e conservata in un serbatoio ad una pressione vicina alla pressione atmosferica. Durante la fase di generazione di energia (fase di scarico), l'aria liquida viene vaporizzata usando calore di scarto seguito dall'espansione con generazione di

elettricità. Il potenziale freddo dell'aria liquida può essere utilizzato per fornire raffreddamento diretto, refrigerazione e aria condizionata prima di essere vaporizzata.

Uno dei principali vantaggi di questo processo è che l'aria liquida occupa 1/700 del volume occupato dall'aria gassosa che si traduce nello stoccaggio di una grande quantità di aria in un minor volume. Anche il valore di densità energetica risulta elevato. Tuttavia, ha un'efficienza relativamente bassa (40-60%)[18].

Poiché questa tecnologia non è ancora completamente sviluppata, c'è ancora spazio per il miglioramento dell'efficienza, in particolare migliorando il processo di liquefazione e utilizzando il calore di compressione durante la fase di generazione di energia, possibilmente derivante da scarti di altri processi fisici per ridurre i costi.

1.1.5 PTES (Pumped Thermal Energy Storage System)

Il Pumped thermal energy storage (PTES) è una tecnologia in fase di sviluppo che mira a immagazzinare energia elettrica sotto forma di energia termica, utilizzando una pompa di calore reversibile. Un sistema PTES è composto da due serbatoi di stoccaggio riempiti con materiale solido e una macchina termica in grado di eseguire sia la funzione di pompa di calore che la funzione di motore termico. Quando è in carica, l'elettricità alimenta la pompa di calore che produce un gas caldo ad alta pressione che viene iniettato in un serbatoio mentre nell'altro serbatoio viene iniettato gas freddo. Nel ciclo di scarica, agendo come motore termico, la macchina termica utilizza la differenza di temperatura tra i due serbatoi di stoccaggio per generare il lavoro e azionare un generatore elettrico. Il serbatoio di stoccaggio a bassa temperatura viene mantenuto a pressione ambiente e il serbatoio di stoccaggio ad alta temperatura ad una pressione più elevata. I livelli di alta e bassa temperatura e il rapporto di pressione tra i due serbatoi di stoccaggio dipendono dal materiale solido e dalle caratteristiche del fluido di lavoro. Un sistema PTES, che utilizza l'Argon come fluido di lavoro e ghiaia come materiale solido per lo stoccaggio, opera con temperature pari a 500 °C e 160 °C e un rapporto di pressione pari a 12.

Alcuni vantaggi del PTES sono una maggiore densità di energia (35-50 kWh/m³)[26] rispetto al convenzionale PHS e ai convenzionali CAES, oltre alla flessibilità di implementazione, poiché le installazioni non richiedono alcun sito particolare. Anche se PTES condivide questi vantaggi con LAES, l'efficienza dello stesso non dipende dal recupero di calore residuo, basandosi unicamente sull'efficienza dell'isolamento termico e sulle prestazioni operative della pompa di calore reversibile. PTES presenta un'elevata efficienza (70-80%)[26], una potenza nominale da centinaia di kW a pochi MW con capacità di stoccaggio di diverse ore.

Sono state condotte ricerche sulle prestazioni dei materiali per migliorare la durata del ciclo di materiale solido e avere temperature operative più elevate per ottenere densità energetiche maggiori. Il PTES è anche innocuo per l'ambiente poiché il fluido di lavoro è solitamente un gas inerte e il materiale di stoccaggio solido è in genere un minerale comune.

1.2 Sistemi di accumulo di energia chimica

L'energia chimica viene immagazzinata nei legami chimici degli atomi e delle molecole e viene rilasciata attraverso una reazione chimica. Dopo il rilascio di energia chimica, la sostanza viene spesso modificata in una sostanza completamente diversa. I combustibili chimici sono la forma dominante di accumulo di energia nella generazione di elettricità e nel trasporto di energia. I combustibili chimici più comunemente usati che vengono trasformati sono carbone, benzina, diesel, gas naturale, gas di petrolio liquefatto (GPL), propano, butano, etanolo, biodiesel e idrogeno. Lo stoccaggio di energia chimica è piuttosto adatto per impieghi di grandi quantità di energia e per tempi più lunghi.

In sintesi, nello stoccaggio di energia chimica, l'energia viene immagazzinata dopo una reazione di dissociazione e quindi recuperata in una reazione chimicamente inversa.

1.2.1 Accumulo di idrogeno

L'idrogeno può essere prodotto riformando il gas naturale con il vapore o con l'elettrolisi dell'acqua in ossigeno e idrogeno. Attualmente il sistema di reforming del gas il sistema più comunemente utilizzato, mentre l'elettrolisi dell'acqua è più conveniente dal punto di vista di una prospettiva ambientale. Ciò è dovuto al fatto che l'elettrolisi dell'acqua può essere effettuata direttamente da energia rinnovabile: l'efficienza sarà inferiore ma lo stesso varrà per la produzione di agenti inquinanti. Utilizzando l'energia elettrica l'elettrolisi scinde l'acqua nei suoi componenti base, idrogeno e ossigeno. Tecnicamente, due elettrodi sono collegati a una sorgente di corrente continua e una volta applicata una sufficiente tensione si innesca una reazione redox. La reazione redox produce ossigeno all'anodo (elettrodo positivo) e idrogeno al catodo (elettrodo negativo). Per separare i compartimenti di reazione e far sì che i due prodotti non vengano a contatto viene utilizzata una membrana polimerica conduttrice di protoni. La membrana è chiamata membrana a scambio di protoni (PEM) e oltre a separare i compartimenti fornisce anche il contatto ionico tra gli elettrodi, che è essenziale per il processo elettrochimico. Dopo la conservazione, l'idrogeno può essere riconvertito in calore o elettricità tramite un motore a combustione interna o tramite una cella a

combustibile.

Si tratta di una tecnologia che permette di memorizzare energia a lungo termine e in grandi quantità in piccoli contenitori previa la compressione dell'idrogeno prodotto. D'altro canto richiede alcuni componenti costosi per la realizzazione e l'efficienza complessiva risulta inferiore a molte altre soluzioni tecnologiche.

Negli ultimi anni i sistemi di accumulo di energia basati sull'idrogeno ricevono sempre maggiore attenzione per la possibilità tecnologica di integrare nel processo fonti di energia rinnovabile.

1.2.2 Power to Gas

Le tecnologie PtG (P2G, Power-to-Gas) si basano sull'utilizzo di due principali gas, idrogeno e metano. Questa tecnologia può essere suddivisa in tre processi principali: il primo consiste in una prima conversione che produce idrogeno dall'elettricità, il quale può essere seguito da un'altra conversione che produce metano da idrogeno e anidride carbonica; il secondo è il necessario immagazzinamento del vettore di energia, mentre il terzo consiste nel processo di utilizzo che può comportare diversi usi. L'elettricità viene convertita in idrogeno utilizzando il processo di elettrolisi. Attualmente l'efficienza media di conversione di un elettrolizzatore si aggira attorno al 45-70%. Vi sono però elettrolizzatori ancora in ricerca e sviluppo con la possibilità di raggiungere livelli di efficienza più promettente (fino al 98%). Dopo l'elettrolisi, l'idrogeno può essere immagazzinato come gas compresso nelle caverne sotterranee o serbatoi pressurizzati non sotterranei. L'efficienza di archiviazione è quasi del 100% per tutte queste tecnologie mentre la densità di energia varia a seconda del tipo di accumulatore. Considerando l'utilizzo, l'idrogeno può essere iniettato direttamente nella rete di gas naturale in concentrazioni fino al 4-5%. Questa soluzione evita anche le esigenze di stoccaggio, dal momento che l'idrogeno verrà miscelato e beneficerà di tutte le strutture per il trasporto e lo stoccaggio. L'idrogeno viene solitamente convertito in elettricità in celle a combustibile che può essere molto efficiente (fino al 70%), mentre l'utilizzo di motori o turbine a gas comporta un'efficienza minore (circa il 40%)[25].

Per un'applicazione Power to Power (PtP) che include un dispositivo di elettrolisi, un dispositivo di memorizzazione e un motore a gas/turbina, l'efficienza complessiva è bassa (30-50%). Un altro svantaggio di questa tecnologia è che l'intero sistema può risultare molto costoso. Tuttavia risulta una tecnologia molto promettente in quanto è in grado di eseguire un accumulo di energia a lungo termine, dato che le possibili soluzioni di archiviazione hanno un tasso di autodistruzione molto basso e possono raggiungere dimensioni di capacità di archiviazione molto grandi.

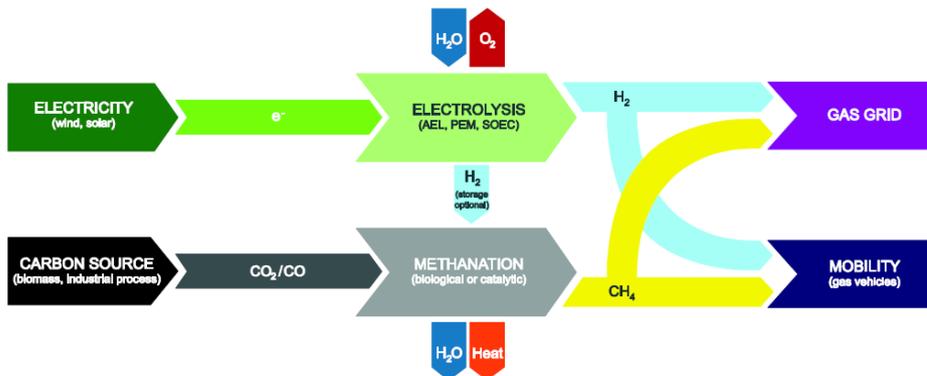


Figura 1.2: Esempi dei principali sistemi di accumulo di energia chimica. Immagine tratta da [25].

Il metano, un altro vettore energetico PtG, richiede un ulteriore processo di conversione, chiamato metanazione, e un approvvigionamento di CO_2 . Il metano è da tre a quattro volte più denso di energia rispetto all'idrogeno, tuttavia queste modifiche rendono la tecnologia più complessa, costosa e meno efficiente in PtP (25-35%). L'interesse in questo caso è rivolto al fatto che il vettore energetico sia pienamente compatibile con tutte le strutture NG e, pertanto, può sostituire l'uso di metano di origine fossile conservando strutture esistenti (come le condotte) ed essere utilizzato direttamente negli attuali dispositivi degli utenti finali (come in caldaie alimentate a gas). Un altro vantaggio è che la metanazione richiede anidride carbonica, il che rende possibile l'integrazione di PtG negli impianti con un gas di scarico ricco di CO_2 .

1.2.3 Cella a combustibile

I sistemi di stoccaggio di energia derivante da idrogeno utilizzano due processi separati per lo stoccaggio di energia e la produzione di energia elettrica. L'uso di un dispositivo di elettrolisi è un metodo comune per produrre idrogeno che devono essere conservato in contenitori ad alta pressione o trasmesso da tubature verso aree diverse. Il sistema necessario per trasformare l'idrogeno immagazzinato in energia elettrica è chiamato cella a combustibile, che è il componente chiave di un sistema a idrogeno. La reazione chimica che è coinvolta nel processo:



Le celle a combustibile possono essere classificate in cinque categorie: celle a combustibile polimeriche (PEMFC), celle a combustibile alcaline (AFC),

celle a combustibile ad acido fosforico (PAFC), celle a combustibile a carbonati fusi (MCFC) e a ossidi solidi (SOFC). Mentre le PEMFC e le AFC operano a basse temperature (sotto i 100 °C), PAFC, MCFC e SOFC funzionano a temperature più elevate (fino a 600 °C nel caso di SOFC), il che rende possibile applicare queste tecnologie a cicli combinati. Tra gli aspetti positivi della produzione di energia elettrica utilizzando le celle a combustibile c'è la minima produzione di rumore e il basso inquinamento. Altre proprietà interessanti sono il ridimensionamento facile (potenziale da 1 kW a centinaia di MW) e il design compatto. Le celle a combustibile combinate con dispositivi per la produzione e lo stoccaggio dell'idrogeno possono fornire energia stazionaria o distribuita e energia di trasporto (sostituendo potenzialmente combustibili fossili per veicoli). Vale la pena ricordare che dopo il ciclo di vita utile della cella a combustibile deve essere implementata una strategia per riciclare e smaltire i metalli tossici che sono coinvolti nel processo di conversione come elettrodi e catalizzatori.

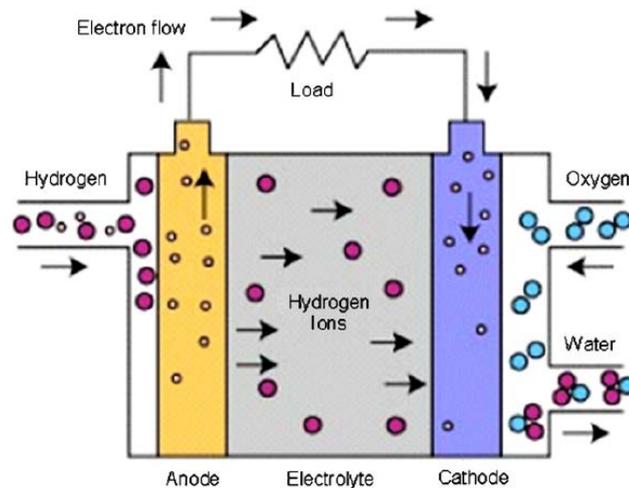


Figura 1.3: Illustrazione di una cella a combustibile. Immagine tratta da [24].

1.3 Sistemi di accumulo di energia elettrochimica

Le tipologie di sistemi di stoccaggio elettrochimico presenti in commercio variano a seconda della natura della reazione chimica, delle caratteristiche strutturali e del design dell'accumulatore. Una seconda classificazione utile si riferisce alla profondità di scarica, con batterie a bassa o alta profondità, dove le batterie a ciclo profondo hanno meno lastre di spessore nella struttura, sono adatte per applicazioni rinnovabili. La terza classificazione si

riferisce alla caratteristica dell'elettrolita nella batteria (allagata o bagnata e sigillata). Le batterie allagate o bagnate sono ampiamente utilizzate nelle applicazioni rinnovabili.

Una batteria è un sistema elettrochimico che consente la conversione reversibile dell'energia chimica in energia elettrica. Generalmente è composto da due celle separate da un setto poroso. Le due celle contengono un elettrodo metallico interno (anodo e catodo) immerso in una soluzione elettrolitica (che di solito contiene ioni dello stesso metallo). Ciò che viene comunemente chiamato "batteria" non è altro che una combinazione, in parallelo o in serie, di un numero variabile di accumulatori elettrochimici. Il principio di funzionamento di una batteria "ideale" che consente a un accumulatore elettrochimico di immagazzinare e rilasciare energia elettrica si basa su reazioni di riduzione e ossidazione. Nella prima reazione l'elettrodo (anodo) viene ossidato, emettendo elettroni, mentre l'altro elettrodo (catodo) viene ridotto, acquisendo gli elettroni persi dal primo: attraverso un conduttore, questo flusso di elettroni viene intercettato, ottenendo così corrente elettrica. Le diverse categorie di batterie elettrochimiche esistenti si trovano in una fase diversa dello sviluppo tecnologico e sono caratterizzate da diversi materiali che costituiscono gli elettrodi e la soluzione elettrolitica, nonché dalle caratteristiche costruttive.

Batterie a piombo acido

La batteria ricaricabile più utilizzata è la batteria al piombo. Il catodo è fatto di PbO_2 : l'anodo è costituito da piombo e l'elettrolita è acido solforico. Questa tipologia di batterie hanno tempi di risposta rapidi, piccoli tassi di autoscarica giornalieri (meno dello 0,3%), efficienze relativamente elevate del ciclo (63-90%) e bassi costi di capitale. Le batterie al piombo acido possono essere utilizzate in dispositivi fissi come alimentatori di riserva per i sistemi di dati e di telecomunicazione e applicazioni di gestione dell'energia. Inoltre, sono stati valutati come sistemi di alimentazione per veicoli ibridi o completamente elettrici. A svantaggio di queste tecnologie ci sono tempi di ciclo relativamente bassi, così come la densità energetica (50-90 Wh/L) e l'energia specifica (25-50 Wh/kg)[18]. Inoltre si comportano male a basse temperaturee ciò richiede un sistema di gestione termica, che aumenta il costo.

La ricerca e lo sviluppo di batterie al piombo acido è attualmente focalizzata su:

- materiali innovativi per il miglioramento delle prestazioni, come l'estensione dei tempi di ciclo;
- implementazione della tecnologia delle batterie per applicazioni nel settore eolico, integrazione di energia fotovoltaica e settori automobilistici.

Batterie a ioni di litio

In una batteria agli ioni di litio il catodo è costituito da un ossido di litio metallico, come LiCoO_2 e LiMO_2 , e l'anodo è in carbonio. L'elettrolita è generalmente un liquido organico non acquoso che contiene sali di litio disciolti, come LiClO_4 . La batteria agli ioni di litio è considerata adatta per aree di applicazione in cui il tempo di risposta, le piccole dimensioni e il peso delle apparecchiature sono molto importanti. Le batterie agli ioni di litio hanno anche un'efficienza del ciclo elevata, fino al 97%[18]. I principali svantaggi sono:

- la profondità del ciclo di scarica può influire sulla durata della batteria agli ioni di litio
- il sistema di solito richiede un computer di bordo per gestire il suo funzionamento, il che aumenta il suo costo complessivo.

