

# POLITECNICO DI MILANO

Scuola di Ingegneria Industriale e dell'Informazione

Dipartimento di Energia

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Energetica



## Sistemi di Accumulo a Batteria per Applicazioni Domestiche: Clusterizzazione di Profili di Scambio Significativi e Caratterizzazione Sperimentale

*Relatore:* Prof. Marco MERLO

*Correlatore:* Ing. Matteo MONCECCHI

Tesi di Laurea Magistrale di:

Alessandro BORSELLI

Matricola 862786

Anno accademico 2017-2018



## Ringraziamenti

*Innanzitutto, ci tengo sentitamente a ringraziare il Prof. Marco Merlo, relatore di questa tesi, che mi ha dato la possibilità di approfondire una tematica interessante quali sono appunto i sistemi di accumulo a batteria, consentendomi anche una visione reale di tali dispositivi sul campo grazie all'attività di laboratorio. Lo ringrazio anche per avermi introdotto al mondo della cluster analysis, mai trattata in questi cinque anni, ma di notevole utilità in molteplici applicazioni pratiche.*

*Ringrazio poi Matteo che in questi mesi ha fatto molto più di ciò che era tenuto a fare, seguendomi con scrupolo e dedizione in tutte le attività previste dal lavoro di tesi e rimanendo a disposizione in qualunque momento per ogni mio dubbio, necessità o problemi (tanti) con il laboratorio. Grazie anche a Pietro che nei primi mesi di questo percorso mi ha introdotto al mondo dei sistemi di accumulo.*

*Passando ora all'ambito familiare, non certo secondo per importanza, ringrazio prima di tutto i miei genitori che mi hanno sempre sostenuto in tutti questi anni di studio e mi hanno sempre dato speranza e fatto vedere il lato positivo delle cose nei momenti in cui le difficoltà sembravano insormontabili. Li ringrazio per come mi hanno cresciuto e perché la persona che sono oggi è sicuramente merito loro.*

*Ringrazio mia Zia Silvana che per me è stata come una seconda mamma e ci ha aiutato nei periodi più difficili. Ringrazio tutti gli zii, in particolare Luigi, Luciana, Danilo, Emilio e Patrizia e mia cugina Silvia che mi sono sempre stati vicini non solo in occasione delle feste ma anche nei momenti di bisogno. Ringrazio anche mia nonna Diana che ha sempre potuto contare su di me nei suoi ultimi anni di vita e che mi ha sempre aspettato a braccia aperte. Ringrazio una persona speciale, che da quasi cinque anni è diventata parte della mia vita: grazie alla mia fidanzata Jessica per tutti i bei momenti passati insieme e per essermi stata vicina nel mio percorso di studi e scelte di vita. Grazie anche a Luca per i momenti di svago passati insieme e per le serate in piscina indispensabili a distrarsi un po' dallo studio.*

*Infine, vorrei ringraziare anche tutti i miei compagni che hanno condiviso con me questi anni al Politecnico. Grazie ai miei amici di laurea triennale Luca e Camilla, con cui ho avuto il piacere di condividere l'esperienza della prova finale e soprattutto con cui ho potuto rendere più leggere le lunghe giornate di lezione dei primi anni.*

*Grazie anche ai miei colleghi di laurea magistrale Luca, Marco e Francesco con cui ho potuto condividere le attività progettuali previste nei diversi corsi e che non si sono mai tirati indietro di fronte alle mie domande. E soprattutto grazie a Luca per le lunghe telefonate passate a prendere decisioni sui progetti e a confrontarci con milioni di dubbi sugli argomenti del prossimo esame. Ringrazio anche Alessio per aver condiviso con me le informazioni potenzialmente utili per entrambi e con cui in queste ultime settimane ho trovato conforto ai molti impegni imposti dalle varie scadenze.*



# Riassunto esteso

## *1. Introduzione e contestualizzazione del problema*

Il sistema elettrico nazionale attualmente è protagonista di un importante processo di transizione per effetto della crescente penetrazione di impianti da fonte rinnovabile non programmabile [1]. La non dispacciabilità di tali fonti che ne pregiudica la partecipazione al Mercato dei Servizi di Dispacciamento (MSD), l'assenza in questi impianti dell'inerzia tipica dei convenzionali generatori sincroni, e l'inversione dei flussi di potenza a livello della rete di trasmissione e distribuzione, sono alcuni dei problemi derivanti da questa transizione. La soluzione attualmente più promettente, su un orizzonte di breve-medio termine, è l'installazione di sistemi di accumulo [2]. Tra tutte le possibili tipologie, i sistemi di accumulo a batteria (BESS) stanno avendo la maggiore diffusione, anche in considerazione del loro utilizzo in altri settori quali la mobilità elettrica e i sistemi elettrici isolati (microgrid) [3].

Rimando nel contesto del sistema elettrico nazionale, due sono gli ambiti di utilizzo dei sistemi BESS [4]. Il primo considera le applicazioni "front of the meter", in cui un dispositivo lavora in modo integrato con la rete, rispondendo alle esigenze di quest'ultima. Regolazione di frequenza, spinning reserve e peak shaving ne sono alcuni esempi. Il secondo ambito rappresenta invece le applicazioni "behind the meter", ossia tutte quelle situazioni in cui l'utente finale dispone di un sistema di accumulo e ne fa uso per finalità di autoconsumo, così da massimizzare il proprio beneficio economico.

Benché le applicazioni siano molteplici, in letteratura vi è una carenza di profili di test, ossia profili espressi in termini di potenza scambiata e sviluppati per riprodurre il reale

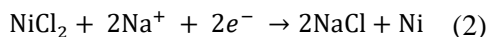
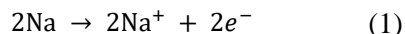
comportamento di un sistema BESS sul campo, in considerazione di una specifica applicazione. Alcuni studi [5,6] propongono dei profili per la regolazione primaria, la spinning reserve e il peak shaving, mentre meno ricca è la letteratura relativa alle applicazioni di autoconsumo. Tale lacuna rappresenta un fattore di forte limitazione allo sviluppo e alla diffusione di sistemi BESS, in quanto i produttori non dispongono di adeguate informazioni circa le reali esigenze sul campo, in base alle quali ottimizzare un nuovo dispositivo.

Questo studio si inserisce nella problematica appena descritta con l'obiettivo di fornire dei profili di test per applicazioni di autoconsumo domestico. A partire dai profili di carico di numerose famiglie, sono stati ricavati i corrispondenti profili giornalieri di batteria, così da poterli studiare per mezzo di una cluster analysis. Si sono così identificati quattro differenti gruppi di profili in modo tale che le caratteristiche di ciascun gruppo avessero un differente impatto sulle prestazioni di una batteria. Il risultato è stato dapprima validato tramite confronto con simulazioni numeriche, in seguito è stato messo a confronto con gli esiti di prove sperimentali condotte su un sistema di accumulo commerciale denominato Zhero [7].

### *1.1 La tecnologia sodio-cloruro di nichel*

Il sistema Zhero integra al suo interno una batteria sodio-cloruro di nichel, anche conosciuta in letteratura come "ZEBRA battery". Il funzionamento di tale tecnologia è accuratamente descritto in [8], in cui si mette in evidenza come, a differenza delle celle convenzionali, si tratta di sistemi che operano ad alta temperatura, circa 270 °C. Si riportano qui le semi reazioni che si sviluppano

rispettivamente all'anodo (1) e al catodo (2) in un processo di scarica:



Da un punto di vista strutturale, la singola cella si presenta di forma prismatica: al centro vi è il polo positivo, costituito da un conduttore realizzato in nichel e circondato da altro nichel metallico e dal cloruro di nichel ( $\text{NiCl}_2$ ) che si forma durante il processo di carica. Al completamento del comparto catodico si aggiunge un elettrolita secondario ( $\text{NaAlCl}_4$ ) che facilita il movimento degli ioni  $\text{Na}^+$  dall'elettrolita principale verso l'interno del catodo. Qui sono inseriti anche degli additivi metallici ( $\text{FeCl}_2$ ) che possono partecipare alle reazioni. Quanto finora descritto è racchiuso dalla  $\beta''$ -allumina, l'elettrolita ceramico a struttura cristallina che avvolge il comparto catodico secondo un caratteristico profilo tetralobato in sezione trasversale. Dopo uno strato in acciaio, si ha il comparto anodico costituito da sodio metallico che alla temperatura operativa è liquido [2,9-11].

I vantaggi di tale tecnologia dal punto di vista applicativo riguardano i seguenti aspetti: la sicurezza intrinseca tanto in fase operativa quanto in situazioni estreme, la riciclabilità di tutti i componenti, l'assenza di manutenzione nel corso della vita utile e soprattutto l'elevata potenza di picco erogata in scarica indipendentemente dal SoC. Di contro però vi sono importanti autoconsumi associati alla necessità del sistema di mantenersi in temperatura, che possono pregiudicare i vantaggi appena descritti [12,13].

### 1.2 Approccio matematico proposto

Al fine di identificare un numero significativo di profili di carica/scarica dei sistemi di accumulo, utili a caratterizzarne le prestazioni, si è fatto ricorso ad un database esterno generando tramite il software Load Profile

Generator [14] i profili di carico giornalieri di centoventisei famiglie per un anno intero. Da questi sono stati ricavati circa 44.000 profili di batteria. Volendo, come obiettivo del presente lavoro, procedere anche alla validazione sperimentale, è risultato necessario definire procedure utili a identificare, entro l'intero set di profili a disposizione, quelli più caratteristici, ovvero quelli che potessero meglio descrivere il contenuto informativo dell'intero set. Tale selezione è stata basata su algoritmi di clusterizzazione.

### 1.3 Cluster analysis

La clusterizzazione è un processo che suddivide un set di dati in un certo numero di gruppi, detti appunto cluster, in modo che gli elementi appartenenti ad uno stesso cluster abbiano caratteristiche comuni, manifestando contestualmente delle dissimilarità rispetto a quelli di altri cluster. La similarità non deriva da una scelta qualitativa, bensì è determinata da algoritmi che operano secondo proprie logiche. Uno di questi è il *k-means*, che rientra nella famiglia dei "partitioning methods", ossia algoritmi che sfruttano l'idea più semplice e intuitiva per realizzare una clusterizzazione: creare un numero assegnato di partizioni all'interno di un set di dati in modo che ogni elemento appartenga esclusivamente a una di queste. Il loro funzionamento si basa su una funzione obiettivo che coinvolge delle distanze euclidee e che deve essere ottimizzata per garantire similarità tra gli elementi appartenenti ad uno stesso cluster [15].

I campi di applicazione della cluster analysis sono molto vasti e in letteratura esistono già numerosi studi [16,17] che la applicano all'ambito dei sistemi elettrici e in particolare ai profili di carico.