L'attuale ricerca per la batteria agli ioni di litio sta spingendo verso:

- l'aumento della capacità della batteria con l'uso di materiali in nanoscala;
- migliorare l'energia specifica della batteria sviluppando materiali per elettrodi avanzati e soluzioni elettrolitiche.

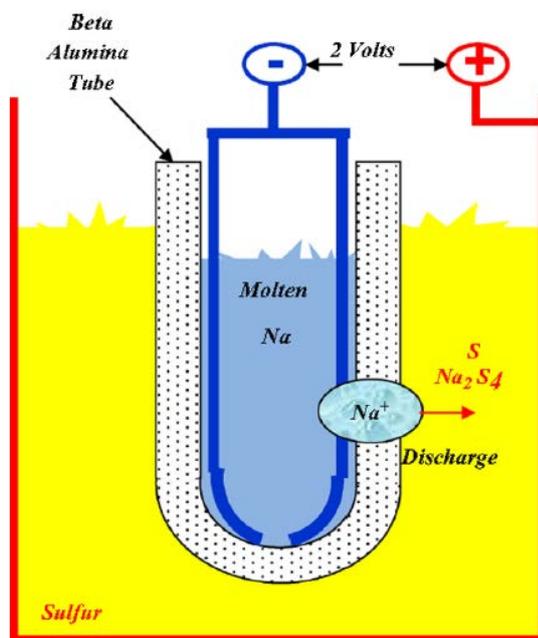


Figura 1.4: Batteria sodio-zolfo. Immagine tratta da [20].

Batterie a sodio zolfo (NaS)

Una batteria NaS si basa sul sodio fuso e sullo zolfo fuso che fungono da elettrodi e utilizza l'ossido di alluminio come elettrolita solido. Le reazioni

richiedono generalmente una temperatura di 574-624 K per garantire che gli elettrodi siano in stato liquido, il che porta ad un'alta reattività. Le proprietà utili delle batterie NaS includono densità di energia elevata, tasso di autoscarica giornaliera quasi nulla, capacità nominale più elevata rispetto ad altre categorie di batterie e capacità di potenza di impulso elevata. La batteria utilizza materiali economici e non tossici che hanno un'alta riciclabilità (99%)[18]. I lati negativi sono dovuti ad alti costi operativi annuali e un sistema aggiuntivo necessario per assicurare le condizioni termiche di miglior funzionamento.

Gli sforzi di ricerca e sviluppo si concentrano principalmente sul miglioramento degli indici di prestazione cellulare e sulla riduzione dei limiti operativi ad alta temperatura.

1.4 Sistemi di accumulo di energia elettrica

I sistemi di accumulo di energia elettrica includono processi in cui l'energia viene immagazzinata come energia potenziale elettrica utilizzando dispositivi specifici per creare un campo elettrico (potenziale elettrostatico) o un campo magnetico (potenziale elettrodinamico o magnetico).

1.4.1 SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage)

L'accumulo di energia magnetica tramite superconduttore (Superconducting Magnetic Energy Storage, SMES) è una tecnologia in grado di immagazzinare l'elettricità quasi direttamente. Invece di accumulare cariche e indurre un campo elettrico statico, SMES passa una corrente attraverso una bobina superconduttrice generando un campo elettrico dinamico o un campo magnetico. Mentre il materiale della bobina è in uno stato di superconduttore, non vi è resistenza e la corrente può attraversarla indefinitamente con perdite quasi nulle. Un sistema SMES è costituito da un involucro sotto vuoto con un sistema di raffreddamento che utilizza liquidi criogenici per mantenere lo stato di superconduttore del materiale a spirale.

Oltre all'elevata efficienza (80-90%), le caratteristiche principali di questo sistema sono i tempi di risposta rapidi (pochi millisecondi) e una densità di potenza molto elevata (1-4 MW/m³)[22], essendo adatti per applicazioni ad alta potenza in brevi periodi di tempo. I principali inconvenienti sono i costi elevati e le problematiche ambientali dovute alle possibili conseguenze del forte campo magnetico, ipotesi in parte smentite da diversi studi.

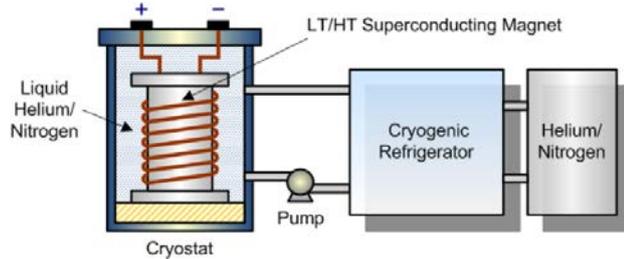


Figura 1.5: Illustrazione di un sistema SMES. Immagine tratta da [1].

1.4.2 Supercondensatori

I condensatori convenzionali sono il modo più diretto per immagazzinare elettricità accumulando cariche positive e negative tramite l'induzione di un campo elettrico statico. Hanno una bassa densità di energia ($2-10 \text{ kWh/m}^3$), un'efficienza da moderata a elevata (60-85%) e un alto tasso di autoscarica (oltre il 40%/giorno). I supercondensatori, sviluppati per avere caratteristiche migliori rispetto a quelli convenzionali, colmano il divario tra condensatori convenzionali e batterie. Si possono rappresentare tre tipi di supercondensatori: condensatori elettrochimici a doppio strato (electrochemical double layer capacitors, EDLC), pseudo condensatori, super condensatori asimmetrici o ibridi.

Gli EDLC si basano sull'accumulo di cariche elettroniche su elettrodi di carbonio ad alta superficie. I processi di carica e scarica sono basati sull'adsorbimento ionico reversibile sugli elettrodi: nel ciclo di carica, ogni superficie dell'elettrodo accumula le cariche elettriche e gli ioni nella soluzione elettrolitica si diffondono nell'elettrodo di carica opposta, producendo un doppio strato di carica ad ogni elettrodo.

Negli pseudo condensatori si verificano reazioni di ossido-riduzione rapide e reversibili sulle superfici degli elettrodi, coinvolgendo il passaggio di carica attraverso il doppio strato, un processo simile a quello che avviene nelle batterie, generando corrente. Uno dei principali vantaggi degli pseudo condensatori rispetto agli EDLC è la loro maggiore densità di energia. Tuttavia è difficile sfruttare tutto il potenziale di densità di energia perché la cinetica di reazione redox non è compatibile con la rapida scarica di carica a cui sono soggetti i supercondensatori. In pratica, questa discrepanza si ripresenta in una capacità di memoria non sfruttata a pieno titolo in elettrodi a batteria. Un altro inconveniente è associato all'espansione meccanica e alla contrazione durante le reazioni di ossido-riduzione che possono causare guasti meccanici, abbassando la vita del sistema.

I supercondensatori possono essere caricati e scaricati più velocemente delle batterie e hanno una durata di ciclo molto lunga, in grado di eseguire diverse decine di migliaia di cicli. I supercondensatori presentano una maggiore densità di energia ($10-30 \text{ kWh/m}^3$) rispetto a quelli convenzionali, un'efficienza

migliorata (85-95%) e una velocità di autoscarica ridotta (20-40%/giorno). Un'altra caratteristica importante è la loro elevata densità di potenza (500-10000 W/kg)[18][22], indicata per applicazioni ad alta potenza. La capacità di archiviazione di solito varia da millisecondi a secondi o pochi minuti e, pertanto, questa tecnologia è adatta per applicazioni in brevi periodi di tempo. I supercondensatori possono essere disposti in sistemi modulari collegati in parallelo o serie per aumentare la potenza e la capacità di memorizzazione.

1.5 Sistemi di accumulo di energia termica

I sistemi TES (Thermal Energy Storage) sono sistemi adatti per immagazzinare calore o freddo in un supporto di memorizzazione in un certo intervallo di temperatura per un ulteriore utilizzo in condizioni diverse di temperatura, luogo o potenza. I sistemi TES sono applicabili a vari scopi industriali e residenziali come riscaldamento o raffrescamento degli ambienti, riscaldamento e raffrescamento dei processi industriali, produzione di acqua calda o generazione di elettricità. Il sistema TES può essere classificato in tre diverse categorie: sistema a calore sensibile, a calore latente e sistema di assorbimento e adsorbimento.

1.5.1 Sistema di accumulo a calore sensibile (SHTES)

Il sistema di accumulo a calore sensibile (Sensible Heat Thermal Energy Storage, SHTES) è una tecnologia matura e riguarda lo stoccaggio di energia termica mediante il raffreddamento o il riscaldamento di un mezzo di stoccaggio solido o liquido. Il nome viene spesso utilizzato indipendentemente dal riscaldamento o raffreddamento applicato. Lo stoccaggio si basa sulla differenza di temperatura nel materiale. La tecnologia offre una capacità limitata dal calore specifico del supporto di memorizzazione. Rispetto ad altri media SHS, l'acqua ha il calore specifico più elevato, che attualmente lo rende il materiale più favorevole per lo stoccaggio di calore nelle applicazioni residenziali. Due dei più comuni sistemi di stoccaggio a base acquosa sono serbatoi d'acqua e sistemi di stoccaggio delle acque sotterranee. L'acqua fredda entra nella parte inferiore del serbatoio dell'acqua calda; al passaggio nel collettore l'acqua fredda viene riscaldata dall'energia termica convertita dall'energia solare emessa dal sole; infine l'acqua rilascia il calore assorbito nella parte superiore del serbatoio. Per quanto riguarda il serbatoio l'acqua si stratifica naturalmente perché la densità aumenta a temperature più basse. Pertanto l'acqua calda scorre verso l'alto mentre l'acqua fredda rimane sul fondo. Al fine di minimizzare le perdite termiche durante lo stoccaggio, il fluido termovettore viene solitamente conservato in serbatoi di stoccaggio ad alto isolamento termico. Lo stoccaggio sotterraneo viene utilizzato per

applicazioni generalmente su larga scala di accumulo di calore sensibile in mezzi solidi e liquidi. Il sistema richiede grandi quantità e volumi di materiali, così come una corretta progettazione a causa della bassa densità di energia e della capacità di scaricare l'energia termica a temperature costanti. La capacità di memorizzazione e l'efficienza sono piuttosto variabili in quanto dipendono dal calore specifico del supporto di memorizzazione e dalle tecnologie di isolamento termico che potrebbero essere abbastanza variabili.

1.5.2 Sistema di accumulo a calore latente (LHTES)

Lo stoccaggio di calore latente (Latent Heat Thermal Energy Storage, LHTES) comporta l'immagazzinamento dell'energia termica in un materiale noto come materiale a cambiamento di fase (Phase Change Materials, PCM). Tale materiale cambia fase ad una certa temperatura chiamata temperatura di cambio fase (Phase Change Temperature, PCT). A tale temperatura i legami chimici nel PCM inizieranno a rompersi e il materiale cambierà di fase passando da solido a liquido per via di una reazione endotermica, assorbendo calore. Allo stesso modo, al diminuire della temperatura, il materiale ritorna allo stato solido poiché il PCM rilascia calore in una reazione esotermica. Controllando la temperatura entro una determinata velocità è possibile immagazzinare l'energia usata per modificare la fase del materiale. Per conservare il freddo, il processo è quello inverso. La capacità di memorizzazione di un PCM è pari all'entalpia di cambiamento di fase al PCT più il calore/freddo sensibile immagazzinato sopra/sotto l'intero intervallo di temperatura dello stoccaggio. Pertanto, la capacità di archiviazione è maggiore per questa tecnologia rispetto a quella ottenibile con il sistema a calore sensibile. Ciò è dovuto alla capacità di memoria aggiuntiva associata al calore/freddo latente del PCT, per massa o volume di materiale. Oltre allo stato solido-liquido ci sono altri tre stati in grado di classificare il cambiamento del materiale: solido-solido, solido-gas e gas-liquido. Utilizzando una varietà di tecniche e materiali il sistema a calore latente può essere utilizzato sia a breve termine (giornaliero) che a lungo termine (stagionale) per l'accumulo di energia.

1.5.3 Accumulo di energia termochimica

Lo stoccaggio di energia termochimica (Thermo Chemical Energy Storage, TCES) si basa sullo stoccaggio di energia termica mediante reazioni chimiche. Il principio di base del sistema TCES è il seguente: il composto iniziale è costituito da due o più componenti combinati in un unico composto chimico; tale composto viene quindi rotto fornendo calore e i componenti scissi vengono quindi memorizzati separatamente fino a quando il sistema non ri-

chiede calore. Durante i periodi di forte richiesta avviene il processo inverso, ovvero i componenti vengono riuniti tramite reazioni e il calore viene rilasciato. Il calore rilasciato dalla reazione costituisce la capacità di stoccaggio. Sia SHS che LHS sono spesso limitati nel tempo a causa di perdite di calore. TCES differisce per il fatto che consente di collegare periodi di lunga durata tra domanda e offerta. Questo rende TCES particolarmente adatto per la produzione di elettricità su larga scala. Le reazioni termochimiche possono essere utilizzate per accumulare e scaricare freddo e calore a richiesta, ma anche per regolare l'umidità in una varietà di applicazioni utilizzando diversi reagenti chimici. L'efficienza di questa tecnologia è compresa tra il 75% e quasi il 100% e i materiali TCES hanno la più alta densità di tutti i supporti di memorizzazione, dando quindi a questa tecnologia un grande potenziale. Tuttavia, le tecnologie di archiviazione basate sul TCES sono per lo più in fase di sviluppo e di dimostrazione e sono necessari ulteriori miglioramenti per rendere questa tecnologia disponibile sul mercato.

1.6 Conclusioni

In questo capitolo sono state presentate le principali e più promettenti tecniche di accumulo di energia. Ciascuna di esse è stata analizzata dal punto di vista del funzionamento, delle caratteristiche principali e delle possibili ricerche future. Tra queste, le tecnologie di accumulo meccanico sono le più adatte per lo stoccaggio di energia su larga scala, come CAES o PHS, soggette però a importanti vincoli geologici.

Gli accumulatori elettrochimici sono tutte tecnologie mature e collaudate, ciascuna delle quali adatte a soluzioni diverse come applicazioni di accumulo portatili dove è importante ridurre peso e ingombro o dove il costo di investimento è una variabile importante da considerare rispetto alle prestazioni. La diffusione dei sistemi di accumulo FES e SMES è ancora frenata dagli elevati costi di investimento, tuttavia ci sono buone probabilità che nei prossimi anni diventino le tecnologie di riferimento per le applicazioni legate alla regolazione di tensione e frequenza di rete. I sistemi di accumulo termici sono soluzioni mature, collaudate e molto diffuse.

Capitolo 2

PARAMETRI DI PRESTAZIONE: ANALISI E CONFRONTO

In questo capitolo vengono presentati i principali indici di prestazione proposti in letteratura dei sistemi di accumulo di energia, presentati nel capitolo precedente, con la finalità di valutare i più comuni criteri di confronto per queste tecnologie. Dopo una prima definizione di tali parametri, viene presentata un confronto dei vari sistemi sulla base di alcuni di questi indici, allo scopo di valutare in prima approssimazione l'adattabilità delle varie tecnologie a determinate aree di utilizzo.

2.1 Indici di prestazione

I sistemi di accumulo di energia possono essere classificati [17] secondo i seguenti criteri:

- la tipologia di applicazione: permanente o portatile;
- la durata dello stoccaggio: a breve o lungo termine;
- il tipo di produzione: massima potenza richiesta.

Si rende pertanto necessario analizzare in senso critico le caratteristiche fondamentali (sia tecniche sia economiche) dei sistemi di accumulo al fine di stabilire dei criteri di confronto che permettano di selezionare la tecnologia di accumulo migliore per il tipo di applicazione a cui è destinata.

I sistemi di accumulo di energia presenti in letteratura sono molteplici, ciascuno dei quali presenta caratteristiche diverse dagli altri. Si tratta quindi di valutare di situazione in situazione quale di questi sia il più conveniente da utilizzare. Per far questo è necessario definire quelli che sono i parametri prestazionali più importanti da prendere in considerazione per scegliere la soluzione migliore [2],[17].