## 2 Metodologia proposta

La metodologia adottata in questa analisi, e che sarà descritta nei paragrafi seguenti, è riassunta schematicamente in Fig. 1.

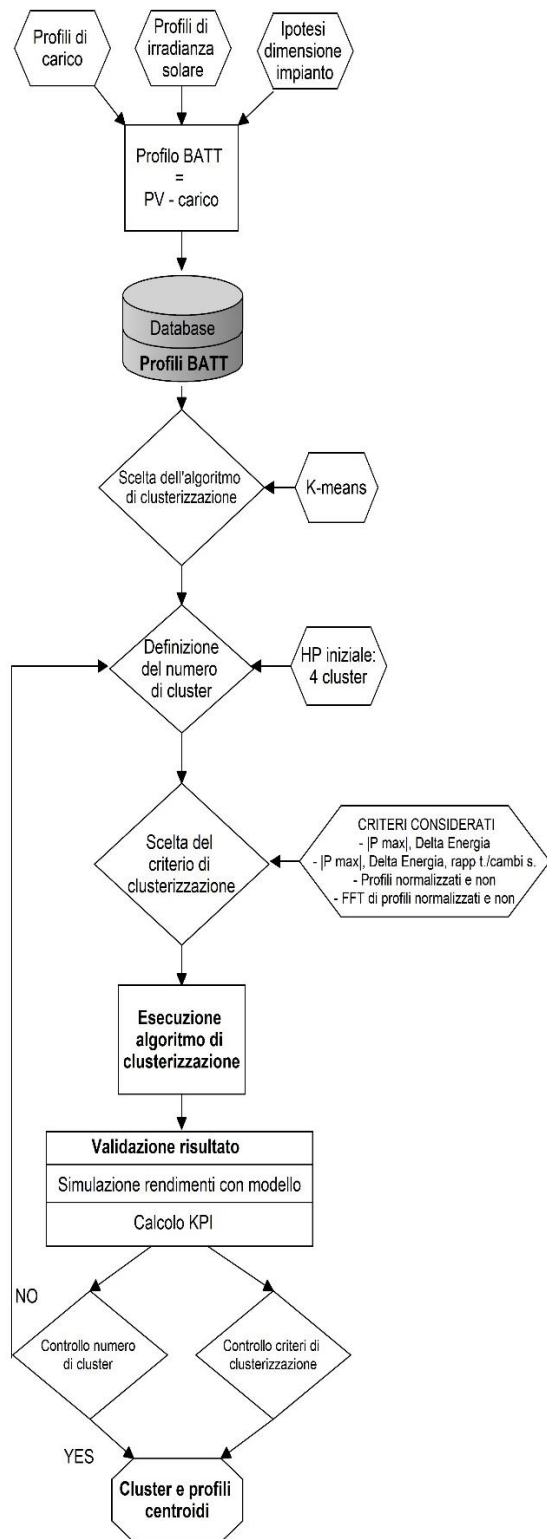


Fig. 1 Schema della metodologia adottata

### 2.1 Costruzione dei profili di batteria

Il primo requisito di questa analisi è disporre inizialmente di un certo numero di profili di carico giornalieri di altrettante famiglie, in

modo che il risultato tenga conto delle diverse realtà domestiche. Nel caso ideale considerato, ossia quello che non prevede alcun autoconsumo per gli ausiliari del sistema di accumulo né perdite, un profilo di batteria è univocamente determinato dai seguenti tre fattori:

1. Profilo di carico dell'utenza
2. Profilo di irradianza solare
3. Taglia e orientamento dell'impianto fotovoltaico

Trascurando momentaneamente il primo aspetto, dal momento che è quello a cui sarà data più attenzione all'interno della trattazione, gli altri due sono oggetto di ipotesi forti con l'obiettivo di eliminare la dipendenza del profilo di batteria da tutto ciò che concerne la produzione fotovoltaica. Bisogna infatti considerare che in letteratura non sono presenti studi svolti direttamente sui profili di batteria. Ai primi passi di una nuova analisi, a maggior ragione è ragionevole utilizzare assunzioni che semplifichino il problema, al fine di concentrarsi sulla metodologia e strutturare così un approccio di studio.

A tal proposito, per quanto concerne la produzione fotovoltaica si è scelto di lavorare con un profilo caratteristico di un giorno primaverile a Milano. Tale profilo è adottato come riferimento p.u. (per unit), andandone a variare di volta in volta il contenuto energetico, in modo che giornalmente l'energia in arrivo dal PV sia esattamente uguale a quella richiesta dall'utenza. Tale scelta è motivata dalla necessità di escludere gli effetti legati alla variabilità meteorologica e stagionale, riducendo così il numero di variabili aleatorie del problema.

### 2.2 Considerazioni preliminari alla cluster analysis

La prima scelta vincolata in ordine logico è relativa all'algoritmo da impiegare nella cluster analysis: si sceglie di utilizzare il *k - means*, caratterizzato dai cosiddetti

centroidi quali elementi rappresentativi dei diversi cluster. La scelta è imputabile al fatto che numerosi studi già pubblicati, pur considerando la clusterizzazione di profili di carico, fondano la loro trattazione su questo algoritmo. In un caso [16] gli autori definiscono il *k-means* come il più conosciuto e come uno dei più efficaci metodi di clusterizzazione. Lo stesso si ripete per un altro studio [18], in cui tale algoritmo è presentato come uno dei più consolidati. In un altro caso [19] si adduce come motivazione alla base dell'utilizzo del *k-means* il fatto che sia quello meglio conosciuto e soprattutto il più utilizzato per clusterizzare dati di carico.

Scelto l'algoritmo *k-means*, la decisione successiva riguarda il numero di cluster da ricercare: un aspetto negativo di questo algoritmo è appunto il fatto che il numero di cluster deve essere un dato di input, e non è definito automaticamente in base alle caratteristiche del dataset. Allo stato attuale dell'analisi, si assume di voler cercare quattro cluster diversi, sulla base della considerazione che quattro possa essere un buon compromesso tra l'esigenza di limitare il numero di profili standard da testare in laboratorio, e la necessità di rispecchiare comunque la diversificazione dei profili reali. Eventuali considerazioni in merito a tale scelta saranno fatte in sede di validazione del risultato.

Dopo aver constatato che parametri di riscontro pratico quali il numero di componenti di ogni famiglia e il tipo di giorno della settimana (feriale, sabato o festivo) non sono indicatori adatti per classificare i profili in analisi, è bene definire alcuni criteri rispetto a cui effettuare la clusterizzazione: clusterizzare direttamente il profilo, o elaborarlo preventivamente, può avere importanti effetti sul risultato ottenuto. La scelta dei criteri di clusterizzazione verte su due approcci diversi. In primo luogo, si utilizza una descrizione dei profili in termini di indici sintetici. Da questo punto di vista si avranno le seguenti clusterizzazioni, ricordando che i

vettori contenenti una stessa grandezza per tutti i profili devono essere sempre normalizzati per il rispettivo valore di modulo massimo. Tale scelta è dovuta esclusivamente al modus operandi dell'algoritmo.

- Clusterizzazione 1D in massima potenza giornaliera in modulo.
- Clusterizzazione 1D su massima variazione di contenuto energetico della batteria (la differenza tra il massimo e il minimo assoluti della curva che rappresenta l'energia cumulata della batteria in funzione del tempo), per semplicità "ΔEnergia".
- Clusterizzazione 2D in entrambi i parametri di cui sopra.
- Clusterizzazione 3D aggiungendo ai parametri precedenti anche il rapporto tra il tempo di carica della batteria e quello di scarica oppure il numero di cambi di segno della corrente.

In secondo luogo, si eseguono clusterizzazioni volte a valutare il profilo in tutta la sua evoluzione, espresso nel dominio del tempo oppure in quello delle frequenze. In quest'ultimo caso si ricorre alla trasformata discreta di Fourier (FFT), che manda in input alla clusterizzazione parte reale e immaginaria dei numeri complessi rappresentativi delle diverse armoniche. In entrambi i casi si farà riferimento sia ai profili di batteria tali e quali, sia a quelli normalizzati per la massima potenza giornaliera in modulo. Secondo [16] infatti, l'utilizzo di dati normalizzati consente alla clusterizzazione di focalizzarsi sul trend caratteristico di ciascun profilo a prescindere dai suoi valori assoluti; al contrario il profilo tale e quale richiede la valutazione di entrambi gli aspetti, privilegiando di conseguenza i valori assoluti di potenza.

La clusterizzazione è eseguita sfruttando la function Matlab *k-means*. L'unico aspetto da evidenziare è che i centroidi in output all'algoritmo non sono elementi del dataset



iniziale. Volendo invece individuare all'interno di ogni cluster quale sia il profilo reale più rappresentativo, si cerca l'elemento del dataset che minimizza la distanza euclidea dal centroide individuato dall'algoritmo. Nel proseguo della trattazione, questo è considerato come vero centroide del cluster.

### 2.3 Validazione del risultato

A questo punto è bene mettere in discussione il legame tra il risultato delle clusterizzazioni e gli obiettivi prefissati: non è detto a priori che a ciascun cluster corrisponda una specifica tipologia di utenti, i cui profili hanno un impatto molto simile sulle prestazioni di una batteria. Il *k-means* infatti lavora su distanze euclidee che potrebbero non avere nulla a che fare con gli effettivi rendimenti che caratterizzano i profili. Ciò che occorre effettuare è dunque un'adeguata validazione dei risultati ottenuti, al fine di dimostrare l'esistenza di un qualche legame tra questi ultimi e il rendimento di batteria caratteristico di ciascun profilo.

#### 2.3.1 Validazione numerica

La validazione del risultato ottenuto si basa su una procedura di carattere numerico. Il primo step prevede l'impiego di un modello elettrico di batteria sodio-cloruro di nichel con due rami RC [12], al fine di simulare ciascuno dei profili giornalieri e calcolare il rendimento elettrochimico che questi manifesterebbero su una batteria reale (quella specifica per cui il modello è stato sviluppato). Sarebbe poi sufficiente confrontare tali valori con i risultati della clusterizzazione. Il problema è che tale confronto deve essere ripetuto per i diversi criteri utilizzati, al fine di comprendere quale tra questi conduca effettivamente ad un risultato di utilità pratica. Per confrontare i diversi criteri e contestualmente verificare che la scelta del numero di cluster sia quella ottimale si ricorre alla definizione di un KPI (Key Performance Index).

Per quanto concerne le simulazioni con il modello sono state fatte tre scelte preliminari. In primo luogo, per il calcolo del rendimento è stata utilizzata la definizione approssimata (3), dopo aver verificato che l'errore commesso rispetto a una definizione rigorosa con  $\Delta\text{SoC}$  nullo fosse trascurabile.

$$\eta = \frac{|Energia_{erogata}| + \Delta\text{SoC} \cdot C_{nom}}{|Energia_{assorbita}|} \quad (3)$$

In secondo luogo, considerando che i profili sono espressi con un timestep di un minuto, si è ipotizzato di poter approssimare le capacità a circuiti aperti. In questo modo il modello si è semplificato in un generatore di tensione in serie a tre resistenze. Tale ipotesi è stata ritenuta accettabile in virtù del fatto che l'errore commesso sul calcolo del rendimento si attesta sullo 0,3 % per alcuni profili a campione selezionati in modo random.

In terzo luogo, dopo aver constatato che il SoC iniziale ha effetti sul rendimento complessivo, si è scelto di mantenere per tutti i profili il 60 % come valore di inizio simulazione. I profili che non rispettano i limiti fisici sulla massima e minima capacità della batteria sono stati scartati, mentre per quelli il cui profilo di SoC esce dall'intervallo di definizione dei vari parametri elettrici, è stato necessario ipotizzare che queste ultime quantità si mantenessero costanti.

Il passaggio successivo per una corretta validazione numerica è rappresentato dalla definizione (4) di un Key Performance Index (KPI) che valuta quanto un certo criterio di clusterizzazione, con numero di cluster assegnato, riesca effettivamente a creare una suddivisione dei profili di batteria che sia coerente con il loro rendimento. Tale indicatore deve quindi valutare lo scostamento tra i profili di un cluster e il rispettivo centroide in termini del corrispondente rendimento di batteria. Tra tutti i criteri utilizzati e tra i diversi numeri di cluster, il valore minimo di tale

indice indica la scelta che conduce ad un risultato coerente con gli obiettivi prefissati.

$$KPI = \sum_{k=1}^{n_{cluster}} \sum_{i=1}^{n_{profili \in K}} (\eta_{i,k} - \eta_{centroide,K})^2 \quad (4)$$

### 2.3.2 Confronto con dati sperimentali

Una volta validato il risultato per mezzo della procedura appena delineata, si vuole procedere cercando di trovare conferma di tali conclusioni negli esiti di alcune prove sperimentali. In particolare, si vuole osservare se effettivamente i quattro profili identificati come centroidi manifestano delle differenze in termini di rendimento nel momento in cui sono testati su un sistema di accumulo commerciale. L'esecuzione di prove sperimentali non è però immune da alcune considerazioni preliminari. Innanzi tutto, è opportuno scalare i quattro profili per un fattore di taglia definito, adottando i dati sperimentali ricavati in letteratura, come il rapporto tra la capacità della batteria su cui è stato sviluppato il modello (23,5 kWh) e quella del sistema Zhero (9,6 kWh). Inoltre, poiché lo Zhero integra al suo interno numerosi apparati ausiliari, è stato necessario quantificarne i rispettivi consumi tramite opportune prove sul sistema. Tale consumo è stato compensato andando a maggiore la produzione PV. Infine, è necessario dare una nuova definizione di rendimento (5), in modo da valutare quanto più

possibile il comportamento della sola batteria, per quanto il calcolo coinvolga quantità scambiate dall'intero sistema verso l'esterno.

$$\eta = \frac{E_{carico} + E_{autoconsumi}}{E_{PV} + E_{rete}} \Delta SoC = 0 \quad (5)$$

Tale definizione, per le motivazioni prima riportate, vede l'energia erogata al carico e quella assorbita dagli ausiliari come effetti utili, e li rapporta alla somma dei contributi energetici in ingresso al sistema (rete e impianto PV). In particolare,  $E_{PV}$  valuta l'energia in ingresso al netto delle perdite del sistema MPPT.

### 2.4 Analisi di sensitività

Conclude la descrizione della metodologia un'analisi di sensitività sul risultato ottenuto, al fine di dimostrare che una minima alterazione del dataset iniziale non sia causa di profonde modifiche nei risultati finali. La procedura da seguire prevede di suddividere l'intero dataset in due gruppi: il primo conterrà i profili di indice pari e il secondo quelli di indice dispari. In questo modo entrambe le partizioni mantengono una buona parte del contenuto informativo iniziale. Essendo i profili ordinati per famiglia di appartenenza, estrarre elementi in modo random comprometterebbe il contenuto informativo del dataset, rendendo inconsistente l'intera analisi di sensitività.

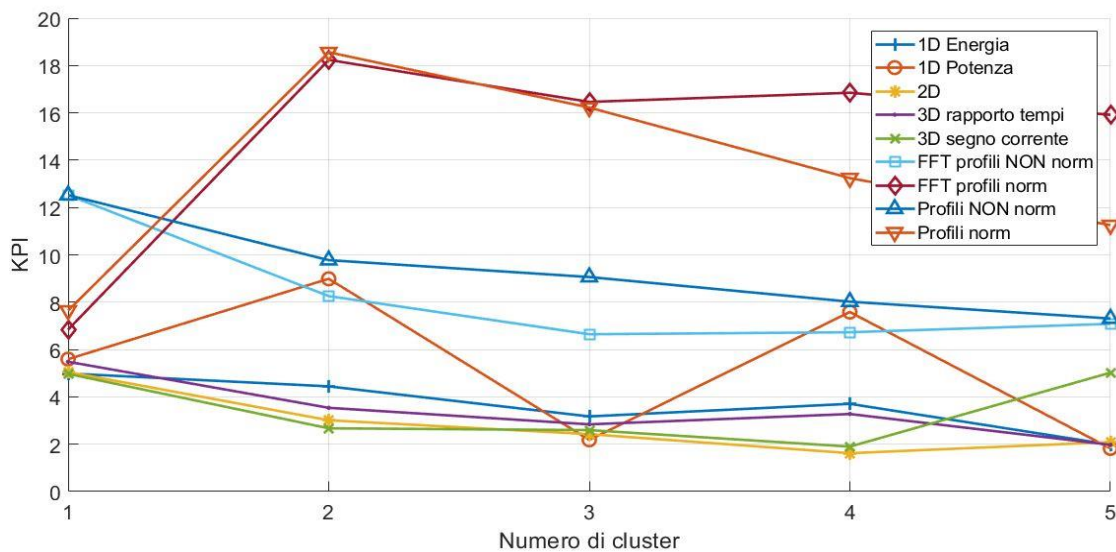


Fig. 2 Andamento del KPI al variare di criterio di clusterizzazione e numero di cluster

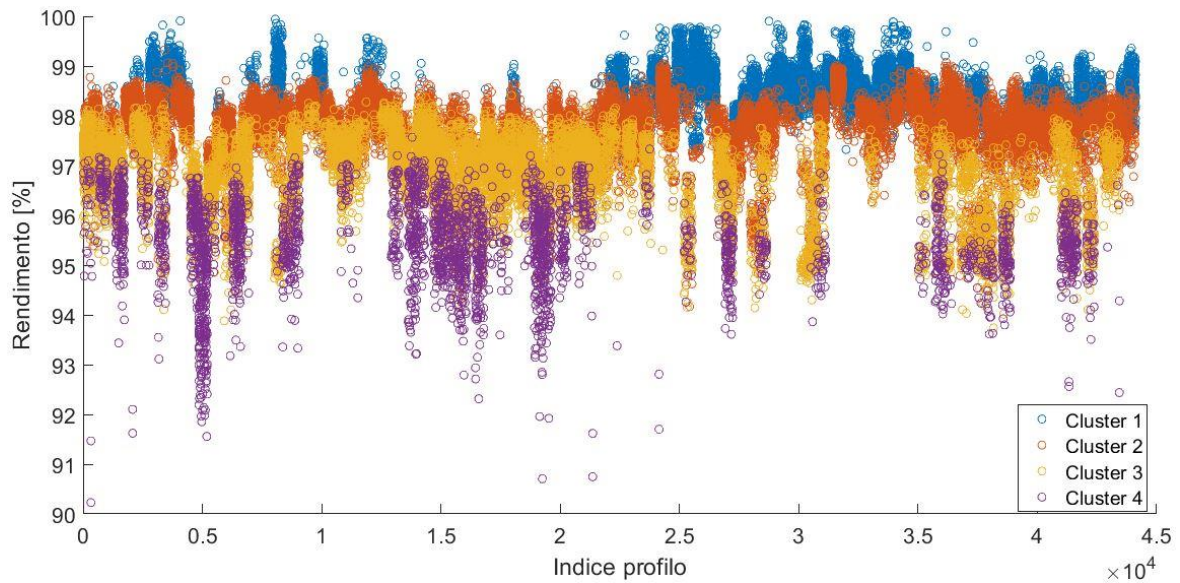


Fig. 3 Rendimento dei diversi profili in funzione del cluster di appartenenza. Clusterizzazione in  $P_{max}$  e  $\Delta Energia$

### 3 Risultati

La clusterizzazione è stata condotta in accordo con i criteri prima delineati, utilizzando l'algoritmo *k-meas* per suddividere il dataset iniziale in quattro cluster. È stata poi sviluppata la validazione numerica al fine di identificare

quale tra questi fosse in criterio ottimale in considerazione degli obiettivi prefissati, valutando contestualmente il numero ottimale di cluster. La Fig. 2 rappresenta l'esito di tale validazione, mostrando l'andamento del KPI in funzione del numero di cluster al variare del criterio considerato.