- **sistema di accumulo dell'energia**: un sistema composto da un supporto di memorizzazione (elemento fisico o chimico in cui è immagazzinata l'energia) e tutti gli accessori necessari (ad esempio sistema di controllo o qualsiasi altro accessorio strettamente necessario per il funzionamento del sistema);

- **capacità di stoccaggio di energia [kWh]**: e' la quantità di energia che il sistema di accumulo ha immagazzinato al termine del processo di carica. Per evitare danni al sistema stesso non è possibile scaricare completamente il sistema, poichè il parametro profondità di scarica ci da il valore minimo di carica che il sistema può raggiungere senza danneggiarsi;

- **periodo di carica [s]**: il periodo durante il quale si verifica il processo di carica. Il periodo di carica minimo è il tempo più veloce durante il quale il volume stoccaggio può essere completamente caricato senza influire negativamente sulle sue prestazioni;

- **periodo di scarica [s]**: il periodo durante il quale si verifica il processo di scarica. Il periodo di scarica minima è il tempo più veloce durante il quale la quantità precedentemente accumulata viene rilasciata completamente (scarica completa) senza influire negativamente sulle sue prestazioni, tenendo conto della profondità di scarica. Tale valore è dato da:

$$\tau = E_{st}/P_{max} \quad (2.1)$$

dove E_{st} rappresenta la capacità di accumulo, mentre P_{max} la massima potenza disponibile;

- **efficienza/rendimento del sistema [%]**: la capacità di un determinato sistema di ottenere il migliore risultato possibile consumando la quantità minore possibile di energia. Viene rappresentata da:

$$\eta = E_{ut}/E_{st} \quad (2.2)$$

dove E_{ut} è la quantità di energia effettivamente rilasciabile dal sistema senza subire danni;

- **tempo di risposta [s]**: il tempo che intercorre tra la necessità di un servizio e la fornitura dello stesso, più è basso e prima il sistema interviene;

- **potenza in uscita [kW]**: la potenza massima ottenibile in uscita dal sistema una volta completato il processo di carica e scarica. Tale valore è esplicativo della taglia del motore-generatore nella catena di conversione e stoccaggio dell'energia;
- **densità di energia [Wh/L]**: l'energia nominale che il sistema può immagazzinare per unità di volume, la densità di energia volumetrica;
- **densità di potenza [W/L]**: la potenza massima ottenibile per unità di volume;
- **durata [anni o cicli]**: misura il ciclo di vita utile del sistema di archiviazione. Può essere misurato in anni o cicli. Un ciclo è definito come la successione di una fase completa di carica seguita da una di scarica. Alcune tecnologie hanno un numero fisso di cicli prima di accusare perdite di prestazioni;
- **perdite di autoscarica**: è la quantità di energia che viene persa durante la fase di stoccaggio. Essendo la finalità dei sistemi di accumulo quella di conservare per lunghi periodi l'energia immagazzinata, tale parametro deve essere il più piccolo possibile;
- **efficienza di andata e ritorno [%]**: il rapporto tra la quantità di energia scaricata e l'energia caricata all'interno di un ciclo operativo;
- **costo del capitale [€/kW o €/kWh]**: i costi iniziali di investimento di una tecnologia di accumulo per unità di energia [€/kW] o capacità di stoccaggio di energia [€/kWh]. Un sistema di stoccaggio di energia risulta interessante come soluzione applicativa quando il guadagno totale supera i costi derivanti dalla sua installazione e funzionamento. Il capitale investito per la costruzione e installazione del sistema e i costi di O&M (di gestione e manutenzione) sono i principali fattori da considerare per l'intera vita del sistema;
- **aspetti ambientali**: non sono propriamente degli indici di prestazione di un sistema di stoccaggio ma gli aspetti ambientali possono risultare molto persuasivi per promuovere la diffusione dei sistemi di accumulo di energia. Gli impianti di accumulo consentono infatti di ridurre le emissioni di CO₂ ma i costi di installazione sono superiori a quelli degli impianti tradizionali. Nonostante ciò nei Paesi scandinavi (in particolare Svezia e Norvegia) una parte della popolazione preferirebbe pagare di più per l'energia elettrica a fronte di grossi investimenti mirati alla riduzione dell'inquinamento ambientale. Inoltre alcuni aspetti ambientali, quali quelli legati alla produzione dei componenti dei sistemi di accumulo e al loro smaltimento alla fine della vita

utile, possono essere indici per la scelta un sistema di accumulo rispetto ad un altro.

2.2 Confronto tra i sistemi tramite diversi indici

Per confrontare le prestazioni delle diverse tecnologie di stoccaggio è stato precedentemente analizzato un elenco di criteri il cui insieme consente di definire un "indice di prestazione" per le quattro categorie di applicazioni:

- applicazione a bassa potenza in aree isolate, essenzialmente per alimentare sistemi ausiliari;
- applicazione di media potenza in aree isolate (singoli impianti elettrici, fornitura urbana);
- applicazione a livello di rete (elettrica, termica o di combustibili) per il livellamento dei picchi di richiesta;
- applicazioni a livello di rete elettrica per garantire la qualità dell'energia (controllo della frequenza).

Per confrontare i sistemi di archiviazione si usa utilizzare il diagramma Ragone, il quale rappresenta le prestazioni in termini di relazione tra massa, energia e potenza. Questo tipo di confronto è particolarmente interessante per le unità portatili, per le quali la massa è un aspetto critico, così come il volume occupato.

2.2.1 Potenza in funzione del campo di applicazione

Le applicazioni di stoccaggio dell'energia su larga scala possono essere classificate in tre principali categorie come da figura 2.1:

- qualità della potenza (power quality): l'energia immagazzinata in queste applicazioni viene utilizzata solo per pochi secondi o meno per garantire la qualità della potenza erogata;
- memorizzazione di buffer e di emergenza (energy backup): l'energia memorizzata in queste applicazioni viene utilizzata per pochi secondi o minuti per garantire la continuità del servizio quando si passa da una fonte di elettricità ad un'altra;
- gestione della rete (energy management): i sistemi di storage in queste applicazioni sono utilizzati per disaccoppiare la sincronizzazione tra generazione di energia e consumo.

Un'applicazione tipica è il livellamento del carico, il che implica l'accumulo di energia durante le ore non di picco (basso costo energetico) e l'uso di energia immagazzinata nelle ore di punta (alto costo energetico).

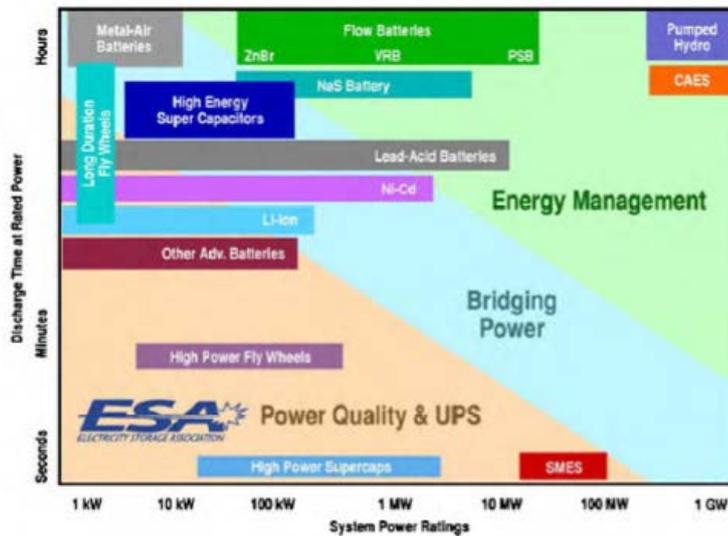


Figura 2.1: Andamento delle tecniche di accumulo in funzione del campo di applicazione [ESA, 2015]

2.2.2 Efficienza energetica per ciclo

L'efficienza energetica e l'aspettativa di vita (numero massimo di cicli) sono due parametri importanti da considerare, tra gli altri, prima di scegliere una tecnologia di archiviazione, in quanto incidono sui costi di archiviazione complessivi. La bassa efficienza aumenta i costi energetici effettivi poiché è possibile utilizzare solo una frazione dell'energia immagazzinata. Una breve durata di vita aumenta anche i costi a lungo termine poiché l'unità di archiviazione deve essere sostituita più spesso. Le spese effettive devono includere le spese finanziarie e le spese operative al fine di sviluppare una migliore idea di tutte le caratteristiche finanziarie di una tecnologia di accumulo (figura 2.2).

I sistemi con maggiore efficienza risultano essere le batterie (90-95% di efficienza massima) e i volani (90-95%), mentre i sistemi PtG risultano avere le efficienze minori (25-50%).

2.2.3 Costi di investimento

I costi di investimento associati a un tipo di stoccaggio sono un parametro economico importante che influisce sul costo totale della produzione di energia. Pertanto, alcuni tipi di sistemi di storage possono diventare redditizi solo se viene fornito un certo minimo di energia. È quindi necessario prendere in considerazione il costo complessivo del sistema al fine di ottenere un'analisi completa dei costi.

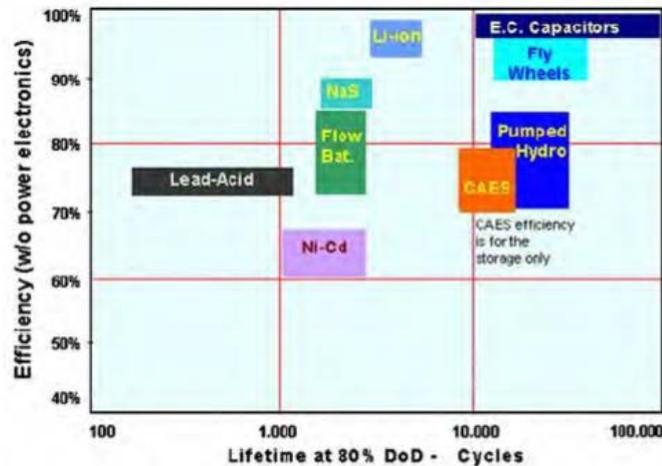


Figura 2.2: Andamento delle tecniche di accumulo in funzione dell'efficienza e della durata della vita [ESA, 2015]

Ad esempio, nonostante le batterie al piombo siano relativamente economiche, non sono necessariamente l'opzione meno costosa per la gestione dell'energia, a causa della loro durata relativamente bassa.

Il costo delle batterie in figura 2.3 è stato regolato per escludere il costo della conversione dell'elettronica di potenza. Il costo dell'energia è stato anche diviso per l'efficienza di stoccaggio per ottenere il costo per unità di energia utile. I costi di installazione variano anche in base al tipo e alle dimensioni del sistema. Infine, sembra ovvio che le varie funzioni necessarie per progettare un sistema di accumulo di energia debbano essere integrate in un insieme coerente, adattato alle specifiche, per ridurre i costi complementari. Questo criterio è il problema principale riguardante la penetrazione del sistema nel mercato dello stoccaggio di energia.

I sistemi di accumulo di energia meccanica (250-2000 \$/kW), batterie (100-4000 \$/kW) e celle a combustibile (10000 \$/kW) presentano i costi di investimento maggiori, dovuti alla ricerca dei siti adatti per i primi, ai componenti costosi e dei sistemi ausiliari per le altre.

2.2.4 Costi di investimento per ciclo di carica e scarica

Il costo per ciclo potrebbe essere il modo migliore per valutare il costo di un sistema di accumulo di energia progettato per le frequenti applicazioni di scarica di carica. La figura 2.4 mostra la componente principale di questo costo, tenendo conto della durabilità e dell'efficienza. Per un costo per ciclo più completo, è necessario prendere in considerazione le spese di ricerca e di sostituzione e altri costi, che rimangono sconosciuti per le tecnologie emergenti. Va notato che il costo per ciclo non è un criterio appropriato per il

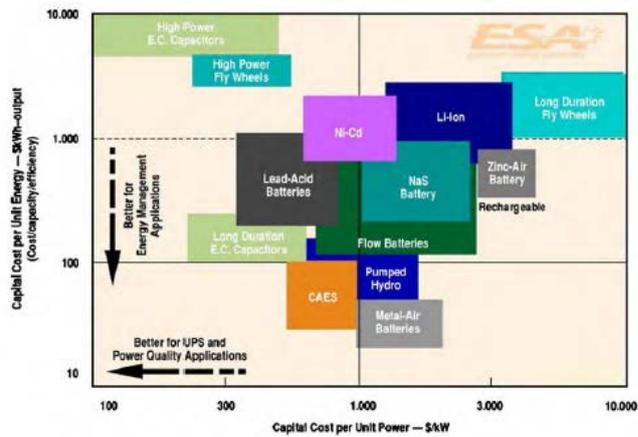


Figura 2.3: Andamento delle tecniche di accumulo in funzione dei costi per unità di potenza e per unità di energia [ESA, 2015]

livellamento del carico o l'arbitraggio energetico, dove lo stoccaggio è meno frequente e i costi energetici sono alti e instabili.

Batterie e celle a combustibile implicano elevati costi per ciclo di carica-scarica (20-100 c\$/ciclo le prime, 6000-20000 c\$/ciclo le seconde) mentre i sistemi di accumulo di energia meccanica presentano i valori minori (2-10 c\$/ciclo).

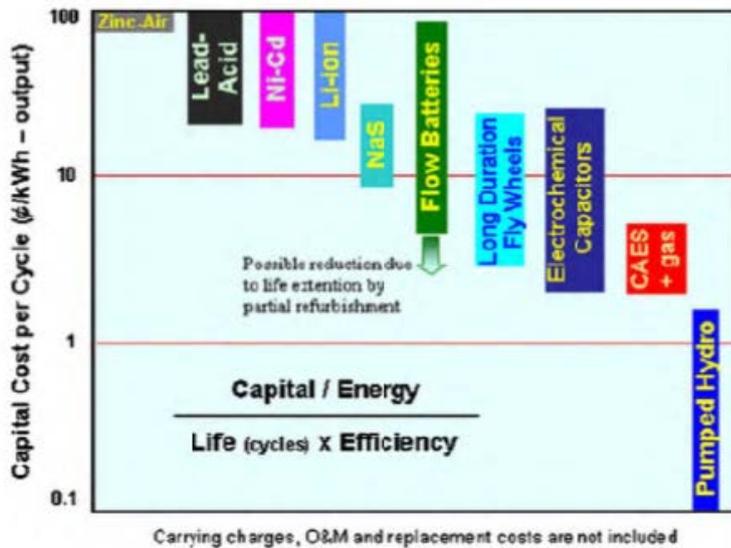


Figura 2.4: Andamento delle tecniche di accumulo in funzione dei costi di investimento per ciclo di carica-scarica ESA[2015]

2.2.5 Densità di energia

Le diverse tecniche di stoccaggio possono essere classificate in funzione della disponibilità di energia e della potenza massima per litro (densità del volume) o per chilogrammo (densità di massa). Questo confronto è particolarmente importante per l'industria della trasmissione, le applicazioni portatili e i siti isolati (figura 2.5). La massa è un parametro importante per le applicazioni permanenti in termini di costi dei materiali. Si potrebbe quindi scegliere, per un'installazione elettrica, un materiale con bassa energia specifica, ma lontano dal massimo disponibile (il che significa che sarà necessario più materiale), a un costo unitario che riduce il costo complessivo del sistema di accumulo. In questo caso, è il prezzo per kWh che è importante, e non i kg per kWh. Il volume di un sistema di archiviazione può essere importante, prima di tutto se deve essere installato in uno spazio ristretto o costoso, ad esempio nelle aree urbane. Un altro aspetto del volume è la sua incidenza sui mezzi e sui costi di contenimento e manutenzione del vuoto (volani ad esempio) o sistemi di raffreddamento e isolamento termico. I sistemi di accumulo di energia meccanica possiedono basse densità di energia (5-60 Wh/kg), mentre batterie e celle a combustibile possiedono densità di energia molto più elevate, dell'ordine delle centinaia e migliaia di Wh/kg.

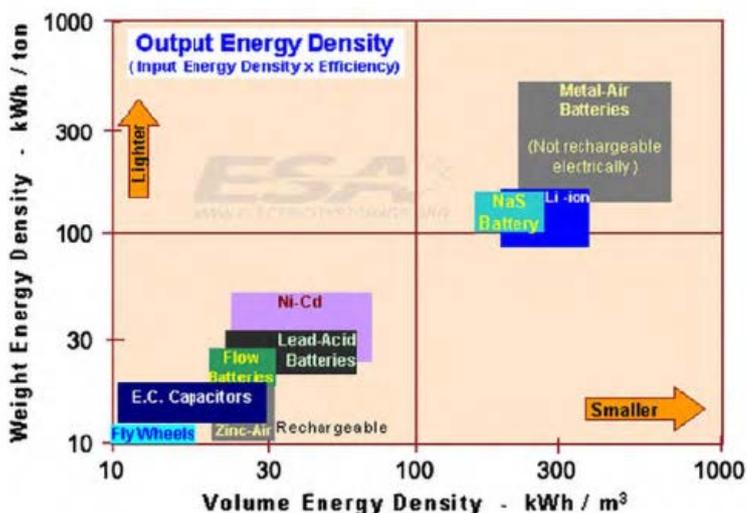


Figura 2.5: Andamento delle tecniche di accumulo in funzione della densità di energia ESA[2015]

2.3 Conclusioni

In questo capitolo sono stati presentati i principali indici di prestazione dei sistemi di accumulo di energia, presentate le quattro categorie di utilizzo e alcuni indici di confronto. L'analisi mostra come le diverse tecnologie possiedono valori molto differenti tra loro e come una determinata tecnologia può risultare la migliore dal punto di vista di un determinato parametro (le batterie possiedono le maggiori densità di energia), ma non dal punto di vista del secondo (possiedono elevati costi di ciclo e investimento).

La scelta degli indici di confronto è molto rilevante per poter creare un criterio generale che permetta di individuare il miglior sistema di accumulo per ogni campo di applicazione all'interno di tutte le possibili soluzioni tecnologiche. La scelta della soluzione migliore permette di migliorare le prestazioni del sistema complessivo.

Capitolo 3

CONFIGURAZIONE FONTI-ACCUMULI- UTILIZZI

In questo capitolo vengono organizzati in una configurazione generale i principali sistemi di accumulo e di conversione di energia allo scopo di costruire un diagramma esplicativo delle possibili soluzioni tecnologiche in grado di collegare una determinata fonte di energia primaria alla forma finale di energia richiesta da un possibile utilizzatore. Vengono poi analizzati tali componenti del sistema dal punto di vista del rendimento, dei costi e dei vincoli operativi, allo scopo di poterli confrontare per valutare il più adatto ad una determinata richiesta tecnologica. Lo stesso metodo di analisi può essere utilizzato per l'analisi del sistema attraverso altri punti di vista, quali ad esempio potenza prodotta o tempo di risposta del sistema.