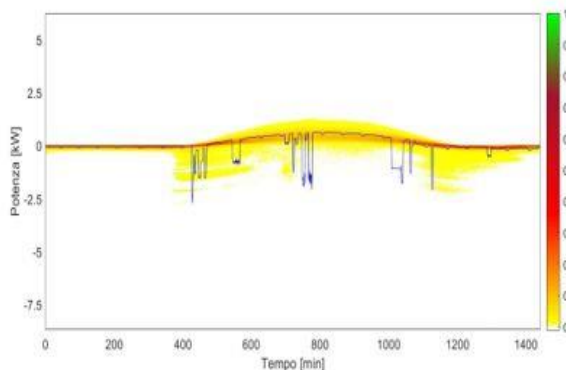


Figura 4.1 Clusterizzazione 2D – Cluster 1

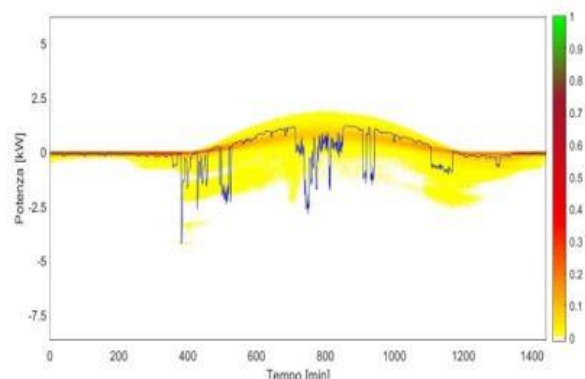


Figura 4.2 Clusterizzazione 2D – Cluster 2

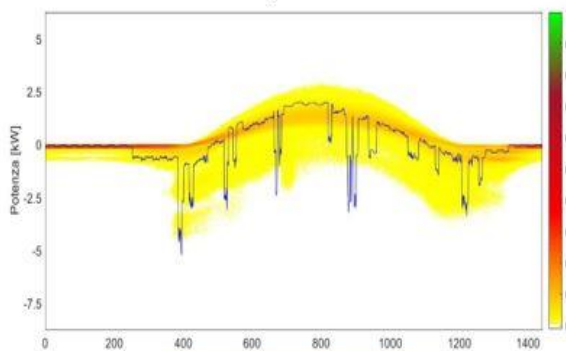


Figura 4.3 Clusterizzazione 2D – Cluster 3

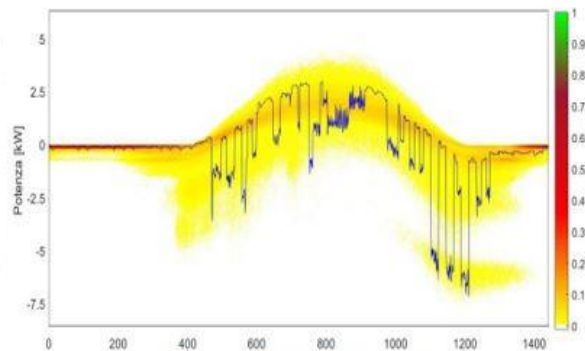


Figura 4.4 Clusterizzazione 2D – Cluster 4

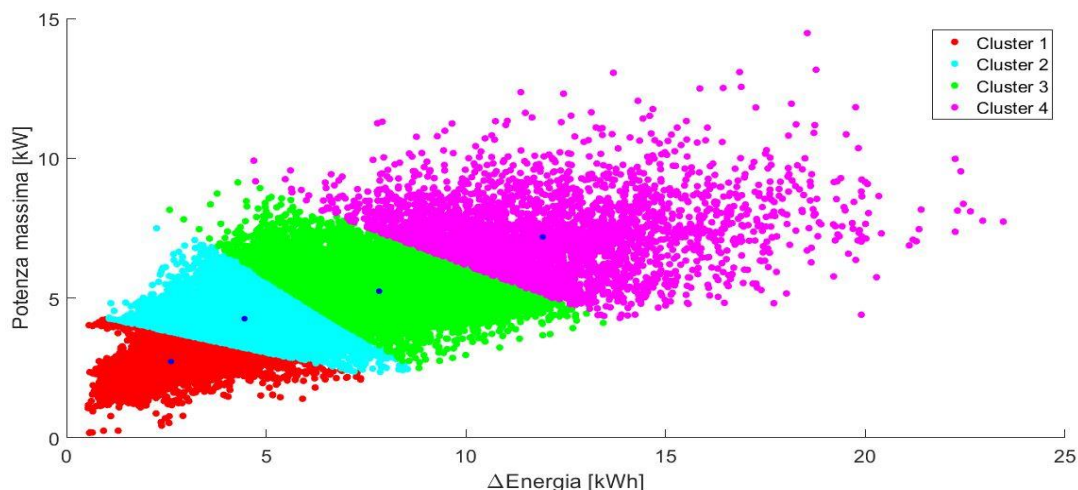


Fig. 5 Clusterizzazione 2D - potenza massima in modulo e variazione di contenuto energetico della batteria. Rappresentazione nel piano di definizione

Si può concludere che la soluzione ottimale è rappresentata dalla clusterizzazione, su quattro cluster, di profili espressi in termini di indici sintetici, quali la massima potenza in modulo e il  $\Delta$ Energia. Il risultato conferma la scelta fatta in termini di numero di cluster. Tuttavia, al contrario di quanto ci si potrebbe aspettare, è emerso che l'utilizzo di indici sintetici per descrivere il profilo di batteria conduce ad un risultato migliore rispetto a criteri più strutturati, che considerano invece l'intera evoluzione nel tempo o nelle frequenze. A posteriori, è possibile spiegare tale risultato considerando che la potenza massima gestita dalla batteria e la massima variazione del suo contenuto energetico sono di fatto le quantità che più impattano sul suo funzionamento in campo, tanto da essere proprio le grandezze considerate in fase di dimensionamento.

Una considerazione interessante riguarda il perché i criteri che considerano l'intero profilo hanno manifestato un sostanziale fallimento. La ragione potrebbe risiedere nel fatto che considerare l'intera evoluzione temporale di un profilo, e dunque dover gestire un problema in uno spazio a 1440 dimensioni, mette in gioco una serie di variabili che evidentemente non hanno alcuna influenza sul rendimento ma occultano invece quelle più rilevanti.

Probabilmente i criteri che considerano l'intero profilo o la sua FFT, al fine di esprimere le loro

potenzialità in un'analisi di questo tipo, necessiterebbero di un algoritmo di diverso tipo che non è stato nemmeno preso in considerazione in questa trattazione.

In considerazione di tali risultati, la Fig. 3 rappresenta il risultato della validazione per il criterio ottimale, mostrando il rendimento elettrochimico dei diversi profili classificati in base all'esito della clusterizzazione. Inoltre, le Fig. 4.1-4 propongono l'effettivo risultato della clusterizzazione, mostrando per ogni cluster il centroide e la frequenza relativa con cui i profili manifestano i diversi valori di potenza. Lo stesso risultato è presentato in Fig. 5 nello spazio di definizione del problema, mentre in Tab. 1 si descrivono le principali caratteristiche del profilo di carico corrispondente ai centroidi individuati.

Centroide	$P_{max}$ [W]	$P_{med}$ [W]	$E_{giornaliera}$ [kWh]
I	2760	220	5,08
II	4260	470	11,29
III	5250	700	16,78
IV	7200	1040	25,04

Tabella 1 Caratteristiche dei profili di carico corrispondenti ai centroidi

Lo step successivo richiederebbe di cercare un raffronto sperimentale dei risultati emersi. Questo però ha richiesto un'importante attività preliminare necessaria al set up del circuito di prova all'interno del laboratorio. Il

funzionamento di tale circuito è basato sull'operatività del National Instruments CompactRio controller, un sistema gestito tramite LabView su PC-desktop, che controlla e monitora i componenti acquisendone contestualmente i dati sul funzionamento. In particolare, adempie a specifiche funzioni:

- È in grado di modulare la potenza erogata da un alimentatore DC, di produzione Elektro-Automatik, che simula la produzione dell'impianto fotovoltaico.
- È in grado di modulare la potenza assorbita da un carico resistivo, di realizzazione Ingegneria Ricerca Sistemi (IRS), che consente di simulare il carico domestico.
- Monitora tutte le variabili elettriche scambiate dallo Zhero con la rete di distribuzione e quelle in uscita verso il carico, interfacciandosi in questo caso ad un quadro portatile di misura, anch'esso di realizzazione IRS.

Per quanto concerne invece le grandezze legate allo stato e al funzionamento del sistema Zhero, è stato necessario connettersi via USB direttamente al sistema e salvare i dati da questo acquisiti in tempo reale, servendosi di un software fornito dal costruttore.

La maggior parte delle attività preliminari sono state necessarie proprio per garantire una corretta comunicazione tra tutti i componenti

del circuito di prova: si è cercato di gestirne la maggior parte tramite il CompactRio, ma al tempo stesso lo Zhero ha richiesto un controllo a sé stante tramite l'apposito software.

Con il circuito di prova così costituito è stato possibile svolgere le attività sperimentali necessarie a trovare raffronto dei risultati teorici. A tal proposito in Fig. 6 si mettono a confronto i rendimenti elettrochimici caratteristici del centroide di ogni cluster, rispetto a quelli calcolati sperimentalmente. Da una visione complessiva emerge come il trend definito dalla cluster analysis sia globalmente rispettato, dunque le prove sperimentali hanno dato conferma del risultato teorico. Tuttavia, bisogna comunque ammettere che la differenza tra i rendimenti sperimentali non è tale da conferire un notevole margine di sicurezza a tale confronto. D'altro canto, nemmeno i rendimenti elettrochimici manifestano tra loro delle distinzioni marcate, dunque a livello sperimentale, con tutti i fattori di incertezza che possono condizionare la prova, è anche ragionevole che la differenza teorica abbia subito una riduzione.

A conclusione della presentazione dei risultati, si precisa che è stata condotta anche l'analisi di sensitività in accordo con la procedura. Questa ha consentito di trarre delle conclusioni coerenti con le aspettative in merito alla robustezza del risultato ottenuto.

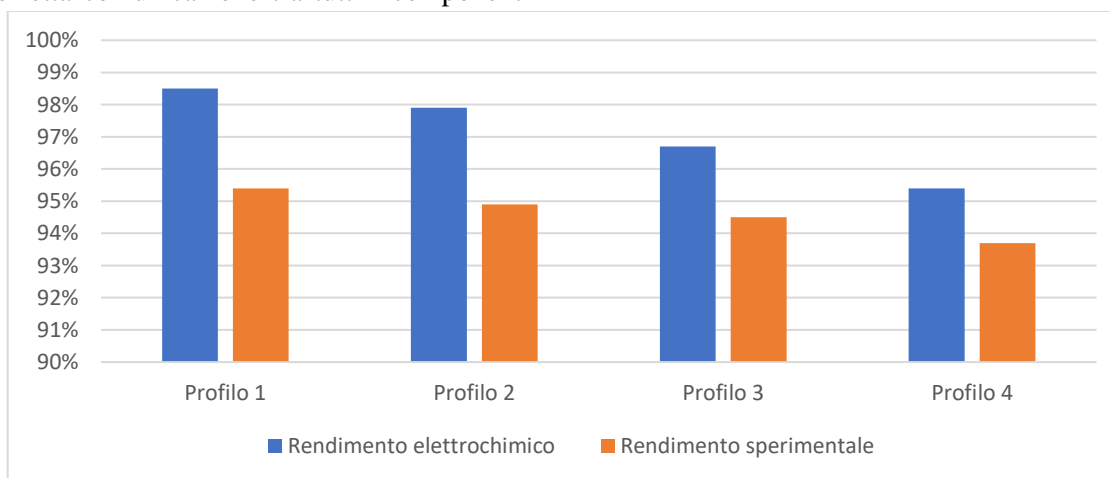


Fig. 6 Confronto grafico tra rendimento elettrochimico e rendimento sperimentale dei profili centroidi



#### 4 Conclusioni e prospettive di sviluppo

In questa trattazione è stata condotta una cluster analysis su profili giornalieri di batteria, allo scopo di identificare quattro profili rappresentativi dei diversi utenti domestici e tali da avere ciascuno un differente impatto sulle prestazioni della batteria: maggiori sono le esigenze del profilo in termini di potenza massima in modulo e  $\Delta$ Energia, minori saranno le prestazioni del sistema elettrochimico.

Tale risultato, oltre a fornire profili di test specifici per le applicazioni di autoconsumo, risulta di particolare utilità nello stimare il rendimento di un sistema elettrochimico per una specifica utenza. Testando il sistema sui quattro profili centroidi è possibile individuarne il rendimento caratteristico. Con l'ausilio della Fig. 7, conoscendo i profili tipici di una specifica utenza, è possibile

individuare il cluster più rappresentativo e stimare di conseguenza quale potrà essere il rendimento di batteria per quell'utenza.

In conclusione, si auspica che in futuro la metodologia qui proposta possa essere oggetto di altri studi con lo scopo di limitare l'entità delle ipotesi iniziali e rimuovere le semplificazioni adottate, a vantaggio di una sua maggiore affidabilità.

Prima di tutto, è indispensabile rimettere in discussione le ipotesi iniziali sul profilo di produzione fotovoltaica. Inoltre, si potrebbe rivedere la scelta del *k-means*, utilizzando un indice di stabilità proposto in letteratura [20] per adottare l'algoritmo di clusterizzazione ottimale per il presente studio.

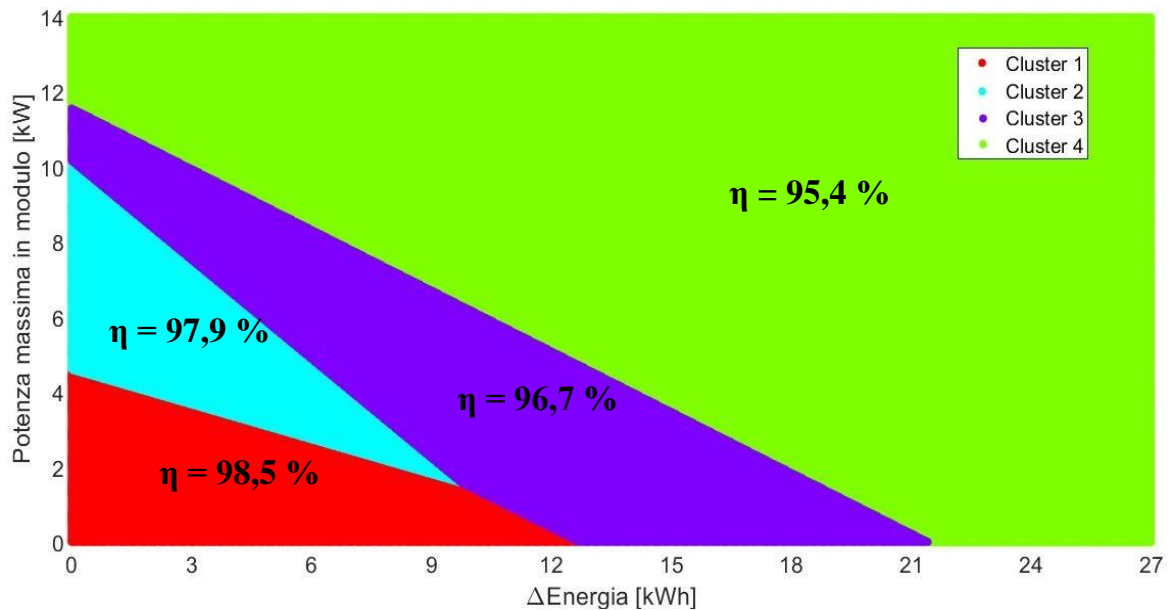


Figura 7 Regioni del piano  $P_{max}$  vs.  $\Delta$ Energia di competenza dei quattro cluster e rendimento del rispettivo centroide

## Sommario e parole chiave

**Parole chiave:** *Sistemi di accumulo a batteria; Sistemi di accumulo elettrochimico; Cluster analysis; Algoritmo k-means; Profili di test per batterie; Batterie sodio-cloruro di nichel*

I sistemi di accumulo a batteria stanno trovando oggi giorno numerose applicazioni a livello della rete elettrica di trasmissione e di quella di distribuzione, in quest'ultimo caso in accoppiamento a impianti da fonte rinnovabile non programmabile. Se questo è un passo necessario per la stabilità e la regolazione di un sistema elettrico in forte transizione, al tempo stesso la diffusione di sistemi di accumulo è limitata dalla carenza di informazioni sul loro reale funzionamento in campo. In tale contesto si inserisce questo lavoro di tesi, che si pone l'obiettivo di costruire una procedura robusta per la classificazione di profili giornalieri di batteria per applicazioni domestiche, così da identificare quattro profili standard che siano rappresentativi delle diverse utenze. Si richiede inoltre che la procedura sviluppata sia tale da inserire in ciascuna classe profili caratterizzati da rendimenti di batteria piuttosto simili, e comunque diversi da quelli tipici degli altri gruppi. Tale procedura si fonda sull'utilizzo del k-means, uno dei principali algoritmi di clusterizzazione, con il quale si riescono a creare raggruppamenti tra i profili di analisi sulla base delle loro distanze euclidee. Imponendo all'algoritmo di identificare quattro cluster diversi e caratterizzando i profili in termini di potenza massima in modulo e massima variazione del contenuto energetico della batteria, si ottiene un risultato consistente con gli obiettivi inizialmente fissati. Al fine di verificare la qualità di quanto ottenuto, si procede in primo luogo ad un processo di validazione numerica per mezzo di un modello di batteria a due rami RC e servendosi della definizione di un Key Performance Index (KPI). In secondo luogo, si attua una validazione sperimentale utilizzando il sistema Zhero, un sistema di accumulo commerciale a batteria sodio-cloruro di nichel di cui si dispone nel laboratorio IoT del Politecnico di Milano. L'esito della validazione, in particolare quella numerica, conferma la coerenza di quanto ottenuto con gli obiettivi prefissati. Disponendo già di dati sperimentali, l'ultima parte della trattazione sarà dedicata alla caratterizzazione del sistema Zhero, valutando le sue prestazioni dal punto di vista tecnico ed economico in applicazioni di autoconsumo della produzione locale e di regolazione primaria di frequenza, descrivendo in quest'ultimo caso il suo comportamento nell'erogazione di servizio originariamente richiesto solo alle grandi centrali di produzione. Ciò sarà anche un test per validare la fattibilità tecnica in merito alla partecipazione di un sistema di accumulo a batteria al Mercato dei Servizi di Dispacciamento (MSD).





## Abstract and keywords

**Keywords:** *Battery energy storage systems; Electrochemical energy storage systems; Cluster analysis; K-means algorithm; Battery test profile; Sodium - nickel chloride battery*

Nowadays battery energy storage systems are spreading in several application among transmission network and distribution one, where in the latter they work coupled with power plants from non-programmable renewable sources. If this is a necessary step for the regulation and the stability of a power grid in a strong transition phase, at the same time the spread of such systems suffers for the lack of information about their field behaviour. In this context there is this thesis work, which has the purpose of finding a good procedure for the classification of daily battery profile for household application, in order to identify four different standard profiles which are representative of all the possible users. Besides, this procedure should have the feature of grouping profiles according to their characteristic battery efficiency. It is based on k-means clustering algorithm, that can identify clusters among profiles according to their Euclidean distance. This algorithm is aimed to find four clusters on profiles expressed in terms of maximum power in absolute value and maximum variation of battery energy content and can get result according to the initial requirement. In order to verify the quality of this result, a validation process is required. First, a numerical validation is performed thanks to a double RC branch battery model and to the definition of a Key Performance Index (KPI). Then, an experimental validation takes place with laboratory activity on Zhero system, a commercial battery energy storage system with a sodium-nickel chloride battery available in Politecnico di Milano IoT lab. The validation, in particular the numerical one, confirms consistency between the result of the cluster analysis and the initial purposes. Considering the availability of experimental data, the last part of this thesis is focused on characterization of Zhero system. In particular, it concerns an evaluation of the technical and economical performances of this system in solar energy self - consumption and primary frequency regulation application. Its behaviour with this last application is interesting because it is a service originally asked only to big power plants. Besides, it results to be a good test in order to validate the technical feasibility for BESS to contribute to the Ancillary Service Market (ASM).



# Indice

Ringraziamenti .....	III
Riassunto esteso.....	V
Sommario e parole chiave.....	XV
Abstract and keywords.....	XVII
Indice.....	XIX
<b>1 INTRODUZIONE.....</b>	<b>1</b>
<b>2 LA TECNOLOGIA SODIO – CLORURO DI NICHEL (NaNiCl<sub>2</sub>).....</b>	<b>7</b>
2.1 La cella e il modulo: componenti, materiali e processo di fabbricazione .....	7
2.2 Il funzionamento della cella: reazioni di carica / scarica e failure mode .....	12
2.3 Le prestazioni della tecnologia.....	17
2.4 La temperatura operativa e i meccanismi di degradazione.....	19
2.5 La cella e la fine del suo ciclo di vita.....	22
2.6 Vantaggi e svantaggi.....	23
2.7 La tecnologia oggi: applicazioni, costi e prospettive future.....	24
<b>3 I MODELLI DELLE BATTERIE SODIO-CLORURO DI NICHEL.....</b>	<b>31</b>
3.1 Le differenti tipologie di modello: accuratezza vs. onere computazionale .....	32
3.2 Modello equivalente di Thévenin .....	35
3.3 Modello equivalente di Thévenin con due rami RC.....	39
<b>4 SISTEMI DI ACCUMULO: APPLICAZIONI E PROFILI DI TEST .....</b>	<b>45</b>
4.1 Le applicazioni dei sistemi di accumulo a batteria.....	46
4.1.1 Applicazioni “behind the meter” .....	47
4.1.2 Applicazioni “front of the meter” .....	47
4.2 Un esempio di metodologia: profili di test per applicazioni automotive .....	51
4.3 Profili di test per applicazioni stazionarie .....	52
4.3.1 La regolazione primaria di frequenza e la spinning reserve.....	52
4.3.2 La funzionalità di peak shaving .....	55
<b>5 ANALISI DI PROFILI DI BATTERIA PER LA DETERMINAZIONE DI PROFILI STANDARD:     METODOLOGIA PROPOSTA.....</b>	<b>59</b>
5.1 Cenni alle tecniche di cluster analysis.....	60
5.2 Cenni sulla trasformata discreta di Fourier .....	61
5.3 Ipotesi di lavoro e costruzione dei profili di batteria .....	62