3.1 Nuovo approccio per la definizione della configurazione generale fonti-accumuli-utilizzi

La possibilità di sfruttare le forme di energia presenti in natura, che siano esse fossili o rinnovabili, si basa sul presupposto che esse vengano trasformate e rese disponibili in modo tale da essere effettivamente utilizzabili dall'utente finale, tramite un opportuno sistema di conversione.

Come affermato in precedenza, spesso il momento in cui tale forma di energia viene richiesta non coincide, o lo fa per un breve periodo, con il momento in cui vi è la possibilità di ottenerla dalla fonte primaria. A tale problema vi si può porre rimedio tramite l'utilizzo di sistemi di accumulo: l'eventuale surplus di produzione viene opportunamente stoccata per un successivo utilizzo. Si può notare come per una determinata tipologia di accumulo vi

siano diverse soluzioni che portino allo stesso risultato, ma che presentano caratteristiche anche molto diverse tra di loro. Le possibilità tecnologiche a disposizione sono dunque molteplici e tale numero cresce ulteriormente se pensiamo di poterle combinare tra di loro per rispondere ad una determinata richiesta.

La scelta di una determinata soluzione tecnologica rispetto ad una seconda che produca lo stesso effetto utile deve essere opportunamente valutata tramite determinati parametri operativi e non, accuratamente scelti per far fronte alla specifica richiesta. È importante capire che tutti i parametri prestazionali interagiscono e si influenzano tra di loro. Pertanto, tali parametri devono essere impostati e valutati in una prospettiva olistica in modo tale da trovare la soluzione di accumulo di energia più adatta per una determinata applicazione.

Allo stesso modo è importante capire che altri aspetti non tecnici devono essere considerati quando si sceglie un sistema di accumulo poichè possono comunque avere delle ripercussioni rilevanti anche a livello di producibilità e risparmio energetico.

Prima di procedere con l'analisi dei parametri, il primo passo da operare per avere un'idea globale del problema consiste nell'avere chiare tutte le possibili soluzioni, e quindi strade percorribili, che ci consentano di collegare le fonti primarie di energia presenti in natura alle forme di energia richieste dagli utilizzatori finali. Questo processo consiste quindi nel costruire il diagramma globale fonti-accumuli-utilizzi che tenga conto di tutte queste possibili soluzioni. Lo schema è costituito nella fascia superiore dalle fonti di energia primarie presenti in natura, sia rinnovabili che esauribili, dalle quali è possibile estrarre energia nelle tre diverse forme dispacciabili: energia elettrica, energia termica o frigorifera ed energia meccanica. Per ottenere tali energie ci si serve dei sistemi di conversione, rappresentati dalla prima fascia di frecce di collegamento, i quali producono come effetto utile una quantità di energia diversa a seconda della tipologia di sistema, ma sempre minore in quantità rispetto a quanto in input, per via della spesa energetica e di perdite dovute al processo di conversione. La quantità di energia prodotta deve quindi essere conservata, nel caso non vi sia l'immediata necessità di utilizzo o nel caso di condizioni di contorno favorevoli vi sia una produzione maggiore di quella richiesta, per essere disponibili ad un utilizzo in un momento successivo. In questa fase vengono utilizzati i sistemi di accumulo, i quali, segnalati da ciascuna freccia, collegano la forma di energia a disposizione alla forma di energia utilizzata per l'accumulo. Non per forza la forma di energia utilizzata per l'accumulo risulta essere la stessa da cui viene ricavata o in cui verrà poi fornita all'utilizzatore finale. Questo perchè, come verrà affrontato successivamente, tali trasformazioni potranno risultare più vantaggiose dal punto di vista di un determinato parametro. In questo caso, opportuni sistemi di conversione sono rappresentati nel grafico

tramite frecce di collegamento.

A conclusione del grafico sono rappresentate le forme di energia dispacciabili ottenute dalla fase di scarica dei sistemi di accumulo direttamente o tramite ulteriori processi di conversione in modo tale da essere resa disponibile per i diversi usi finali. Anche qui, come detto sopra, l'ulteriore conversione di energia è pensata allo scopo di ottenere la soluzione più conveniente possibile.

Tale schema, rappresentato nella pagina seguente, ci permette quindi di determinare un nuovo approccio generale per la definizione di tutte le possibili configurazioni per rendere disponibili le fonti di energia primarie nelle forme e nei tempi richiesti dalle utenze, tramite la costruzione di una o più catene di sistemi collegati tra loro. L'analisi e l'inclusione dei sistemi di accumulo in tale configurazione permette di disaccoppiare il momento della produzione da quello della richiesta, in modo tale da permettere la produzione quando le condizioni al contorno la rendono più conveniente. Come si può notare da una prima analisi, e come espresso in precedenza, il percorso energetico che collega uno specifico punto di partenza (A) ad un determinato risultato finale (B) non è univoco sia dal punto di vista dei sistemi coinvolti in tale processo, che, come conseguenza diretta, dal punto di vista di spesa energetica, costi capitali, ecc. Il percorso A-B migliore per risolvere un'ipotetico problema di richiesta energetica dovrà quindi essere valutato di volta in volta, tramite specifici parametri operativi e non, in modo tale da ridurre le possibili e molteplici soluzioni a quella che, rispettando una serie di caratteristiche opportunamente definite, risulterà essere la migliore.

3.2 Scelta del percorso migliore

Una volta definita la configurazione generale delle possibili soluzioni da percorrere per collegare la fonte energetica primaria al suo utilizzo finale e definiti, con opportune tabelle numeriche, i parametri operativi e non da tenere in considerazione per la scelta della soluzione più conveniente, il passo successivo consiste nel costruire e confrontare tra di loro i possibili percorsi energetici che collegano una determinata fonte di partenza ad una specifica fonte finale, allo scopo di trovare la soluzione più conveniente sulla base di determinati parametri richiesti. Come già più volte specificato, in questo elaborato verranno presi in considerazione solo una parte delle soluzioni tecnologiche, analizzate in relazione ai parametri definiti in precedenza. Nulla però vieta la possibilità di espandere tale procedimento a quanto non analizzato nel presente documento.

3.2.1 Fonti primarie di energia

Il primo step da operare consiste nel scegliere la fonte di energia primaria da utilizzare. Tale scelta deve essere fatta principalmente tra fonti primarie rinnovabili o esauribili: le prime, come ben si sa, sono da un lato inesauribili e per cui sempre a disposizione nel tempo in determinate condizioni, mentre dall'altro il loro potenziale energetico non è costante nel tempo. Ciò implica che il quantitativo energetico estraibile dal loro utilizzo non sarà prevedibile in futuro e ciò potrà ripercuotersi in una non disponibilità nel momento in cui tale energia verrà richiesta. La scelta di una fonte primaria, rispetto a quella esauribile, trasportabile se necessario da un luogo all'altro, deve essere fatta dove è presente in quantità tale da poter essere sfruttata ed è inoltre molto legata alle condizioni climatiche e ambientali di tale luogo. Ad esempio lo sfruttamento dell'energia solare sarà consigliata in zone con alta insolazione e con prevalenza di ore diurne rispetto a località più fredde. Ragionamento analogo può essere fatto per l'energia eolica, maggiormente interessante da sfruttare laddove la presenza di correnti d'aria e le loro caratteristiche quali velocità e costanza nel tempo comportino un'effettiva produzione che ne valga l'utilizzo.

Le fonti non rinnovabili sono invece sempre disponibili nell'immediato futuro, anche se non sempre facilmente accessibili, ma il loro utilizzo comporta la necessità di specifici impianti per la loro estrazione, lavorazione e produzione, a volte molto costosi o non facilmente operabili sia dal punto di vista tecnico che economico, oltre ad avere come conseguenza diretta e non trascurabile quella di produrre sostanze dannose per l'ambiente. Il forte impatto ambientale è infatti la conseguenza da tenere più in considerazione quando vengo utilizzate fonti energetiche fossili.

3.2.2 Sistema di conversione dell'energia

Scelta la tipologia di fonte primaria da utilizzare si passa quindi all'individuazione del sistema di conversione più adatto al contesto. Essendoci più soluzioni tecnologiche in grado di convertire la stessa fonte energetica saranno le condizioni di contorno e le caratteristiche dei sistemi stessi a suggerire la scelta più adatta.

Principale veicolo di scelta è dato dalla tipologia di energia che viene richiesta dall'utilizzatore, nel caso in cui vi sia uno sfruttamento diretto, o dalla tipologia di energia che si vuole accumulare, nel caso in cui l'utilizzo della stessa verrà fatto in un momento successivo. Come si può osservare dalla configurazione globale fonti-accumuli-utilizzi la forma di energia estratta dalle fonti primarie e quella utilizzata dal sistema di accumulo possono non coincidere. Ad una prima analisi potrebbe sembrare controproducente ottenere una determinata tipologia di energia per poi doverla convertire per far sì che possa essere accumulata, in quanto, essendo per definizione il rendimen-

to energetico strettamente minore di uno, la produttoria di più conversioni con tale range di valori di rendimento comporta sicuramente una diminuzione dello stesso. In realtà ciò non è sempre così, in quanto in base al tipo di utilizzo che devo farne, al luogo in cui devo produrre e immagazzinare e alla durata del tempo per cui tale energia deve essere accumulata, potrebbe risultare più conveniente operare più conversioni. Accumulare una tipologia di energia che implica un rendimento globale del sistema inferiore ad una seconda soluzione, può rivelarsi più vantaggioso da punti di vista operativi e non diversi, come a livello economico o di fattibilità tecnologica. Per questo la scelta di una determinata soluzione deve essere ben valutata di caso in caso in base alle condizioni di contorno e le caratteristiche dei sistemi stessi.

3.2.3 Sistema di accumulo di energia

Una volta che si ha a disposizione una determinata forma di energia e che non vi sia la necessità di utilizzarla nell'immediato si deve passare alla scelta del sistema di accumulo più adatto alla sua conservazione, in base al tipo di energia da accumulare. Come descritto nel capitolo uno, per ogni tipologia di energia da accumulare sono diverse e soluzioni tecnologiche che lo permettono. In questa fase della scelta hanno rilevante importanza le caratteristiche che sono richieste dall'utilizzatore finale, in modo tale da poter operare la scelta più adatta tramite l'analisi parametrica di ciascuna soluzione possibile.

Per una prima analisi dei sistemi di accumulo si fa riferimento a quanto visto nei capitoli precedenti dal punto di vista delle caratteristiche di ciascuna soluzione, richiamate in modo generale qui sotto:

- laddove sono necessarie grandi potenze i sistemi di accumulo di tipo meccanico sono i più adatti: sono soluzioni che necessitano di grandi volumi di stoccaggio e hanno efficienza medio/alta. Presentando però alcuni vincoli geografici e spesso, dove sono richieste grandi energie non vi è la concomitante presenza di grandi spazi naturali;
- nonostante rientrino nella famiglia dei sistemi di accumulo di energia meccanica, i volani presentano tempi di scarica molto veloci e un'alta efficienza a fronte di piccole capacità di archiviazione. Non sono quindi adatti agli usi degli altri componenti della stessa famiglia;
- tecnologie di accumulo di energia elettrica ed elettrochimica, sono sistemi di piccole dimensioni e quindi facilmente trasportabili e con un tempo di risposta praticamente immediato. D'altro canto presentano però una limitata capacità di archiviazione;
- le tecnologie Power to Power sono invece adatte a impieghi dove sono necessarie grandi quantità di energia, facilmente stoccabili in volumi contenuti visto l'utilizzo di gas attraverso processi di compressione, e per tempi molto lunghi;

- i sistemi di accumulo di energia termica hanno alta efficienza e sono adatti a vari scopi industriali e residenziali che implicano la necessità di riscaldamento o raffrescamento, e possono essere usati come veicolo per la produzione di energia elettrica.

Una volta definito il sistema di accumulo, l'ultimo passaggio consiste nel rendere disponibile l'energia conservata all'utilizzatore finale nel caso in cui le forme coincidano, o nella conversione nel caso in cui siano diverse.

3.3 Analisi della configurazione fonti-accumuli-utilizzi

Definito quindi l'insieme globale delle numerose possibilità tecnologiche a disposizione, il prossimo passo consiste nell'analizzare singolarmente i vari sistemi di accumulo e conversione in modo tale da avere un'idea chiara delle caratteristiche di ciascuno, per facilitare la scelta più adatta una volta che saranno richieste determinate specifiche.

Come espresso nel secondo capitolo, i parametri di analisi di un determinato sistema di accumulo sono molteplici. Per l'analisi operata in questo elaborato saranno presi in considerazione e analizzati, nei paragrafi seguenti, i sistemi costituenti il diagramma fonti-accumuli-utilizzi dal punto di vista di tre parametri, quali:

- limitazioni legate all'utilizzo del sistema in esame;
- rendimento del processo;
- costo del sistema.

3.3.1 Vincoli dei sistemi

Per poter operare un'analisi completa della fattibilità di una soluzione tecnologica devono essere presi in considerazione anche parametri operativi non esclusivamente volti all'analisi di aspetti prestazionali, ma sui quali potrebbero avere delle ripercussioni anche significative. Fanno parte di questa categoria parametri volti all'analisi di aspetti ambientali, condizioni geografiche, geologiche e climatiche.

Analizzando i vari sistemi a disposizione in letteratura si nota come la morfologia del territorio e le condizioni climatiche influiscano in modo significativo in alcuni di questi sistemi. Tra questi troviamo principalmente tecnologie che sfruttano energia rinnovabile come input, in quanto essendo fonti intermittenti non presentano sempre caratteristiche che permettano un funzionamento costante e ottimale. Ne sono un esempio il vento, la cui velocità da ripercussioni sull'energia ottenibile da un sistema eolico, o il sole, la cui posizione variabile e la diversa intensità energetica hanno ripercussioni sui sistemi solari e fotovoltaici, i quali richiedono determinati posizionamenti

per un efficiente conversione energetica.

Una seconda famiglia di sistemi interessati da questi parametri sono i sistemi di accumulo di energia meccanica, i quali, necessitando di ampi volumi di stoccaggio o operativi, richiedono specifiche caratteristiche morfologiche e geografiche del territorio in cui verranno collocati come ad esempio caverne o grotte, montagne, bacini artificiali o simili o altre.

Non vengono esclusi da questa analisi altre limitazioni o vincoli, quali complicazioni tecnologiche, costi di investimento elevato o possibili danni ambientali legati all'utilizzo o allo smaltimento dei sistemi stessi.

Nelle tabelle successive sono presentati i valori dei rendimenti per i vari sistemi di conversione e accumulo di energia presi in esame [20],[22].

SISTEMA DI CONVERSIONE	VINCOLI
Solare termico	- presenta vincoli riguardanti la radiazione incidente e il posizionamento del pannello captante
Solare termodinamico	- presenta vincoli riguardanti la radiazione incidente e il posizionamento del pannello captante
Solare fotovoltaico	- presenta vincoli riguardanti la radiazione incidente e il posizionamento del pannello captante
Biomassa	- necessita di ampi spazi per poter coltivare la biomassa e poi immagazzinarla. Inoltre l'uso come combustibile di alcuni tipi di biomasse gioca un ruolo fondamentale nell'aumento dell'inquinamento atmosferico
Eolico	- presenta vincoli a livello territoriale per via della necessità di caratteristiche ambientali favorevoli (velocità aria) oltre ad avere costi alti per piccole applicazioni
Geotermia	- produzione di odori sgradevoli per la zona circostante - impatto negativo dal punto di vista paesaggistico dovuto alla struttura di una centrale termica
Combustibili fossili	- produzione di agenti atmosferici inquinanti derivanti dal processo di produzione e utilizzo
Idroelettrico	- necessità di determinate caratteristiche geologiche o artificiali per il suo funzionamento: bacini idrici, dighe, ecc.

TIPOLOGIA DI STORAGE	VINCOLI
CAES	<ul style="list-style-type: none"> - vincoli legati alla necessità di un ampio volume di stoccaggio per immagazzinare l'aria compressa, di solito caverne sotterranee - alto costo di investimento
PHS	<ul style="list-style-type: none"> - necessita di caratteristiche geologiche tali da avere differenze elevate di altezza tra i bacini - restrizioni geografiche - alto investimento iniziale - alta impronta superficiale
Volano	<ul style="list-style-type: none"> - nessun vincolo geografico - nessun vincolo ambientale
LAES	<ul style="list-style-type: none"> - nessun vincolo geografico - nessun vincolo ambientale
PTES	<ul style="list-style-type: none"> - nessun vincolo ambientale - nessun vincolo geografico
Batterie	<ul style="list-style-type: none"> - posso avere alti costi - comportamento corrosivo o produzione di sostanze nocive - breve durata - dipendenza dalla temperatura
Celle a combustibile	<ul style="list-style-type: none"> - dopo il ciclo di vita utile della cella a combustibile deve essere implementata una strategia per riciclare e smaltire i metalli tossici che sono coinvolti nel processo di conversione
SMES	<ul style="list-style-type: none"> - eventuali problematiche ambientali dovute alle possibili conseguenze del forte campo magnetico
Idrogeno/Metano	<ul style="list-style-type: none"> - bassa efficienza - richiede componenti costosi - le prestazioni potrebbero non essere costanti nel tempo
Termici	<ul style="list-style-type: none"> - necessitano di isolamento termico con l'ambiente esterno - possono esserci costi elevati - tecnicamente complesso

3.3.2 Rendimento dei sistemi

Secondo parametro fondamentale per l'analisi della convenienza e dell'utilità nell'utilizzo di un determinato sistema in sostituzione ad un altro è il rendimento, ovvero ciò che si riesce ad ottenere alla fine di un particolare sistema di conversione o accumulo a partire da un certo valore di input energetico. Con le tecnologie a disposizione posso raggiungere determinati obiettivi utilizzando diverse soluzioni, ciascuna delle quali sarà poi da valutare dal punto di vista della convenienza o meno rispetto ad a seconda possibilità a seconda che il suo rendimento sia superiore o inferiore. Non ha senso utilizzare una determinata soluzione tecnologica quando con un'altra uguale in termini di output energetico posso ottenere lo stesso risultato ma con spese minori, a parità o quasi di caratteristiche di impianto.

Lo sviluppo tecnologico e la flessibilità di alcuni sistemi ci permette inoltre di poter combinare tra loro le varie soluzioni tecnologiche con lo scopo di ridurre le spese energetiche potendo sfruttare gli scarti energetici di un determinato sistema e utilizzarli come input in un secondo sistema riducendo quindi il valore degli input energetici della soluzione complessiva.

Nelle tabelle successive sono presentati i valori dei rendimenti per i vari sistemi di conversione e accumulo di energia presi in esame [18],[22]:

SISTEMA DI CONVERSIONE	RENDIMENTO
Solare termico	35-40%
Solare termodinamico	25-30%
Solare fotovoltaico	8-25%
Biomassa	Elettrico: 20-35% Termico: 70-80%
Eolico	30-50%
Turbina	Vapore: 40% Gas: 40%
ORC	Elettrico: 10-20% Termico: 70-90%
Cogenerazione	60%
Motore termico	30-50%
Motore a combustione	ciclo Otto: 15-30% ciclo Diesel: 25-35%

SISTEMA DI ACCUMULO	RENDIMENTO
PHS	65-85%
CAES	D: 40-60% A: 75-95%
Volano	75-95%
LAES	40-85%
PTES	40-60%
Batterie	Piombo acido: 70-90% Ioni di litio: 85-95% Sodio-Zolfo: 70-90%
Supercondensatori	85-95%
SMES	80-90%
PtG-Storage-PtL	Idrogeno: 30-50% Metano: 25-35%
Calore	Sensibile: 50-90% Latente: 75-90% Termochimico: 75-95%
PTES	70-80%

3.3.3 Costi dei sistemi

Ultimo parametro preso in considerazione in questa analisi è quello relativo ai costi. L'analisi risulta concettualmente simile a quella relativa al rendimento: non è conveniente sfruttare una tecnologia quando, a parità di caratteristiche di impianto ne esiste una più conveniente a livello economico. Il parametro riguardante i costi di un determinato sistema è spesso di fondamentale importanza in quanto alla base di una valutazione progettuale vi è sempre la valutazione del tempo necessario perchè un determinato investimento dia un ritorno economico: risulta poco conveniente la costruzione di un sistema che non ripaghi i vari costi di progettazione, costruzione, funzionamento e manutenzione entro il suo ciclo di vita utile.

In relazione ai sistemi di conversione si registra un calo progressivo negli anni del costo degli stessi, dovuto alla crescita delle tecnologie e allo sviluppo sempre su scala più larga delle stesse. Queste riduzioni dei costi sono dovute a:

- aumento delle economie di scala nella produzione;
- miglioramenti del processo di produzione che riducono il fabbisogno di materiali e manodopera, ottimizzando al contempo l'utilizzo del capitale;

- catene di approvvigionamento globali più competitive e sempre più ottimizzate per fornire prodotti su misura che si adattano meglio al mercato locale e alle condizioni delle risorse;
- miglioramenti tecnologici che aumentano i fattori di capacità e/o riducono i costi di installazione.
- sviluppatori di progetti esperti che hanno approcci standardizzati allo sviluppo del progetto e che hanno minimizzato i rischi di sviluppo del progetto;
- procedure O&M ottimizzate e utilizzo di dati in tempo reale per consentire una manutenzione preventiva migliorata, riducendo i costi di gestione e manutenzione e la perdita di generazione da interruzioni previste o impreviste;
- maggior supporto a livello politico e aumento della maturità tecnologica per lo sviluppo di tecnologie di generazione a partire da fonti rinnovabili.

Nelle tabelle successive sono presentati i valori dei costi per i vari sistemi di conversione[32] e accumulo di energia[18] presi in esame per kWh di energia prodotta:

SISTEMA DI CONVERSIONE	COSTO ENERGIA (\$/kWh)
Solare termico	0.14-0.16
Solare termodinamico	0.1-0.18
Solare fotovoltaico	0.06-0.1
Biomassa	0.07-0.1
Eolico	0.044-0.2
Geotermia	0.06-0.08
Turbina	A vapore: 0.07-0.09 A gas: 0.07-0.09
ORC	0.02-0.04

SISTEMA DI ACCUMULO	COSTO ENERGIA (\$/kWh)
PHS	5-100
CAES	D: 2-50 A: 40-80
Volano	1000-5000
LAES	260-530
PTES	60
Batterie	Piombo acido: 200-400 Ioni di litio: 600-2500 Sodio-Zolfo: 300-500
Supercondensatori	300-2000
SMES	10-100
PtG-Storage-PtL	Idrogeno: 1-10 Metano: 1-10
Termico	Sensibile: 0.1-20 Latente: 10-50 Termochimico: 8-100

3.4 Conclusioni

In questo capitolo è stato presentato un nuovo approccio per definire tutte le possibili configurazioni di sistema che collegano le fonti primarie di energia alle principali forme di energia richieste dagli utilizzatori, il quale mostra i vari collegamenti possibili costituiti da sistemi di conversione e di accumulo presenti in letteratura. Tali collegamenti rappresentano le possibili strade da percorrere per la soluzione di una determinata richiesta energetica. Sono stati quindi analizzati gli step da operare per scegliere un determinato percorso che colleghi una determinata fonte a una specifica forma finale. L'ultima parte del capitolo presenta l'analisi dei sistemi che compongono il diagramma dal punto di vista di tre parametri di analisi, quali vincoli operativi, rendimento e costi. La stessa analisi può comunque essere operata per i restanti parametri di prestazione.

Capitolo 4

ESEMPI APPLICATIVI DI UN DETERMINATO PROBLEMA ENERGETICO

In questo capitolo l'approccio presentato nel Capitolo 3 viene applicato per risolvere alcuni problemi specifici al fine di mostrare le potenzialità dell'approccio stesso, evidenziando anche la sua generalità di applicazione. In particolare viene dapprima trattato il problema di rendere disponibile all'utenza l'energia elettrica generata dalla fonte solare considerando le principali soluzioni di accumulo, con particolare attenzione all'efficienza complessiva, parametro molto importante nella valutazione di una soluzione tecnologica: efficienze molto basse comportano, di solito, soluzioni poco utilizzate in ambito applicativo.

L'approccio verrà successivamente applicato al problema di rendere disponibile all'utenza l'energia elettrica generata da una fonte dispacciabile come la biomassa, senza sistemi di accumulo. Le due configurazioni saranno quindi confrontate, sottolineando ciò che è importante trarre dai risultati ottenuti.

4.1 Utilizzo dell'energia solare per la produzione di energia elettrica

Supponiamo di avere a disposizione energia derivante dal sole per produrre come risultato finale energia elettrica. Tramite l'analisi della configurazione globale fonti-accumuli-utilizzi riusciamo a determinare la struttura che rappresenta le principali soluzioni tecnologiche utilizzabili per tale scopo, rappresentate nella seguente figura.

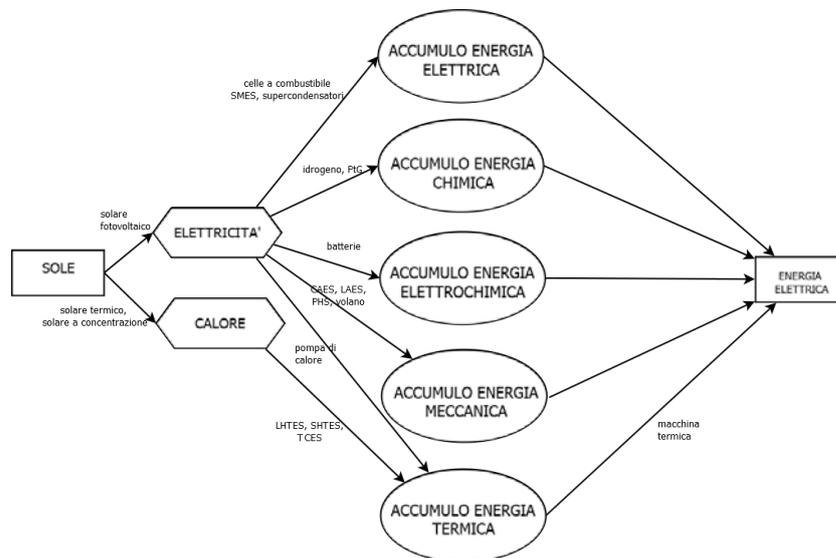


Figura 4.1: Parte del diagramma fonti-accumuli-utilizzi preso in esame

Tra le varie soluzioni percorribili consideriamo le seguenti:

- la prima è costituita da un sistema solare termico, il quale trasforma l'energia solare in energia termica, accumulata in su serbatoio termico e poi convertita tramite macchina termica in energia elettrica;
- la seconda converte l'energia solare in energia elettrica tramite sistema solare fotovoltaico; tale energia viene immagazzinata sotto forma di calore per l'azione di una pompa di calore e poi riconvertita in elettricità tramite una macchina termica;
- la terza prevede la conversione di energia solare in energia elettrica tramite solare fotovoltaico con accumulo per mezzo di batterie;
- la quarta, sempre a partire dall'energia solare convertita tramite solare fotovoltaico, accumula energia sotto forma di idrogeno tramite elettrolizzatore per poi riconvertito per mezzo di celle a combustibile;
- la quinta è costituita da un sistema solare termico a concentrazione, il quale trasforma l'energia solare in energia termica, accumulata in su serbatoio termico e poi convertita tramite macchina termica in energia elettrica;
- l'ultima prevede la conversione tramite solare fotovoltaico e l'accumulo meccanico tramite sistema CAES.

4.1.1 Configurazioni possibili

Le soluzioni prese in considerazione vengono analizzate ora dal punto di vista delle principali equazioni caratteristiche per il calcolo del rendimento dei singoli sistemi che le compongono.

Solare termico+accumulo termico+macchina termica

I sistemi di conversione di questo sistema sono costituiti da un collettore solare termico, la cui efficienza è data dalla seguente equazione:

$$\eta_{\text{sol}} = \eta_0 - \frac{a_1(T_m - T_a)}{G} - \frac{a_2(T_m - T_a)^2}{G} \quad (4.1)$$

dove:

- η_0 è l'efficienza a temperatura ridotta nulla;
- a_1 e a_2 sono coefficienti di perdita di calore;
- T_m è la temperatura media del fluido termovettore;
- T_a è la temperatura ambientale.

e da una macchina termica, la cui efficienza è data da:

$$\eta_{\text{MT}} = \frac{L_{\text{MT}}}{Q_{\text{MT}}} \quad (4.2)$$

dove L e Q rappresentano rispettivamente l'energia elettrica ceduta dalla macchina e il calore assorbito dalla stessa.

Il rendimento del sistema di accumulo è in dipendenza della temperatura e può essere calcolato in due modi:

$$\eta_{\text{acc}} = \frac{Q_{\text{ex}}}{Q_{\text{in}}} \quad (4.3)$$

$$\eta_{\text{acc}} = \frac{mc(T - T_0)}{mc(T_{\text{max}} - T_0)} \quad (4.4)$$

dove:

- Q_{ex} è il calore rilasciato dal sistema di accumulo;
- Q_{in} è il calore entrante nel sistema di accumulo;
- mc è la capacità termica totale del fluido di accumulo;
- T e T_0 sono le temperature massima e minima dell'accumulo durante il processo di scarica;
- T_{max} è la temperatura massima al termine del processo di carica.

Il rendimento del sistema nel suo complesso è dato quindi da:

$$\eta_{\text{TOT}} = \eta_{\text{sol}} * \eta_{\text{acc}} * \eta_{\text{MT}} \quad (4.5)$$

dove:

- η_{acc} è il rendimento dell'accumulo termico;
- η_{MT} è il rendimento della macchina termica;
- η_{sol} è il rendimento del sistema solare termico.

Solare fotovoltaico+pompa di calore+accumulo termico+macchina termica

I sistemi di conversione di questo sistema sono costituiti da un collettore solare fotovoltaico, la cui efficienza è data dalla seguente equazione, a partire dalla temperatura nominale della cella e dell'aria ambiente:

$$T_{op} = T_{amb} + (219 + 832 * k) \left[\frac{NOCT - 20}{800} \right] \quad (4.6)$$

$$\eta_{pannello} = \eta_{rif} * [1 - \beta * (T_{op} - T_{rif})] \quad (4.7)$$

$$\eta_{fot} = \eta_{pannello} * \eta_{bos} \quad (4.8)$$

dove:

- β = coefficiente di penalizzazione legato alla temperatura;
- T_{rif} = temperatura di riferimento del pannello;
- η_{rif} = efficienza di riferimento del pannello fotovoltaico;
- η_{bos} = fattore Balance of System;
- T_{op} = temperatura operativa della cella;
- T_{amb} = temperatura dell'aria ambiente;
- k = indice di serenità medio mensile;
- $NOCT$ = temperatura nominale di lavoro della cella.

da una pompa di calore, con efficienza:

$$COP = \frac{Q_{acc}}{L_{PdC}} \quad (4.9)$$

dove Q_{acc} è il calore ceduto all'accumulo e L_{PdC} è il lavoro svolto dalla pompa per cedere tale calore.

e da una macchina termica, la cui efficienza è data da:

$$\eta_{MT} = \frac{L_{MT}}{Q_{MT}} \quad (4.10)$$

dove L e Q rappresentano rispettivamente l'energia elettrica ceduta dalla macchina e il calore assorbito dalla stessa.

Il rendimento del sistema di accumulo è in dipendenza della temperatura e può essere calcolato in due modi:

$$\eta_{acc} = \frac{Q_{ex}}{Q_{in}} \quad (4.11)$$

$$\eta_{acc} = \frac{mc (T - T_0)}{mc (T_{max} - T_0)} \quad (4.12)$$

dove:

- Q_{ex} è il calore rilasciato dal sistema di accumulo;
- Q_{in} è il calore entrante nel sistema di accumulo;
- mc è la capacità termica totale del fluido di accumulo;
- T e T_0 sono le temperature massima e minima dell'accumulo durante il processo di scarica;
- T_{max} è la temperatura massima al termine del processo di carica.

Il rendimento del sistema nel suo complesso è dato quindi da:

$$\eta_{TOT} = \eta_{fot} * COP * \eta_{acc} * \eta_{MT} \quad (4.13)$$

dove:

- COP è il coefficiente di prestazione della pompa di calore;
- η_{acc} è il rendimento dell'accumulo termico;
- η_{MT} è il rendimento della macchina termica;
- η_{fot} è il rendimento del sistema fotovoltaico.

Solare fotovoltaico+batterie

I sistemi di conversione di questo sistema sono costituiti da un collettore solare fotovoltaico, la cui efficienza è data dalla seguente equazione, a partire dalla temperatura nominale della cella e dell'aria ambiente:

$$T_{op} = T_{amb} + (219 + 832 * k) \left[\frac{NOCT - 20}{800} \right] \quad (4.14)$$

$$\eta_{\text{pannello}} = \eta_{\text{rif}} * [1 - \beta * (T_{\text{op}} - T_{\text{rif}})] \quad (4.15)$$

$$\eta_{\text{fot}} = \eta_{\text{pannello}} * \eta_{\text{bos}} \quad (4.16)$$

dove:

- β = coefficiente di penalizzazione legato alla temperatura;
- T_{rif} = temperatura di riferimento del pannello;
- η_{rif} = efficienza di riferimento del pannello fotovoltaico;
- η_{bos} = fattore Balance of System;
- T_{op} = temperatura operativa della cella;
- T_{amb} = temperatura dell'aria ambiente;
- k = indice di serenità medio mensile;
- NOCT = temperatura nominale di lavoro della cella.

e da una o più batterie, la cui efficienza singola è data da:

$$\eta_{\text{batt}} = \eta_{\text{carica}} * \eta_{\text{scarica}} \quad (4.17)$$

dove:

$$\eta_{\text{carica}} = \frac{E_{\text{int}}}{E_{\text{mors (in)}}} \quad (4.18)$$

$$\eta_{\text{scarica}} = \frac{E_{\text{mors (out)}}}{E_{\text{int}}} \quad (4.19)$$

Il rendimento del sistema nel suo complesso è dato quindi da:

$$\eta_{\text{TOT}} = \eta_{\text{fot}} * \eta_{\text{batt}} \quad (4.20)$$

Solare fotovoltaico+elettrolizzatore+accumulo di idrogeno+celle a combustibile

Il sistema analizzato in questo paragrafo prevede la produzione di energia elettrica tramite lo sfruttamento dell'energia solare, utilizzando come vettore di accumulo l'idrogeno prodotto tramite impianto solare fotovoltaico e

elettrolizzatore, riconvertito poi tramite l'utilizzo di celle a combustibile. I sistemi di conversione di questo sistema sono costituiti in primis da un collettore solare fotovoltaico, la cui efficienza è data dalla seguente equazione, a partire dalla temperatura nominale della cella e dell'aria ambiente:

$$T_{op} = T_{amb} + (219 + 832 * k) \left[\frac{NOCT - 20}{800} \right] \quad (4.21)$$

$$\eta_{pannello} = \eta_{rif} * [1 - \beta * (T_{op} - T_{rif})] \quad (4.22)$$

$$\eta_{fot} = \eta_{pannello} * \eta_{bos} \quad (4.23)$$

dove:

- β = coefficiente di penalizzazione legato alla temperatura;
- T_{rif} = temperatura di riferimento del pannello;
- η_{rif} = efficienza di riferimento del pannello fotovoltaico;
- η_{bos} = fattore Balance of System;
- T_{op} = temperatura operativa della cella;
- T_{amb} = temperatura dell'aria ambiente;
- k = indice di serenità medio mensile;
- NOCT = temperatura nominale di lavoro della cella.