5.4	Introduzione alla cluster analysis .....	68
5.4.1	Scelta dell'algoritmo e del numero di cluster da ricercare .....	68
5.5	Clusterizzazioni basate su parametri caratteristici .....	70
5.6	Clusterizzazioni basate su profili completi: definizione criteri.....	71
5.6.1	Profili normalizzati per il rispettivo valore di modulo massimo .....	72
5.6.2	Profili non normalizzati .....	73
5.6.3	Profili espressi in termini di risultato dalla FFT .....	73
5.6.4	Legame tra centroidi e profili caratteristici.....	75
5.7	Validazione dei risultati.....	75
5.7.1	L'uso del modello a due rami RC per la validazione dei risultati.....	76
5.7.2	La definizione del Key Performance Index (KPI).....	78
5.8	Analisi di sensitività .....	79
<b>6</b>	<b>ANALISI DI PROFILI DI BATTERIA PER LA DETERMINAZIONE DI PROFILI STANDARD: APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA PROPOSTA.....</b>	<b>81</b>
6.1	Analisi preliminare .....	81
6.2	Prime clusterizzazioni basate su parametri caratteristici .....	83
6.3	Risultati.....	85
6.3.1	Clusterizzazione 2D .....	86
6.3.2	Clusterizzazione 3D .....	88
6.3.3	Clusterizzazione profili normalizzati.....	90
6.3.4	Clusterizzazione profili non normalizzati .....	92
6.3.5	Clusterizzazione con FFT di profili normalizzati .....	94
6.3.6	Clusterizzazione con FFT di profili non normalizzati .....	96
6.4	Validazione dei risultati ottenuti.....	98
6.4.1	Presentazione del risultato validato.....	100
6.4.2	Analisi di sensitività .....	103
6.5	Conclusioni e prospettive di sviluppo .....	104
<b>7</b>	<b>IL SISEMA ZHERO: VALIDAZIONE E CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE .....</b>	<b>111</b>
7.1	Strumentazione utilizzata e predisposizione del banco prova .....	111
7.1.1	Alimentatore DC.....	112
7.1.2	Carico resistivo .....	113
7.1.3	CompactRio controller .....	114
7.1.4	Sistema di alimentazione generale .....	114
7.1.5	La batteria FZSoNick .....	115

7.1.6 Il quadro portatile di misura.....	116
7.1.7 Il sistema Zhero e il progetto InteGRIDy .....	116
7.2 Metodologia utilizzata per la validazione sperimentale .....	122
7.2.1 Profili teorici e sistema di accumulo reale: autoconsumi e taglia.....	122
7.2.2 Considerazioni sul SoC iniziale .....	124
7.2.3 Procedura di prova .....	125
7.2.4 Calcolo del rendimento .....	126
7.3 Risultati.....	127
7.3.1 Profilo 1 .....	128
7.3.2 Profilo 2 .....	129
7.3.3 Profilo 3 .....	130
7.3.4 Profilo 4 .....	131
7.4 Validazione sperimentale della cluster analysis.....	132
7.5 Caratterizzazione sperimentale del sistema Zhero in autoconsumo .....	133
7.5.1 Il rendimento del sistema Zhero .....	133
7.5.2 Analisi economica.....	136
7.6 L'utilizzo del sistema Zhero per la regolazione primaria di frequenza.....	137
7.6.1 Prova di regolazione primaria .....	138
7.6.2 Analisi economica per regolazione primaria e autoconsumo.....	140
7.6.3 Conclusioni sull'analisi economica .....	142
<b>8. CONCLUSIONI GENERALI .....</b>	<b>143</b>
LISTA FIGURE .....	145
ACRONIMI UTILIZZATI .....	149
BIBLIOGRAFIA.....	151



# 1 INTRODUZIONE

L'energia elettrica è un vettore energetico prodotto con un processo di conversione a partire da una fonte di energia primaria, e presenta notevoli vantaggi: è semplice da trasportare con un'efficienza elevata nel momento in cui si realizza un'apposita infrastruttura, non comporta emissioni nel luogo di utilizzo, è facile da convertire in altre forme di energia [3]. Tali vantaggi l'hanno resa un vettore energetico di fatto indispensabile per il mondo industrializzato, in cui si ha una sempre crescente penetrazione di energia elettrica nei consumi finali. Trattandosi però di un vettore energetico, deve essere prodotto tramite un apposito processo di conversione da una fonte di energia primaria. In accordo con i dati IEA per lo scenario italiano [1] e con riferimento alle Fig. 1.1 e 1.2, si può osservare come negli ultimi dieci anni vi sia stato un radicale **cambiamento nel mix energetico** alla base della sua produzione: la tendenza principale vede la progressiva crescita di fonti rinnovabili a discapito di quelle fossili e convenzionali.

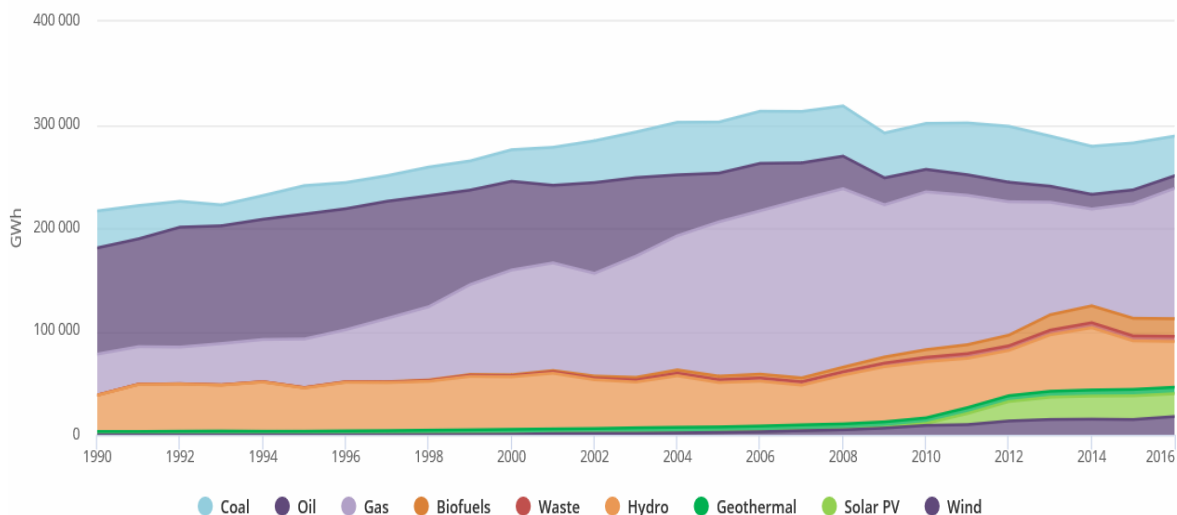


Figura 1.1 Produzione italiana di energia elettrica diversificata per fonte

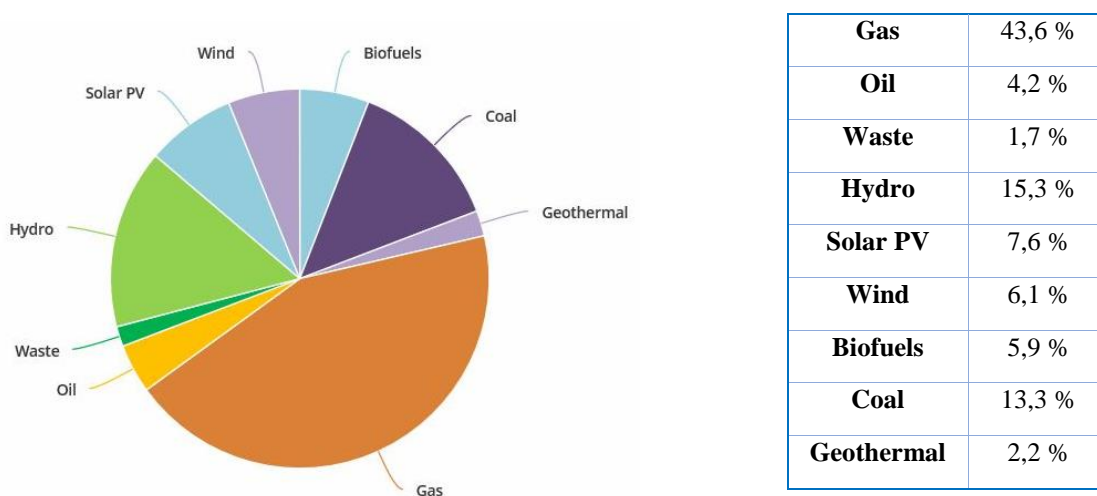


Figura 1.2 Share delle diverse fonti nella produzione italiana di energia elettrica per l'anno 2016

## 1. Introduzione

Contestualmente a questo cambiamento nel mix energetico, si sta assistendo ad una transizione da un sistema elettrico centralizzato in cui poche grandi centrali convertono grandi quantità di energia, verso un **modello di generazione distribuita** in cui tanti piccoli impianti sfruttano una fonte rinnovabile il più delle volte non programmabile.

Tutto questo sta avendo delle ripercussioni sulla **gestione della rete elettrica nazionale** [2], per diverse ragioni.

- La non programmabilità delle principali fonti rinnovabili complica la gestione del sistema di dispacciamento, che deve comunque garantire un bilancio di potenza tra ciò che viene immesso e ciò che viene prelevato dalla rete. Tale problema poteva essere trascurando inizialmente, quando tali impianti detenevano uno share di produzione molto basso, ma il loro ruolo attuale ne richiede un'accurata valutazione.
- Si riduce l'inerzia della rete e dunque la sua capacità di far fronte alle variazioni di frequenza. Impianti eolici e fotovoltaici si interfacciano alla rete elettrica per mezzo di inverter, ossia dispositivi di conversione statica di frequenza. A differenza dei convenzionali generatori sincroni, non sono cioè dotati di masse rotanti a velocità controllata, la cui inerzia meccanica offre un notevole vantaggio nel controllo della stabilità della rete.
- Vi sono anche delle criticità associate alla congestione delle linee di trasmissione. Tali linee sono state storicamente progettate per portare energia dalle centrali del nord Italia verso il sud del Paese; ora invece gli impianti eolici e fotovoltaici sono concentrati prevalentemente al sud, pertanto si ha un'inversione dei flussi di potenza con un conseguente sovraccarico delle linee elettriche, non ancora predisposte per questa nuova situazione.
- Un problema di inversione di flussi di potenza si manifesta anche a livello della rete di distribuzione, concepita inizialmente per prendere energia dalla rete di trasmissione nazionale e distribuirla appunto agli utenti finali. Con l'avvento della generazione distribuita, la rete di distribuzione è di fatto permeata da impianti di produzione, e dunque è chiamata a trasportare energia di fatto nella direzione opposta, ossia verso la rete di trasmissione.

Per far fronte a tali problematiche, trascurando inizialmente importanti interventi infrastrutturali sull'intero sistema elettrico che hanno un notevole onere finanziario e non sono peraltro realizzabili su uno scenario di breve termine, una possibile soluzione [2] prevede di installare sulla rete dei **dispositivi di accumulo** dell'energia elettrica. Tale soluzione va di fatto a indebolire il concetto che l'energia elettrica sia un bene non immagazzinabile, rendendo possibile stoccarla e superando quindi il vincolo della non programmabilità delle principali fonti rinnovabili. In questo modo si potrebbero anche ridurre le congestioni sulle linee di trasmissione e avere un valido supporto nella regolazione di frequenza, in quanto tali sistemi possono immettere e rilasciare energia anche in accordo alle specifiche esigenze della rete.



I sistemi di accumulo di energia elettrica sono però molteplici. Se ne propone ora una classificazione secondo la forma di energia su cui si basa il loro funzionamento [3]:

- Sistemi di accumulo a energia meccanica: pompaggio idraulico, accumulo ad aria compressa e volani sono alcuni esempi di sistemi che attuano trasformazioni tra energia elettrica e una forma di energia meccanica.
- Sistemi di accumulo elettro-magnetici: condensatori e supercapacitori immagazzinano energia all'intero di campi elettro-magnetici.
- Sistemi di accumulo termico (criogenici o ad alta temperatura).
- Sistemi di accumulo elettrochimico: è la categoria che include batterie, flow-battery e celle a combustibile, in cui l'energia elettrica è convertita per mezzo di apposite reazioni in energia chimica stoccata all'interno di legami intermolecolari.

I sistemi di accumulo a batteria, benché rappresentino solo una delle possibili alternative, sono protagonisti di una massiccia diffusione [3] per effetto dei seguenti fronti di sviluppo:

- Nuove esigenze di gestione del sistema elettrico dovute in particolare alla necessità di mitigare gli effetti delle fonti rinnovabili non programmabili.
- Esigenze di gestione dei sistemi elettrici isolati e di piccola taglia, per i quali è necessario garantire il bilancio energetico a livello locale. È il caso tipico dell'elettrificazione rurale dei paesi in via di sviluppo, dove vi sono tante piccole reti elettriche (microgrid) non connesse a una rete nazionale.
- Mobilità elettrica.

All'interno del contesto appena delineato in merito alla transizione che sta caratterizzando l'intero sistema elettrico e alla conseguente necessità di nuovi soggetti per assicurarne la sicurezza e la stabilità, si inserisce il presente lavoro di tesi con lo scopo di fornire un possibile supporto alla diffusione di sistemi di accumulo a batteria. Prima di descrivere quali saranno gli obiettivi è però indispensabile anticipare gli argomenti su cui verterà la trattazione, delineandone in sintesi l'intero filo conduttore.

Nonostante nella prima parte di questa introduzione si sia fatto riferimento a sistemi BESS (Battery Energy Storage Systems) in generale, il capitolo 2 sarà dedicato ad un'accurata ricerca bibliografica sulla tecnologia sodio-cloruro di nichel. Non si tratta certo della tecnologia ad oggi più sviluppata a livello commerciale, tuttavia il suo stato attuale unito ad alcune sue caratteristiche potrebbero renderla promettente in uno scenario di medio-termine. Il motivo della scelta di tale tecnologia sarà più chiaro nel capitolo 7, in cui si utilizzerà un sistema di accumulo commerciale, che integra proprio una batteria sodio-cloruro di nichel, per validare sperimentalmente i risultati emersi del corso della trattazione.

Rimanendo nell'ambito di questa tecnologia, il capitolo 3 presenterà due differenti modelli elettrici pubblicati in letteratura, grazie ai quali è possibile simulare il comportamento di una batteria nelle diverse applicazioni. Si considereranno solo modelli elettrici in quanto ritenuti il miglior compromesso tra precisione dei risultati e onere computazionale [3]. Il capitolo 4 invece riprenderà un approccio più generale e presenterà i risultati di una ricerca

## 1. Introduzione

bibliografica sui profili di test, ossia profili che consentono di rappresentare in laboratorio il reale funzionamento di una batteria sul campo, in relazione alla specifica applicazione per cui sono stati sviluppati.

Modelli e profili di test non sono due argomenti a sé stanti, bensì manifestano un'importanza congiunta nella diffusione dei sistemi di accumulo elettrochimico. È sufficiente pensare infatti come la progettazione di un nuovo dispositivo e la sua applicazione in campo siano di fatto due avvenimenti distanti dal punto di vista cronologico. Tra di essi intercorrono molti step, tra cui lo sviluppo e l'ottimizzazione dello stesso ad opera del costruttore, e l'effettiva scelta di tale dispositivo per un'applicazione sul campo tra le diverse tecnologie offerte dal mercato. Questi due passaggi sono fondamentali e coinvolgono proprio l'utilizzo di modelli e profili di test. Dal punto di vista del costruttore che sta sviluppando un nuovo dispositivo, è facile capire quanto sia indispensabile un profilo di test rappresentativo delle reali condizioni di funzionamento, in modo da ottimizzare il prodotto per le sue specifiche applicazioni e renderlo quindi concorrenziale ad altri. Il costruttore inoltre, all'atto della commercializzazione, deve dichiarare per mezzo di datasheet le prestazioni del proprio sistema sulla base delle prove condotte in laboratorio. Non è però possibile replicare in laboratorio tutte le specifiche applicazioni in cui tale dispositivo andrà ad operare, e ciò contrasta le esigenze di coloro che devono installare un sistema di accumulo e necessitano quindi di conoscerne le prestazioni nella specifica applicazione. Su tale fronte si inserisce l'utilità dei modelli di batteria, che consentono di simulare numericamente il comportamento di un dispositivo su una specifica applicazione, in modo tale da poter valutarne il suo rendimento effettivo e adottare quindi le decisioni migliori in merito alla scelta tra quanto offerto dal mercato.

A partire dai risultati della ricerca sui profili di test condotta nel capitolo 4, si evincerà come il numero di profili proposti sia piuttosto esiguo, e soprattutto come non siano caratterizzate tutte le possibili applicazioni di un sistema BESS. In particolare, vi saranno importanti lacune sulla funzionalità di autoconsumo, in cui il sistema deve appunto massimizzare l'autoconsumo dell'utente finale presso cui è installato. Ciò dunque costituisce una forte limitazione allo sviluppo di nuovi sistemi.

Per far fronte a tale problema, si condurrà una cluster analysis su profili di batteria di una molteplicità di utenti domestici, dotati anche di un'unità di generazione, che sfruttano il sistema di accumulo per massimizzare l'autoconsumo dell'energia prodotta dal proprio impianto fotovoltaico. L'obiettivo sarà quello di identificare un numero ristretto di profili standard che siano però rappresentativi di tutte le realtà domestiche considerate nell'analisi, in modo da ottenere dei profili di test che tengano conto del reale funzionamento in campo di una batteria. Tale risultato dovrà però avere una seconda valenza: si vorrà anche che i profili qui individuati rappresentino ciascuno una specifica tipologia di utenti, il cui comportamento ha un impatto sulle prestazioni della batteria. Questo sarà argomento dei capitoli 5 e 6; in particolare il primo sarà dedicato ad un'accurata descrizione della metodologia adottata, a cui sarà data poi applicazione nel capitolo 6 presentando i risultati ottenuti.

Definiti questi profili standard, nel capitolo 7 si darà spazio a una trattazione di carattere sperimentale in cui, dopo aver descritto il set up del laboratorio e dettagliato tutte le specifiche degli strumenti di misura utilizzati, si condurranno delle prove su un sistema di accumulo commerciale. Con i risultati si proverà ad avere riscontro di quanto emerso nel capitolo 6: si vorrà quindi valutare se, su un sistema reale, i profili selezionati manifestano effettivamente un diverso rendimento.

In seguito, rimanendo sempre in ambito sperimentale, si entrerà più nel merito di una caratterizzazione del sistema di accumulo utilizzato in queste prove. Si tratta di un sistema commerciale a batteria sodio-cloruro di nichel. Si analizzerà la possibilità di utilizzare tale sistema per massimizzare l'autoconsumo servendosi appunto dei risultati delle prove precedenti, e si valuterà la sua capacità di fornire servizi alla rete e dunque di partecipare al Mercato dei Servizi di Dispacciamento (MSD). In particolare, si analizzerà la capacità del sistema di fornire regolazione primaria. Autoconsumo e regolazione primaria, sia singolarmente sia in modo congiunto, saranno poi oggetto di un'analisi economica in modo da valutare la competitività di questo sistema sul mercato.

L'obiettivo finale di questa trattazione è quindi proporre alcuni profili di test che siano rappresentativi delle diverse realtà domestiche, in cui l'utente utilizza un sistema di accumulo per massimizzare l'autoconsumo dell'energia prodotta dal proprio impianto fotovoltaico. Tali profili standard dovranno auspicabilmente divenire un valido strumento per testare nuovi sistemi BESS e ottimizzarli in base alle effettive esigenze dei diversi utenti domestici.

## 1. Introduzione

## 2 LA TECNOLOGIA SODIO – CLORURO DI NICHEL (NaNiCl<sub>2</sub>)

L'obiettivo di questo capitolo è fornire una visione generale su diversi aspetti della tecnologia sodio-cloruro di nichel, così da descrivere nel dettaglio lo stato attuale della stessa tecnologia, i meccanismi fisici che stanno alla base del suo funzionamento e quali sono i vantaggi e gli svantaggi che la contraddistinguono rispetto ad altri sistemi di accumulo elettrochimico, anche maggiormente consolidati. Al fine di perseguire tale obiettivo è stato necessario svolgere un'accurata ricerca bibliografica, della quale si presenterà ora il risultato, in modo da fornire una solida base teorica all'attività sperimentale e agli argomenti che saranno oggetto dei capitoli successivi.

Prima di entrare nel dettaglio dei diversi aspetti, è bene fare una puntualizzazione in merito alla nomenclatura e fornire al tempo stesso qualche cenno storico sullo sviluppo della tecnologia in analisi. Le batterie sodio-cloruro di nichel (formula chimica NaNiCl<sub>2</sub>) sono anche chiamate semplicemente batterie al sale. Sono note in letteratura con il termine inglese ZEBRA battery, nome del progetto in cui sono state originariamente sviluppate e acronimo di “Zero Emission Batteries Research Activity” o “Zeolite Batteries for Research in Africa”; quest'ultimo nome è legato agli albori della tecnologia, quando la β''- allumina non aveva ancora sostituito la zeolite, utilizzata come elettrolita nei primi modelli [21].

Tali acronimi danno anche qualche informazione a livello storico. Le batterie sodio-cloruro di nichel infatti furono sviluppate a partire dagli anni '80 in Sudafrica e Gran Bretagna come sistemi propulsivi di veicoli elettrici a zero emissioni. Nel 1999 il brevetto fu acquistato dalla MES-DEA che iniziò a produrla in Svizzera. Nell'anno 2011 la società fu venduta al gruppo Fiamm, che creò la nuova società Fiamm Sonick (oggi FZSoNick), azienda con sede produttiva nella città svizzera di Stabio e tuttora leader mondiale nella produzione di queste batterie [22].