Per quanto riguarda l'elettrolizzatore invece l'efficienza è facilmente ricavabile come:

$$\eta_{el} = \frac{\text{energia prodotta}}{\text{energia consumata}} = \frac{\rho_{H_2} V_{H_2} LHV_{H_2}}{\text{potenza elettrica consumata} * \text{tempo}} \quad (4.24)$$

dove:

- ρ_{H_2} è la densità dell'idrogeno;
- V_{H_2} è il volume dell'idrogeno prodotto;
- LHV_{H_2} è il potere calorifico dell'idrogeno.

L'efficienza di una cella a combustibile è data da:

$$\eta_{FC} = \frac{\text{energia prodotta}}{\text{energia consumata}} = \frac{\text{potenza elettrica consumata} * \text{tempo}}{\rho_{H_2} V_{H_2} LHV_{H_2}} \quad (4.25)$$

dove:

- ρ_{H_2} è la densità dell'idrogeno consumato;
- V_{H_2} è il volume dell'idrogeno consumato;
- LHV_{H_2} è il potere calorifico dell'idrogeno.

L'efficienza del sistema complessivo sarà quindi data da:

$$\eta_{TOT} = \eta_{fot} * \eta_{el} * \eta_{FC} * \eta_{acc} \quad (4.26)$$

Solare a concentrazione+accumulo termico+macchina termica

I sistemi di conversione di questo sistema sono costituiti da un collettore solare termico a concentrazione, la cui efficienza è data da quella del ricevitore, descritta nelle seguenti equazioni:

$$\eta_{conc} = \frac{Q/A_{ric}}{C * I} \quad (4.27)$$

dove:

- Q è il calore assorbito dal ricevitore;
- A_{ric} è l'area del ricevitore;
- C è il rapporto geometrico di concentrazione;
- I è l'irraggiamento sul collettore.

Utilizzando l'equazione di Boltzmann possiamo esprimere tale rendimento in funzione delle temperature:

$$\eta_{conc} = \alpha - \sigma \epsilon \frac{(T_{ric}^4 - T_{amb}^4)}{C * I} \quad (4.28)$$

dove:

- α è l'assorbanza del ricevitore;
- σ è la costante di Stefan-Boltzmann;
- ϵ è l'emissività del ricevitore;
- T_{ric} e T_{amb} sono le temperature del ricevitore e dell'ambiente.

L'efficienza di una macchina termica è data da:

$$\eta_{MT} = \frac{L_{MT}}{Q_{MT}} \quad (4.29)$$

dove L e Q rappresentano rispettivamente l'energia elettrica ceduta dalla

macchina e il calore assorbito dalla stessa.

Il rendimento del sistema di accumulo è in dipendenza della temperatura e può essere calcolato in due modi:

$$\eta_{acc} = \frac{Q_{ex}}{Q_{in}} \quad (4.30)$$

$$\eta_{acc} = \frac{mc(T - T_0)}{mc(T_{max} - T_0)} \quad (4.31)$$

dove:

- Q_{ex} è il calore rilasciato dal sistema di accumulo;
- Q_{in} è il calore entrante nel sistema di accumulo;
- mc è la capacità termica totale del fluido di accumulo;
- T e T_0 sono le temperature massima e minima dell'accumulo durante il processo di scarica;
- T_{max} è la temperatura massima al termine del processo di carica.

Il rendimento del sistema nel suo complesso è dato quindi da:

$$\eta_{TOT} = \eta_{conc} * \eta_{acc} * \eta_{MT} \quad (4.32)$$

dove:

- η_{acc} è il rendimento dell'accumulo termico;
- η_{MT} è il rendimento della macchina termica;
- η_{conc} è il rendimento del sistema solare termico a concentrazione.

Solare fotovoltaico+CAES

I sistemi di conversione di questo sistema sono costituiti in primis da un collettore solare fotovoltaico, la cui efficienza è data dalla seguente equazione, a partire dalla temperatura nominale della cella e dell'aria ambiente:

$$T_{op} = T_{amb} + (219 + 832 * k) \left[\frac{NOCT - 20}{800} \right] \quad (4.33)$$

$$\eta_{pannello} = \eta_{rif} * [1 - \beta * (T_{op} - T_{rif})] \quad (4.34)$$

$$\eta_{fot} = \eta_{pannello} * \eta_{bos} \quad (4.35)$$

dove:

- β = coefficiente di penalizzazione legato alla temperatura;
- T_{rif} = temperatura di riferimento del pannello;
- η_{rif} = efficienza di riferimento del pannello fotovoltaico;
- η_{bos} = fattore Balance of System;
- T_{op} = temperatura operativa della cella;
- T_{amb} = temperatura dell'aria ambiente;
- k = indice di serenità medio mensile;
- NOCT = temperatura nominale di lavoro della cella.

Per quanto riguarda il sistema CAES, il rendimento di carica e scarica è dato da:

$$\eta_{\text{CAES}} = \frac{E_g - E_f * \eta_{\text{NG}}}{E_a} \quad (4.36)$$

oppure:

$$\eta_{\text{cs}} = CER * \left(1 - \frac{HR * \eta_{\text{NG}}}{3600}\right) \quad (4.37)$$

dove:

- E_g è l'energia generata;
- E_f è l'energia del combustibile;
- η_{NG} è il rendimento di conversione del combustibile;
- E_a è l'energia assorbita dal sistema.
- CER è il rapporto tra l'energia elettrica generata in fase di scarica quella assorbita per l'accumulo;
- HR è un indice utilizzato per valutare il consumo di combustibile necessario alla produzione di un Wh di energia elettrica.

Il rendimento del sistema complessivo è dato da:

$$\eta_{\text{tot}} = \eta_{\text{fot}} * \eta_{\text{CAES}} \quad (4.38)$$

4.1.2 Modelli delle configurazioni

I sistemi presi in considerazione sono fortemente variabili in funzione delle condizioni al contorno a cui sono soggetti e il loro funzionamento non risulta costante al variare dei parametri esterni. Per l'analisi svolta in questo capitolo, al fine di avere una prima valutazione, sono state fatte alcune ipotesi

semplificative allo scopo di semplificare i calcoli in modo tale da avere risultati utili, in prima approssimazione, per poterli confrontare tra loro.

Le ipotesi prese in considerazione per i vari sistemi sono le seguenti, mentre i calcoli sono stati svolti sfruttando le equazioni presentate nei paragrafi precedenti.

Solare termico

Un modello per definire il funzionamento del sistema solare termico richiede come input i dati tecnici del collettore solare e della radiazione solare e produce come output il valore del rendimento di conversione.

Per il solare termico vengono assunti i seguenti i valori di riferimento di un collettore piano: $\eta_0 = 0.752$, $a_1 = 3.7 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ e $a_2 = 0,0177 \text{ W/m}^2 \text{ K}^2$, mentre la temperatura media del fluido è pari a 40°C . Le misurazioni vengono eseguite a Roma in una giornata invernale di gennaio.

Per un collettore sottovuoto invece i valori assunti sono i seguenti: $\eta_0 = 0.568$, $a_1 = 1.24 \text{ W/m}^2 \text{ K}$ e $a_2 = 0,0038 \text{ W/m}^2 \text{ K}^2$, mentre la temperatura media del fluido è pari a 40°C .

I calcoli sono stati effettuati per una zona rappresentativa del Nord Europa tramite l'utilizzo dei dati ricavabili dal sito JRC (Joint Research Centre) European Commission^[30] e i risultati ottenuti sfruttando i due sistemi descritti sopra per i mesi di gennaio e agosto sono rappresentati nella figura 4.2.

Solare fotovoltaico

Un modello per definire il funzionamento del sistem solare fotovoltaico richiede come input i dati tecnici del collettore fotovoltaico e della radiazione solare e produce come output il valore del rendimento di conversione.

Per il solare fotovoltaico è ipotizzato l'impiego di pannelli fotovoltaici al silicio monocristallino per cui è possibile considerare: $\eta_{\text{rif}} = 0.14$, $\beta = 0,005 \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ e una potenza di picco di 0.22 kW . La temperatura di riferimento della cella è pari a 20°C , mentre la temperatura nominale di lavoro della cella è pari a 45°C . Le perdite legate all'inverter e alle connessioni elettriche sono stimate considerando un $\eta_{\text{bos}}=0.9$. Le misurazioni vengono eseguite per le stesse località e periodi dell'anno utilizzate per l'analisi del solare termico (figura 4.3).

Accumulo termico

Un modello per definire il funzionamento del sistema di accumulo termico richiede come input i valori delle temperature di funzionamneto (temperatura di stoccaggio e di carica-scarica) e produce come output il valore del rendimento di conversione.

Per il serbatoio di accumulo termico a calore sensibile viene supposta una temperatura di accumulo pari a 60°C , pari alla temperatura di fine carica, mentre le temperature di inizio e fine scarica risultano rispettivamente di

GENNAIO

AGOSTO

Time	ϵ	τ_s	$\eta_{collettore sottovuoto}$	$\eta_{medio piano}$	Time	ϵ	τ_s	$\eta_{collettore sottovuoto}$	$\eta_{collettore piano}$	$\eta_{medio sottovuoto}$	$\eta_{medio piano}$
09:37	111	0,1	0,0678	0,2124	06:07	73	16,5	0,1401		0,4772	0,5319
09:52	124	0,2	0,1215		06:22	101	16,7	0,2615			
10:07	136	0,4	0,1631		06:37	131	16,9	0,3339	0,0539		
10:22	147	0,5	0,1945		06:52	164	17,1	0,3827	0,1997		
10:37	156	0,7	0,2180		07:07	199	17,3	0,4167	0,3012		
10:52	164	0,8	0,2360		07:22	234	17,4	0,4399	0,3705		
11:07	170	0,9	0,2486		07:37	270	17,6	0,4581	0,4246		
11:22	176	1	0,2604		07:52	306	17,8	0,4719	0,4659		
11:37	180	1,1	0,2681		08:07	342	18	0,4829	0,4986		
11:52	182	1,1	0,2714		08:22	377	18,2	0,4915	0,5244		
12:07	184	1,2	0,2754		08:37	411	18,3	0,4982	0,5443		
12:22	184	1,2	0,2754		08:52	443	18,5	0,5039	0,5612		
12:37	182	1,2	0,2722		09:07	475	18,6	0,5085	0,5750		
12:52	180	1,1	0,2681		09:22	504	18,7	0,5122	0,5860		
13:07	176	1,1	0,2613		09:37	532	18,8	0,5154	0,5956		
13:22	170	1	0,2495		09:52	557	18,9	0,5180	0,6034		
13:37	164	0,9	0,2369		10:07	581	19	0,5203	0,6109		
13:52	156	0,9	0,2200		10:22	602	19,1	0,5222	0,6159		
14:07	147	0,8	0,1976		10:37	621	19,1	0,5236	0,6201		
14:22	136	0,7	0,1665		10:52	637	19,2	0,5249	0,6241		
14:37	124	0,6	0,1264		11:07	650	19,2	0,5258	0,6266		
14:52	111	0,5	0,0733		11:22	661	19,3	0,5267	0,6294		
					11:37	669	19,3	0,5272	0,6308		
					11:52	675	19,4	0,5278	0,6325		
					12:07	678	19,4	0,5279	0,6331		
					12:22	678	19,4	0,5279	0,6331		
					12:37	675	19,4	0,5278	0,6325		
					12:52	669	19,4	0,5274	0,6315		
					13:07	661	19,4	0,5269	0,6300		
					13:22	650	19,4	0,5262	0,6279		
					13:37	637	19,4	0,5254	0,6254		
					13:52	621	19,4	0,5243	0,6221		
					14:07	602	19,4	0,5229	0,6180		
					14:22	581	19,4	0,5213	0,6132		
					14:37	557	19,3	0,5190	0,6085		
					14:52	532	19,3	0,5167	0,5996		
					15:07	504	19,2	0,5136	0,5903		
					15:22	475	19,1	0,5099	0,5795		
					15:37	443	19	0,5054	0,5661		
					15:52	411	18,9	0,5002	0,5506		
					16:07	377	18,8	0,4937	0,5313		
					16:22	342	18,7	0,4857	0,5074		
					16:37	306	18,5	0,4751	0,4758		
					16:52	270	18,4	0,4622	0,4374		
					17:07	234	18,3	0,4454	0,3872		
					17:22	199	18,1	0,4224	0,3187		
					17:37	164	18	0,3904	0,2235		
					18:07	101	17,6	0,2741			

Figura 4.2: Rendimento del solare termico nei mesi di gennaio e agosto

50 °C e 20 °C.

Dati queste temperature di funzionamento il rendimento del sistema di accumulo calcolato attraverso l'equazione 4.4 risulta pari a: $\eta_{acc}=0.75$.

Per utilizzi alle temperature raggiungibili tramite l'utilizzo di un sistema solare a concentrazione si possono utilizzare accumuli termici a sali fusi o a materiali solidi^[34] in grado di raggiungere temperature elevate ed efficienze fino all'80-85%.

Macchina termica

Un modello per definire il funzionamento del sistema macchina termica richiede come input il valore del calore e lavoro scambiati tra le due sorgenti

GENNAIO

AGOSTO

Time	ϵ	τ_s	$\eta_{collettore\ fotovoltaico}$	$\eta_{medio\ collettore}$	Time	ϵ	τ_s	$\eta_{collettore\ fotovoltaico}$	$\eta_{medio\ collettore}$
08:37	18	-0,3	0,1040	0,1026	06:07	73	16,5	0,1187	0,1245
08:52	61	-0,2	0,1040		06:22	101	16,7	0,1225	
09:07	78	-0,1	0,1039		06:37	131	16,9	0,1247	
09:22	95	0	0,1039		06:52	164	17,1	0,1262	
09:37	111	0,1	0,1038		07:07	199	17,3	0,1260	
09:52	124	0,2	0,1038		07:22	234	17,4	0,1260	
10:07	136	0,4	0,1037		07:37	270	17,6	0,1258	
10:22	147	0,5	0,1036		07:52	306	17,8	0,1257	
10:37	156	0,7	0,1035		08:07	342	18	0,1255	
10:52	164	0,8	0,1034		08:22	377	18,2	0,1254	
11:07	170	0,9	0,1034		08:37	411	18,3	0,1253	
11:22	176	1	0,1033		08:52	443	18,5	0,1252	
11:37	180	1,1	0,1033		09:07	475	18,6	0,1251	
11:52	182	1,1	0,1033		09:22	504	18,7	0,1250	
12:07	184	1,2	0,1032		09:37	532	18,8	0,1250	
12:22	184	1,2	0,1032		09:52	557	18,9	0,1249	
12:37	182	1,2	0,1032		10:07	581	19	0,1248	
12:52	180	1,1	0,1033		10:22	602	19,1	0,1247	
13:07	176	1,1	0,1033		10:37	621	19,1	0,1247	
13:22	170	1	0,1033		10:52	637	19,2	0,1247	
13:37	164	0,9	0,1034		11:07	650	19,2	0,1247	
13:52	156	0,9	0,1034		11:22	661	19,3	0,1246	
14:07	147	0,8	0,1034		11:37	669	19,3	0,1246	
14:22	136	0,7	0,1035		11:52	675	19,4	0,1245	
14:37	124	0,6	0,1035		12:07	678	19,4	0,1245	
14:52	111	0,5	0,0993		12:22	678	19,4	0,1245	
15:07	95	0,5	0,0993		12:37	675	19,4	0,1245	
15:22	78	0,4	0,0950		12:52	669	19,4	0,1245	
15:37	61	0,4	0,0950		13:07	661	19,4	0,1245	
					13:22	650	19,4	0,1245	
					13:37	637	19,4	0,1245	
					13:52	621	19,4	0,1245	
					14:07	602	19,4	0,1245	
					14:22	581	19,4	0,1245	
					14:37	557	19,3	0,1246	
					14:52	532	19,3	0,1246	
					15:07	504	19,2	0,1247	
					15:22	475	19,1	0,1247	
					15:37	443	19	0,1248	
					15:52	411	18,9	0,1249	
					16:07	377	18,8	0,1250	
					16:22	342	18,7	0,1250	
					16:37	306	18,5	0,1252	
					16:52	270	18,4	0,1252	
					17:07	234	18,3	0,1253	
					17:22	199	18,1	0,1231	
					17:37	164	18	0,1216	
					18:07	101	17,6	0,1180	

Figura 4.3: Rendimento del solare fotovoltaico nei mesi di gennaio e agosto

di calore coinvolte e produce come output il valore del rendimento di conversione.

In letteratura sono presenti diverse tipologie di macchine termiche, ciascuna delle quali presenta specifiche caratteristiche e il cui valore di rendimento è influenzato principalmente dalle temperature delle sorgenti termiche a cui lavorano. In questa analisi viene considerata una macchina termica che lavora tra la temperatura dell'accumulo termico fissata a 60 °C e la temperatura dell'aria utilizzata per il calcolo dell'efficienza del solare termico e fotovoltaico, pari a 12 °C.

Il rendimento per una macchina ideale operante tra queste due temperature è pari al rendimento di Carnot tra le stesse temperature, espresse in Kelvin, per cui $\eta=1-(T_2/T_1)=85\%$, ma tale valore non è raggiungibile in pratica. Trattandosi soprattutto di un applicazione a bassa temperatura, utilizzando si stemi ORC per la micro generazione non si è in grado di raggiungere efficienze superiori al 10%.

Per quanto riguarda invece applicazioni a medie temperature, tra i 200 °C e 250 °C, e ad alte temperature, tra i 250 °C e i 500 °C, vi è la possibilità di utilizzare alcuni fluidi^[34] che permettono di raggiungere anche efficienze attorno al 30%.

	Potenza termica $\Phi_{H,HP out}$ (kW)			COP		
	T mandata 35°C	T mandata 45°C	T mandata 55°C	T mandata 35°C	T mandata 45°C	T mandata 55°C
-7	12,86	13,05	13,15	2,83	2,81	2,31
2	15,60	15,69	15,51	3,25	3,16	2,57
7	19,25	19,25	18,95	3,83	3,67	2,98
12	21,45	21,75	21,45	4,14	4,00	3,26

(a)

	Potenza termica $\Phi_{H,HP out}$ (kW)			COP		
	T mandata 35°C	T mandata 45°C	T mandata 55°C	T mandata 35°C	T mandata 45°C	T mandata 55°C
-7	15,92	16,50	17,07	2,89	2,80	2,34
2	19,67	20,14	20,60	3,33	3,14	2,59
7	24,47	24,78	25,29	3,95	3,64	2,98
12	27,37	28,18	28,49	4,32	3,99	3,21

(b)

Figura 4.4: Dati di potenza e COP di due diverse pompe di calore aria-acqua. Immagina presa da [31].

Pompa di calore

Un modello per definire il funzionamento del sistema pompa di calore richiede come input il valore del calore e lavoro scambiati tra le due sorgenti di calore coinvolte e produce come output il valore del rendimento di conversione.

Così come espresso per la macchina termica il calcolo dell'efficienza di una pompa di calore è fortemente legato alla variazione della temperatura delle sorgenti tra le quali si trova a lavorare. Sempre allo scopo di semplificare i calcoli per avere a disposizione valori confrontabili tra di loro sono state selezionate alcune soluzioni tecnologiche esistenti in commercio in grado di lavorare tra le sorgenti aria esterna e serbatoio di accumulo termico, rispettivamente alle temperature di 12 °C e 60 °C. Il rendimento per una pompa di calore operante tra le seguenti temperature è pari ai valori espresse nella figura 4.4.

Elettrolizzatore e celle a combustibile

Un modello per definire il funzionamento dei sistemi elettrolizzatore e cella a combustibile richiede come input il valore della potenza elettrica consumata e delle caratteristiche dell'idrogeno e produce come output il valore del rendimento di conversione.

Ciascuna tecnologia presenta diverse caratteristiche di funzionamento in base alle condizioni di contorno in cui si trova a lavorare. Essendo diverse le soluzioni tecnologiche presenti in letteratura e commercio, al fine di semplificare i calcoli vengono utilizzate due soluzioni tecnologiche esistenti, i cui dati di funzionamento sono espressi nelle rispettive tabelle dei dati tecnici. Consideriamo le due soluzioni tecnologiche, i cui dati tecnici sono rappresentati nella seguente immagine.

ELETTROLIZZATORE MARCA PIEL MODELLO 1.5

Dimensioni [cm]	94 x 54 x 150
Peso [kg]	260
Consumo acqua [lt/h]	0,8
Potenza elettrica assorbita [kW]	7,4
Alimentazione elettrica [V – Hz]	380 – 50/60
Produzione idrogeno [ST lt/h]	1.000
Produzione ossigeno [ST lt/h]	500
Attacchi linea distribuzione	3/8"
Purezza dell'idrogeno	99,50%
Temperatura ambiente [°C]	5-35
Ventilazione minima dell'ambiente [Nm ³ /h]	25

(a) *Elettrolizzatore*

CELLA A COMBUSTIBILE MARCA RELI ON MODELLO T-1000

Physical	Dimensions (w x d x h)	14" x 21.5" x 26" 35.6cm x 54.6cm x 66cm
	Weight	98 to 164 lbs / 44 to 74 kg
	Materials	19" stainless steel
Performance	Rated net power	0 to 1,200 Watts
	Rated current	0 to 50A @ 24VDC / 0 to 25A @ 48VDC
	DC voltage	24 or 48 VDC nominal
Fuel	Composition	Standard industrial grade hydrogen (99.95%)
	Supply pressure to unit	3.5 to 6 psig / 24 to 41 kPag
	Hydrogen Storage Capacity	0.24 bar to 0.41 bar
	Consumption	7.7 slpm @ 600 Watts; 16.9 slpm @ 1200 Watts
Operation	Ambient temperature	39°F to 119°F / 2°C to 46°C
	Relative humidity	0-95% non-condensing
	Altitude	-197 ft to 13,800 ft / -60m to 4205m
	Location	Indoors

(b) *Cella a combustibile*

Figura 4.5: Dati tecnici di un'elettrolizzatore e di una cella a combustibile

Utilizzando le equazioni 4.24 e 4.25, nelle condizioni standard, i due valori di efficienza risultano essere pari a 38.3% e 41.8%. Questi valori ovviamente non sono quelli reali, in quanto le due macchine non funzioneranno mai in condizioni standard, ma per una prima analisi, come in questo caso, possiamo utilizzarli o al massimo assumere dei valori leggermente inferiori.

Batterie

Un modello per definire il funzionamento del sistema batteria richiede come input il valore dell'energia di input, output e ai morsetti della batteria e produce come output il valore del rendimento di conversione.

Come visto nel capitolo 1 vi sono diverse tipologie di batterie di accumulo in letteratura e ciascuna differenzia dalle altre per specifiche caratteristiche. Al fine di semplificare l'analisi svolta viene utilizzato un valore di efficienza della batteria pari all'85%, valore medio tra quelli disponibili in commercio e definito dall'equazione 4.15.

Solare termico a concentrazione

Un modello per definire il funzionamento del sistema solare termico a concentrazione richiede come input i dati tecnici del collettore e della radiazione solare e produce come output il valore del rendimento di conversione.

Come visto dalle equazioni caratteristiche il rendimento del solare a concentrazione è fortemente legato alle temperature del ricevitore e dell'aria ambiente. Supponendo di avere un ricevitore con $\alpha=0.94$, $\epsilon=0.1$ e $C=30$, per una temperatura operativa di 400°C per le temperature e irradianze considerato per il Nord Europa, il rendimento del ricevitore oscilla attorno all'80-90%.

CAES

Un modello per definire il funzionamento del sistema richiede come input il valore dell'energia generata e assorbita e del combustibile utilizzato e produce come output il valore del rendimento di conversione.

Per il calcolo del rendimento di un sistema CAES entrano in gioco parecchi parametri di cui tenere conto. Al fine di ottenere un valore da poter confrontare con gli altri possiamo assumere valori di rendimento compresi tra il 40 e il 45%.

4.1.3 Risultati

Tramite l'utilizzo dei modelli presentati possiamo calcolare il rendimento delle soluzioni considerate e inserirli nella tabella successiva.

Per quanto riguarda i costi del sistema, avendo a disposizione i dati dei sistemi solare termico e solare fotovoltaico nelle condizioni espresse in precedenza, possiamo calcolarci la produzione di energia dei due sistemi e, tramite i valori dei rendimenti, la produzione a cascata di tutti i componenti presi in considerazione. A partire dai dati della figura 4.2 ho a disposizione l'irraggiamento totale su una superficie, supposta per comodità pari ad 1 m^2 , per ogni ora della giornata presa in considerazione.

Le formule per il calcolo della potenza termica [kW/m^2] e dell'energia termica [kWh/m^2] prodotte dal solare termico sono le seguenti:

$$P_{\text{th}} = \frac{G_{\text{tot}}}{1000} * \eta_{\text{sol}} \quad (4.39)$$

$$E_{\text{th}} = \frac{P_{\text{th}}}{\text{tempo}} \quad (4.40)$$

Analoghe sono le formule per il calcolo della potenza elettrica e dell'energia elettrica prodotte dal sistema solare fotovoltaico.

$$P_{el} = \frac{G_{tot}}{1000} * \eta_{fot} \quad (4.41)$$

$$E_{el} = \frac{P_{el}}{tempo} \quad (4.42)$$

Analizzando i risultati ottenuti per condizioni climatiche del Nord Europa, per quanto riguarda il solare termico, la sommatoria dell'energia prodotta per ogni ora da come risultato: $E_{th}=0.768$ kWh in gennaio e $E_{th}=12.2$ kWh ad agosto, mentre per il solare fotovoltaico otteniamo: $E_{el}=0.4$ kWh in gennaio e $E_{el}=2.7$ kWh ad agosto. Eseguendo lo stesso calcolo per il solare a concentrazione troviamo una produzione di: $E_{th}=2$ kWh in gennaio e $E_{th}=17.2$ kWh nel mese di agosto. Possiamo quindi calcolare la produzione di ogni componente dei sistemi presi in esame, e tramite i dati dei costi per kWh prodotto presenti nel capitolo 3 calcolare il costo complessivo di ciascun sistema e inserirli nella tabella a fine paragrafo.

I sistemi presi in esame, come previsto, presentano caratteristiche molto diverse tra di loro, dal punto di vista dei vincoli, del rendimento e dei costi.

Dal punto di vista dei vincoli, combinando tra loro le caratteristiche descritte nel paragrafo 3.3.1, possiamo notare che per i sistemi presi in esame:

- la soluzione che prevede l'utilizzo dei sistemi di accumulo di energia meccanica deve tenere in considerazione che i vincoli geografici sono molto limitanti, vista la necessità di caratteristiche geologiche particolari e non sempre a disposizione. Se il presupposto è l'utilizzo dei sistemi in esame per applicazioni residenziali e industriali di piccole o medie dimensioni, spesso la possibilità di avere a disposizione bacini idrici, caverne o simili non risulta concomitante con una densità di richiesta tale da giustificare l'investimento elevato, dovuta principalmente alla ricerca di un sito geografico appropriato;
- i sistemi di conversione dell'energia solare presi in esame sono fortemente influenzati dalle caratteristiche ambientali della zona in cui sono installati, in quanto variano la propria produzione in funzione di determinati parametri ambientali. Risultano con buon rendimento il solare termico (47% in estate) e a concentrazione (80-90%) per il ricevitore) per la produzione di calore, mentre per il fotovoltaico (10-12%) i valori di rendimento sono più bassi;
- altro vincolo legato ai sistemi di conversione dell'energia solare è legato alle temperature di funzionamento degli stessi e dei sistemi collegati, con ripercussioni evidenti sul rendimento;
- per i sistemi di conversione e accumulo di energia elettrochimica i vincoli principali riguardano le basse efficienze che si possono ottenere e la richiesta di componenti costosi, oltre alla necessità di prestare attenzione allo smaltimento di componenti non più utilizzabili in quanto pericolosi per l'ambiente;

- per le batterie vale quanto definito sopra, oltre al fatto che per la produzione di alte quantità di energia deve essere utilizzato un gran numero di componenti vista la bassa energia producibile da un singolo sistema;

Dal punto di vista del rendimento si può notare che:

- i primi due sistemi analizzati presentano un valore di rendimento basso dovuto alla presenza della macchina termica. In questo caso il fattore limitante riguarda la temperatura. Mentre i sistemi di conversione solare e fotovoltaica presentano valori di rendimento in linea con quanto ci si potrebbe attendere dalle caratteristiche ambientali, l'utilizzo di un sistema di accumulo a basse temperature limita fortemente il rendimento di una macchina termica rendendo tale soluzione sconsigliata in questo caso. Tali valori di rendimento risultano leggermente superiori nella stagione estiva (47% solare termico e 12% fotovoltaico) rispetto a quella invernale (21% solare termico e 10% fotovoltaico) per via delle condizioni climatiche più favorevoli per i sistemi di conversione dell'energia solare;

- per quanto riguarda la soluzione con batterie di accumulo il rendimento risulta superiore rispetto ad altre soluzioni valutate (11%), anche se in realtà l'energia prodotta da tale sistema di accumulo risulta inferiore per via delle caratteristiche del sistema stesso. Sono infatti necessarie numerosi componenti di memorizzazione per raggiungere le potenze prodotte dagli altri sistemi in esame;

- la soluzione che prevede l'utilizzo del sistema ad accumulo a idrogeno presenta anch'esso una bassa efficienza (2%) per via delle caratteristiche dei sistemi che lo compongono:

- il sistema che utilizza un sistema di conversione tramite solare a concentrazione risulta essere il più efficiente (18% in estate e 10% in inverno) in quanto, rispetto ad esempio ai primi due sistemi analizzati, il raggiungimento di temperature più elevate di accumulo permettono l'utilizzo di macchine termiche in grado di avere un'efficienza molto migliore rispetto alle altre;

- il sistema che comporta di accumulo di energia meccanica tramite CAES comporta un rendimento competitivo con le altre tecnologie (5%), visto anche l'alto rendimento dello stesso CAES.

Dal punto di vista dei costi:

- le tecnologie di conversione che utilizzano sistemi solari termici fotovoltaici risultano essere le più convenienti (55-75\$) dato che comprendono sistemi ben sviluppati e maturi a livello tecnologico e a livello economico, vista l'ampia diffusione e le ricerche svolte;

- le soluzioni comprendenti batterie sono ancora abbastanza costose (430-480\$) per il livello di energia in grado di produrre, così come i sistemi comprendenti elettrolizzatori e celle a combustibili, dove anche il rendimento risulta inferiore alle altre soluzioni esaminate. In questa ultima soluzione sono inoltre necessari componenti di contorno (compressori, sistemi di sicurezza) che tendono a far aumentare ulteriormente il costo del sistema

complessivo;

- i sistemi a concentrazione non risultano essere i più convenienti a livello economico (150-190\$), in quanto si tratta di una tecnologia non ancora largamente sviluppata e diffusa, ma visto il rendimento maggiore risultano comunque competitivi;

- sistemi di accumulo ad energia meccanica potrebbero risultare economicamente validi (57-65\$), se non fosse per il fatto che si deve tenere conto che la ricerca di un sito geologico adatto comporta un ulteriore costo elevato.

SISTEMA IN ESA- ME	RENDIMENTO	COSTO
Sistema di accumulo termico tramite solare e riconversione tramite macchina termica	estate:4% inverno:1.5%	60-75\$
Sistema solare fotovoltaico con accumulo termico per mezzo di una pompa di calore e riconversione tramite macchina termica	estate:3% inverno:1.8%	55-70\$
Sistema solare fotovoltaico con accumulo tramite ciclo di carica e di scarica di batterie	11%	430-480\$
Sistema ad accumulo di idrogeno prodotto tramite solare fotovoltaico e elettrolizzatore con riconversione per mezzo di celle a combustibile	2%	250-300\$
Sistema di accumulo termico tramite solare a concentrazione e riconversione tramite macchina termica	estate:18% inverno:10%	150-190\$
Sistema di accumulo di energia meccanica tramite solare fotovoltaico e CAES	5%	57-65\$

4.2 Utilizzo della biomassa per la produzione di energia elettrica

Supponiamo ora di avere a disposizione una certa quantità di biomassa e di dover produrre energia elettrica. In questo caso consideriamo la biomassa come già stoccata e disponibile, quindi non verranno presi in considerazione sistemi di accumulo intermedi.

L'unica soluzione possibile consiste nel bruciare biomassa all'interno di una centrale a biomassa per la produzione diretta di energia elettrica.

4.2.1 Configurazioni possibili

Le soluzioni prese in considerazione vengono analizzate ora dal punto di vista delle principali equazioni caratteristiche per il calcolo del rendimento dei singoli sistemi che le compongono.

Centrale a biomassa

Per il calcolo del rendimento della centrale si deve dapprima calcolare l'energia contenuta all'interno di un determinato volume di biomassa:

$$E_{\text{biom}} = PCS * m * x \quad (4.43)$$

dove:

- PCS è il potere calorifico superiore della biomassa bruciata;
- m è la massa di biomassa bruciata;
- x è un valore compreso tra 0 e 1 che tiene conto del contenuto idrico della biomassa.

Si deve inoltre tenere conto del calore speso per fare evaporare l'acqua e del calore perso nel vapore prodotto dalla combustione, il che ridurranno di un 20% circa la potenza prodotta.

Il rendimento della centrale a biomassa viene calcolato attraverso la seguente equazione:

$$\eta_{\text{biom}} = \eta_{\text{el}} * \eta_{\text{comb}} \quad (4.44)$$

dove:

- η_{el} è il rendimento elettrico della centrale;
- η_{comb} è il rendimento della caldaia.

L'energia prodotta da una certa quantità di biomassa è quindi:

$$E_{\text{tot}} = E_{\text{biom}} * \eta_{\text{el}} * \eta_{\text{comb}} \quad (4.45)$$

4.2.2 Modelli delle configurazioni

Centrale a biomassa

Il modello di una centrale a biomassa produce come output il rendimento di conversione del sistema, definiti come input la tipologia di biomassa utilizzata e le sue caratteristiche specifiche (PCS, umidità), oltre al rendimento termico della caldaia.

L'energia prodotta da una centrale a biomassa è dipendente dalla tipologia di combustibile che viene utilizzato e dalla quantità. Essendo diverse le tipologie di biomassa utilizzabili come combustibile, saranno diversi anche i valori di energia prodotta. Supponiamo quindi di avere una centrale con rendimento di caldaia pari all'80% e con rendimento elettrico di circa il 30%.

4.2.3 Risultati

Come previsto, l'energia prodotta dalle diverse tipologie di biomasse risulta più o meno elevata a seconda delle caratteristiche della biomassa. Biomasse con potere calorifico elevato permette di produrre quantità di energia maggiore, così come biomasse con contenuto di umidità minore daranno una minor perdita di rendimento.

	Cippato	Pellet	Residuali
Quantità	1000 kg	1000 kg	1000 kg
PCI	12 MJ/kg	18 MJ/kg	17 MJ/kg
Energia biomassa	2.64 MWh	4 MWh	3.76 MWh
Energia totale	0.63 MWh	0.96 MWh	0.9 MWh
Rendimento	24%	24%	24%

Per quanto riguarda i costi del sistema preso in esame, i valori ottenuti si aggirano attorno ai 50-86\$. Si tratta di un costo concorrenziale con i sistemi presi in esame in precedenza, ma bisogna tenere presente che, come affermato all'inizio dell'analisi, la biomassa viene considerata come già coltivata e stoccata, per cui i costi sostenuti per averla a disposizione non vengono tenuti in considerazione. Il costo totale risulterebbe quindi maggiore.

4.3 Confronto tra le applicazioni esaminate

Nei paragrafi precedenti sono state presentate e analizzate due problematiche energetiche che richiedono la stessa produzione finale di energia a partire da due diverse fonti a disposizione. I parametri di valutazione si sono basati sul rendimento, sui costi e sui vincoli operativi dei sistemi coinvolti.

L'analisi eseguita ci mostra come la soddisfazione di una specifica richiesta energetica può essere eseguita tramite diverse soluzioni tecnologiche o catene di esse. La scelta della soluzione migliore risulta essere di fondamentale importanza in quanto le caratteristiche di ciascuna risultano essere parecchio diverse le une dalle altre. L'utilizzo della più efficiente sotto il punto di vista di un determinato parametro è di solito la scelta più utilizzata, ma tramite questa analisi si può valutare quanto sacrificare una caratteristica operativa allo scopo di migliorarne sensibilmente una seconda. Ad esempio, nel caso esaminato, la scelta della soluzione con accumulo termico a bassa temperatura e solare termico può essere valutata rispetto all'utilizzo di batterie, nonostante il rendimento sia inferiore, ma i costi nettamente vantaggiosi. Ragionamento analogo può essere fatto per i sistemi di accumulo di energia meccanica: gli alti costi di investimento per la ricerca di un sito appropriato possono essere presi in considerazione qualora le altre caratteristiche operative siano molto vantaggiose rispetto alle soluzioni concorrenti.

Per quanto riguarda le soluzioni esaminate, l'utilizzo di una fonte di energia rinnovabile, in questo caso quella proveniente dal sole, risulta essere fortemente influenzata dalle condizioni al contorno che, nonostante i sistemi di conversione possano essere maturi ed efficienti, comportano una produzione anche molto minore di quella che si potrebbe ottenere. Al contrario, fonti di energia dispacciabili sono molto più controllabili e la produzione ottenibile può essere gestita variando le condizioni di funzionamento, ma in questo caso non per cause esterne ma per scelte dell'utilizzatore.

Anche i sistemi di accumulo di energia sono risultati fortemente influenzati dalle condizioni al contorno. Nel caso dell'accumulo termico, ad esempio, variando la temperatura di esercizio da 60 °C a 300-400 °C, il rendimento è salito dal 4% al 18%, poichè possono essere sfruttate a pieno le caratteristiche dei sistemi circostanti (macchina termica nel caso esaminato).

4.4 Conclusioni

In questo capitolo sono stati presentate le principali soluzioni in grado di rispondere ad una richiesta di energia elettrica a partire dall'energia solare prima, e a partire dalla biomassa poi. Tali soluzioni sono stati scomposte nei vari sistemi che le compongono e per ciascuno di questi è stato definito un modello per il calcolo del rendimento, oltre a quello del sistema complessivo, attraverso il quale sono stati calcolati i costi dei sistemi complessivi sulla base di determinate condizioni al contorno. I risultati ottenuti sono stati confrontati tra di loro ed è emerso che a seconda delle caratteristiche operative la soluzione migliore non risulta essere sempre la stessa: sistemi di conversione che coinvolgono accumuli termici (18% di rendimento) sono più convenienti quando le temperature in gioco sono più elevate, mentre sistemi di accumulo a batterie (11% di rendimento) risultano migliori a temperature

più basse. Dal punto di vista economico risultano più convenienti sistemi che utilizzano tecnologie mature e diffuse, come solare fotovoltaico (55-70\$) e solare termico (60-75\$), rispetto ad altre che richiedono componenti costosi o aggiuntivi, come i sistemi per l'accumulo di idrogeno (250-300\$). Sistemi di accumulo di energia meccanica comportano vincoli molto restrittivi che ne limitano l'utilizzo in determinati siti geologici nonostante un rendimento paragonabile alle altre tecnologie (5%).

Sistemi di produzione di energia elettrica utilizzando biomassa già stoccata permettono la produzione di elevate quantità di energia (MWh) con costi non troppo superiori alle altre soluzioni esaminate. Inoltre il rendimento (24%) risente in modo molto minore delle condizioni al contorno del sistema.

Conclusioni

In questa tesi si è cercato di definire un nuovo approccio generale per la definizione di tutte le possibili configurazioni utilizzabili per rendere disponibile le fonti di energia primaria nelle forme e nei tempi richiesti dalle utenze tramite l'utilizzo di sistemi di accumulo in modo tale da poter separare, quando necessario, il momento della produzione da quello del consumo. L'utilizzo di sistemi di conversione e di accumulo energetico danno inoltre la possibilità di scegliere le forme di energie intermedie al fine di migliorare gli aspetti operativi, quali rendimento o costi, delle possibili soluzioni.

Sono stati presentati i principali sistemi di accumulo dell'energia dal punto di vista del funzionamento, delle caratteristiche principali e delle possibili ricerche future per il miglioramento degli stessi. E' stata eseguita un'analisi e rielaborazione degli indici di prestazione calcolati e trovati in letteratura, per classificare i sistemi di accumulo in relazione alle loro applicazioni. Successivamente è stata definita e analizzata la configurazione fonti-accumuli-utilizzi che permette di valutare le principali soluzioni tecnologiche in grado di collegare una determinata fonte di energia primaria ad una forma di energia richiesta da un ipotetico utilizzatore. Tale diagramma mostra come siano numerose e diverse tra di loro le soluzioni in grado di soddisfare la richiesta. La scelta del percorso migliore deve essere fatta sulla base di opportune condizioni, operative e non, definite dalle caratteristiche dei sistemi che ne fanno parte.

Nella seconda parte dell'elaborato è stato valutato uno specifico caso di studio allo scopo di dimostrare che la soluzione migliore tra quelle possibili, determinate sulla base del diagramma globale, dipende dallo specifico caso e non risulta necessariamente essere sempre la stessa se si cambiano i parametri di valutazione del sistema. Il caso studiato richiede la produzione di energia elettrica a partire dall'energia solare e da biomassa già stoccata. Sono state presentate le catene di sistemi principali in grado di rispondere a tale richiesta. Per ciascuna di essa sono stati definiti dei modelli per il calcolo del rendimento di ciascun componente e del sistema complessivo, attraverso i quali sono poi stati calcolati i costi dei sistemi stessi. I risultati sono poi stati raggruppati in tabella e analizzati.

Dal punto di vista del rendimento si è notato come la temperatura di esercizio dei vari sistemi sia un parametro fondamentale per la definizione del

più efficiente se la fonte a disposizione è il sole, così come le caratteristiche climatiche. Nei periodi dell'anno in cui le condizioni climatiche siano favorevoli, ovvero alto irraggiamento e temperature, il rendimento (47%) e la produzione dei sistemi di conversione dell'energia solare risultano maggiori. A basse temperature (accumulo a 60 °C) si è constatato come il sistema di accumulo a batterie sia più efficiente (11%) rispetto a sistemi che coinvolgono accumuli termici (3-4%), in quanto il rendimento di conversione dei sistemi che producono energia elettrica a partire da calore risulta inferiore al 10%, rendendo quello complessivo sconsigliato. Se si aumenta la temperatura del serbatoio termico (300-400 °C) si ha la possibilità di utilizzare macchine termiche con rendimento maggiore (25-30%) e far sì che tale sistema diventi quello più conveniente.

Dal punto di vista dei costi risultano migliori le soluzioni che contengono tecnologie mature e largamente diffuse come solare termico e fotovoltaico (55-75\$), anche se dal punto di vista del rendimento risultavano peggiori. Il fattore a sfavore di sistemi a batterie e accumulo di idrogeno è dato dalla richiesta di componenti molto costosi e nel secondo caso anche di ulteriori sistemi di controllo e di protezione. I sistemi di accumulo di energia meccanica presentano costi che sono fortemente legati alla ricerca del sito geologico adatto alle loro caratteristiche.

I vincoli risultano limitanti nel caso di sistemi di accumulo di energia meccanica, in quanto sono richieste determinate caratteristiche geografiche (alti dislivelli, bacini idrici, caverne) che spesso non si trovano a disposizione laddove vi sia un'elevata densità abitativa e vengano richieste elevate quantità di energia, tali da giustificare l'elevato costo economico di tali sistemi dovuto principalmente alla ricerca del sito adatto.

Per quanto riguarda la produzione di energia elettrica da biomasse, essendo tale fonte dispacciabile, i vincoli al contorno risultano meno elevati e il rendimento (24%) ottenibile può essere più facilmente previsto e controllato. Le potenze producibili sono molto più elevate a fronte di costi concorrenziali se non si tiene conto del lavoro di coltivazione e produzione della biomassa.

L'approccio utilizzato in questa tesi è risultato essere applicabile in modo valido per i casi analizzati. Allo stesso tempo presenta anche tutte le caratteristiche richieste per essere di validità generale e applicabile a problemi che comprendano un numero maggiore sia di fonti primarie di energia che di forme di energia da produrre. Per lo sviluppo in futuri lavori l'approccio potrebbe essere incluso in un algoritmo o altra forma di intelligenza artificiale che permetta di determinare il percorso (la configurazione) migliore, per rendere disponibile le fonti di energia primaria nelle forme e nei tempi richiesti dall'utenza. Tale strumento avrebbe le potenzialità di trovare soluzioni che la sola esperienza di un progettista, principalmente basata sulla consuetudine tecnica e sulle soluzioni esistenti, non sarebbe in grado di definire.

Bibliografia

- [1] Mukrimin Sevket Guney, Yalcin Tepe. "Classification and assessment of energy storage systems" *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 75. 2017;
- [2] Claudio Del Pero, Niccolò Aste, Halime Paksoy, Fariborz Haghighat, Fabrizio Leonforte. "Energy storage key performance indicators for building application". *Sustainable Cities and Society*, Volume 40. 2018;
- [3] Dimopoulos GG, Frangopoulos CA. "Optimization of energy systems based on evolutionary and social metaphors". *Energy* 2008;
- [4] Bouvy C, Lucas K. "Multicriterial optimisation of communal energy supply concepts". *Energ Convers Manage* 2007.
- [5] Lanyu Li, Pei Liu, Zheng Li, Xiaonan Wang. "A multi-objective optimization approach for selection of energy storage systems". *Computers & Chemical Engineering*, Volume 115, 2018;
- [6] Philip Voll, Carsten Klaffke, Maike Hennen, André Bardow. "Automated superstructure-based synthesis and optimization of distributed energy supply systems". 2012;
- [7] Philip Voll a, Matthias Lampe a, Gregor Wrobel b, André Bardowa. "Superstructure-free synthesis and optimization of distributed industrial energy supply systems". 2012;
- [8] J..A. Duffie, W.A. Beckman. *Solar engineering of thermal processes*. Wiley (1991);
- [9] E. Fabrizio. *Modelling of multi-energy systems in buildings* (2008);
- [10] E. Cardona, A. Piacentino, F. Cardona, *Matching economical, energetic and environmental benefits: An analysis for hybrid CHCP-heat pump systems*, *Energy Conversion and Management* (2006), Vol. 47 pp. 3530-3542;

- [11] M. Burer, K. Tanaka, D. Favrat, K. Yamada, Multi-criteria optimization of a district cogeneration plant integrating a solid oxide fuel cell–gas turbine combined cycle, heat pumps and chillers, *Energy* (2003), Vol. 28 pp. 497-518;
- [12] R. Ooka, K. Komamura, Optimal design method for building energy systems using genetic algorithms, *Building and Environment* (2009), Vol. 44 pp. 1538-1544;
- [13] İbrahim Dinçer, Marc A. Rosen, “Thermal Energy Storage: Systems and Applications, Second Edition”, John Wiley & Sons, 2010;
- [14] Johanna Gustavsson, “Energy Storage Technology Comparison - A knowledge guide to simplify selection of energy storage technology”. Bachelor of Science Thesis KTH School of Industrial Engineering and Management Energy Technology EGI. 2016;
- [15] Guruprasad Alva, Yaxue Lin, Guiyin Fang. ”An overview of thermal energy storage systems” *Energy*, Volume 144. 2018;
- [16] Guruprasad Alva, Yaxue Lin, Guiyin Fang. “An overview of thermal energy storage systems”. School of Physics, Nanjing University, Nanjing 210093, China;
- [17] Luisa F. Cabeza, Esther Galindo, Cristina Prieto, Camila Barreneche, A. Inés Fernández. ”Key performance indicators in thermal energy storage: Survey and assessment”. *Renewable Energy*, Volume 83. 2015;
- [18] A. B. Gallo, J. R. Simões-Moreira, H. K. M. Costa, M. M. Santos, E. Moutinho dos Santos. ”Energy storage in the energy transition context: A technology review”. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, Volume 65. 2016;
- [19] Luo, Xing, Jihong Wang, Mark Dooner, and Jonathan Clarke. 2015. “Overview of Current Development in Electrical Energy Storage Technologies and the Application Potential in Power System Operation.” *Applied Energy*. Elsevier Ltd;
- [20] T. Kousksou, P. Bruel, A. Jamil, T. El Rhafiki, Y. Zeraouli. ”Energy storage: Applications and challenges”. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, Volume 120, Part A. 2014;
- [21] S. Ould Amrouche, D. Rekioua, T. Rekioua, S. Bacha. ”Overview of energy storage in renewable energy systems”. *International Journal of Hydrogen Energy*, Volume 41. 2016;
- [22] Mathew Aneke, Meihong Wang. ”Energy storage technologies and real life applications – A state of the art review”. *Applied Energy*, Volume 179. 2016;

- [23] D. O. Akinyele, R. K. Rayudu. "Review of energy storage technologies for sustainable power networks". Sustainable Energy Technologies and Assessments, Volume 8. 2014;
- [24] "H. Ibrahim, A. Ilinca, J. Perron Energy storage systems - Characteristics and comparisons". Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 12, Issue 5. 2008;
- [25] Manuel Götz, Jonathan Lefebvre, Friedemann Mörs, Amy McDaniel Koch, Thomas Kolb. "Renewable Power-to-Gas: A technological and economic review". Renewable Energy, Volume 85. 2016;
- [26] Guido Francesco Frate, Marco Antonelli, Umberto Desideri. "A novel Pumped Thermal Electricity Storage (PTES) system with thermal integration". Applied Thermal Engineering, Volume 121. 2017;
- [27] Giuseppe Leo Guizzi, Michele Manno, Ludovica Maria Tolomei, Ruggero Maria Vitali. "Thermodynamic analysis of a liquid air energy storage system". Energy, Volume 93, Part 2. 2015;
- [28] Jacopo Vivian, Giovanni Manente, Andrea Lazzaretto. "A general framework to select working fluid and configuration of ORCs for low-to-medium temperature heat sources". Applied Energy, Volume 156. 2015;
- [29] J. P. Roy, M. K. Mishra, Ashok Misra. "Performance analysis of an Organic Rankine Cycle with superheating under different heat source temperature conditions". Applied Energy. 2011;
- [30] JRC (Joint Research Centre) European Commission. Available at: <http://re.jrc.ec.europa.eu/pvgis/apps4/pvest.php>;
- [31] Dati pompe di calore CLIVET: <https://www.clivet.com/documents>;
- [32] IRENA (2018), Renewable Power Generation Costs in 2017, International Renewable Energy Agency, Abu Dhabi;
- [33] U.S. Naval Research Laboratory (NRL). Available at: <https://midcdmz.nrel.gov/solpos/solpos.html>;
- [34] Riccardo Vescovo, Emma Spagnoli. "High Temperature ORC Systems". Energy Procedia, Volume 129, 2017;
- [35] Robert A. Huggins, "Energy Storage", Springer. 2010;
- [36] [ESA, 2015] <http://energystorage.org>;