### 2.1 La cella e il modulo: componenti, materiali e processo di fabbricazione

Conclusa la breve introduzione, si può entrare subito nel merito della tecnologia. Oggetto di tale sezione è la singola cella, con particolare attenzione ai suoi componenti e ai materiali in cui essi sono realizzati. Si vuole descrivere inoltre l'assemblaggio delle celle a dare i moduli e quindi la batteria intesa come prodotto finito; il tutto è poi accompagnato da alcuni cenni al processo produttivo.

Entrando nel dettaglio della **singola cella**, è possibile analizzarne prima di tutto la **struttura** osservando la Fig. 2.1, da cui si nota una forma prismatica: partendo dal centro e procedendo in direzione radiale è possibile trovare tutti i principali elementi di un sistema elettrochimico. Secondo questo sistema di riferimento, al centro, lungo l'asse, vi è il polo positivo della cella, costituito da un conduttore realizzato in nichel e circondato da altro nichel e cloruro di

## 2. La tecnologia sodio – cloruro di nichel ( $\text{NaNiCl}_2$ )

nichel ( $\text{NiCl}_2$ ) che si forma durante il processo di carica. Dal momento che il nichel alla temperatura operativa della cella si presenta allo stato solido, a completamento del comparto catodico (assumendo come riferimento un processo di scarica) si aggiunge un elettrolita secondario, detto anche catolita, che facilita il movimento degli ioni  $\text{Na}^+$  dall'elettrolita principale verso l'interno del catodo: tale specie è il sodio tetracloroalluminato ( $\text{NaAlCl}_4$ ) ed è ottenuto combinando  $\text{NaCl}$  e  $\text{AlCl}_3$  anidro. Complessivamente tutti i materiali che costituiscono il catodo sono caricati nel sistema sotto forma di granuli di sale o polvere metallica, a seconda dei casi. Generalmente all'interno dell'catodo sono inseriti anche degli additivi metallici che possono partecipare alle reazioni; tra questi il più importante è il cloruro di ferro ( $\text{FeCl}_2$ ) e la sua utilità sarà discussa più nel dettaglio nei seguenti paragrafi. Quanto finora descritto è racchiuso dalla  $\beta''$ -allumina, l'elettrolita ceramico a struttura cristallina indispensabile al funzionamento della cella in quanto separa catodo e anodo, permettendo il transito delle sole specie ioniche e bloccando al tempo stesso gli elettroni: proprio la sua elevata resistenza elettrica limita fortemente il transito di elettroni, inibendo quindi reazioni di autoscarica. Per quanto risulti concettualmente semplice pensare all'elettrolita come un tubo che contiene il comparto catodico – infatti questa è stata la prima soluzione ad essere implementata – in realtà nelle celle più recenti si ricorre a una particolare forma prismatica avente come sezione trasversale un profilo tetralobato, osservabile in Fig. 2.2. Tale profilo consente di aumentare fino al 40% l'area di contatto tra l'elettrolita e l'elettrodo rispetto a una convenzionale forma prismatica, riducendo contestualmente di quasi un terzo il contributo alla resistenza interna della cella. La  $\beta''$ -allumina è poi contornata esternamente da un profilo in acciaio avente la stessa forma e uno spessore di 0,1 mm, che crea un'intercapedine tra sé e l'elettrolita.

Esternamente all'elettrolita troviamo il comparto anodico costituito essenzialmente da sodio metallico, che viene formato durante la carica tramite la riduzione del cloruro di sodio ( $\text{NaCl}$ ). Alla temperatura operativa tale specie è allo stato liquido e questo spiega la presenza di un'intercapedine tra l'elettrolita e la sua copertura in acciaio: a prescindere dal livello della fase liquida contenuta all'anodo, le forze associate ai fenomeni di capillarità spingono il sodio a bagnare interamente tutta la superficie esterna della  $\beta''$ -allumina, utilizzando sempre tutta la superficie di contatto a disposizione. Il sodio liquido però risulta volatile e molto reattivo, pertanto è bene garantire la sicurezza del sistema, evitando al tempo stesso fuoriuscite di reagenti e ingressi di aria e umidità. A tal proposito si racchiude tutta la cella finora descritta con un contenitore in acciaio rivestito da uno strato di nichel che rappresenta il polo negativo della cella, e si realizza un sistema di tenuta ermetica saldando a laser degli anelli di nichel tra questa copertura esterna e un collare di  $\alpha$ -allumina saldato sull'elettrolita ceramico [2,9-11].

La cella così costituita può essere osservata in Fig. 2.3

## 2. La tecnologia sodio-cloruro di nichel ( $\text{NaNiCl}_2$ )

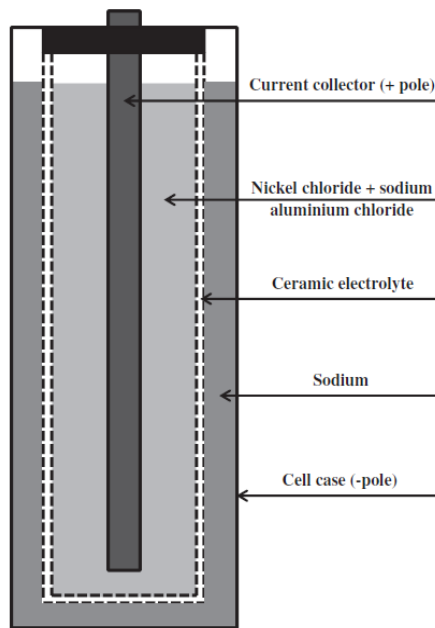


Figura 2.1 Componenti della cella visti in sezione longitudinale

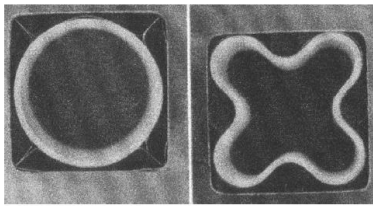


Figura 2.2 Due differenti sezioni trasversali della  $\beta$ -allumina



Figura 2.3 Cella assemblata

Conclusa questa descrizione della struttura nel suo complesso, è ora possibile entrare nel dettaglio dei singoli componenti, analizzando anche il loro processo produttivo.

Una caratteristica costruttiva interessante che è bene mettere in evidenza sin da ora, è che tali celle sono prodotte in uno stato di completa scarica. La ragione sta sia nelle problematiche operative che si riscontrerebbero lavorando direttamente il sodio metallico e il cloruro di nichel, sia nei vantaggi offerti della tecnologia, che consentono un assemblaggio della cella semplicemente a partire da nichel metallico in polvere e cloruro di sodio.

Si entra ora nel merito dei **componenti** della cella partendo dal **polo positivo**.

Dal punto di vista costruttivo si realizza mescolando le polveri dei materiali che lo costituiscono: nichel, cloruro di sodio, solfuro di ferro e altri alogenuri del sodio. Le polveri così mescolate sono poi trasformate in granuli tramite un compattatore industriale e possono essere così caricate nel comparto catodico mentre il sistema è mantenuto in vibrazione, al fine di assicurare un'uniforme distribuzione. Si procede poi con un processo di asciugatura per rimuovere l'umidità e si inserisce il catolita. A completamento del catodo si inserisce un

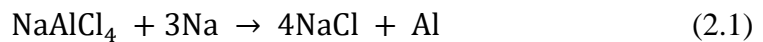
## 2. La tecnologia sodio – cloruro di nichel (NaNiCl<sub>2</sub>)

conduttore, sempre realizzato in nichel, per migliorare la conduttività elettronica in direzione longitudinale, essendo quella radiale già assicurata dal nichel caricato sotto forma di polvere. Tale conduttore al nichel è costituito da due strati metallici separati da un foglio di carbonio che mantiene la parte alta dell'elettrodo bagnata dal catolita.

Tutti i materiali qui caricati hanno una funzione specifica anche se non prendono parte alla reazione principale. Gli alogenuri del sodio servono per stabilizzare la resistenza del sistema nel corso della sua vita utile. Il solfuro di ferro è utilizzato nel corso della prima carica per produrre il cloruro di ferro (FeCl<sub>2</sub>) e il solfuro di nichel (NiS): il primo in determinate condizioni prenderà parte al funzionamento della cella, il secondo invece previene l'accrescimento delle diverse particelle metalliche in modo da mantenere elevata la capacità della cella nel corso della vita utile [10].

Anche il sodio tetracloroalluminato (NaAlCl<sub>4</sub>) ha un'importanza non certo irrilevante, dal momento che assolve a diverse funzioni [11]:

- Come già esplicitato, incentiva la conduzione degli ioni Na<sup>+</sup> dalla superficie dell'elettrolita fino alla zona di reazione all'interno del catodo
- Interviene attivamente in caso di guasto dovuto a rotture nell'elettrolita ceramico. Entrando in contatto con il sodio del comparto anodico dà luogo alla reazione:



Questa rilascia meno energia rispetto alla consueta reazione di scarica, a vantaggio della sicurezza del sistema; inoltre i suoi prodotti sono in grado di riparare piccole fessurazioni dell'elettrolita ceramico ripristinando il funzionamento del sistema stesso. Nel caso in cui il danno fosse di entità maggiore, l'alluminio consentirebbe di cortocircuitare la cella riducendo la sua resistenza: il risultato è che su una catena di molte celle connesse in serie, la riduzione sulla tensione finale è praticamente trascurabile, tanto che la batteria può funzionare senza problemi finché il 90-95% delle sue celle sono operative.

- Può reagire e convertirsi nelle specie che prendono parte alla reazione principale, costituendo quindi una riserva degli stessi; riserva che è particolarmente utile in situazione di sovra-carica e sovra-scarica. Tale aspetto sarà poi approfondito nei paragrafi seguenti.

Si passa ora ad un altro componente fondamentale quale è appunto l'**elettrolita** principale, ossia la β''- allumina. Il suo processo di fabbricazione risulta piuttosto complesso e articolato, pertanto si presenterà ora solo una breve descrizione.

Il punto di partenza è la fabbricazione di dischi di β''- allumina, che costituiscono l'unità fondamentale per la realizzazione dell'elettrolita. Si parte da una miscela di polveri di α-Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> ad alta purezza e zirconia stabilizzata con Ittrio (YSZ = yttria-stabilized zirconia), che sono successivamente macinate insieme a sostanze disperdenti, solventi, plastificanti e leganti al fine di formare uno slurry. Questo slurry è poi lavorato, laminato e tagliato a laser per formare dei dischi circolari. Questi sono poi scaldati fino a 1600°C per accrescerne la densità e in seguito messi in contatto con della polvere di β''- allumina sintetizzata dalla



boemite. Il tutto è poi portato a 1450°C per ottenere un processo di conversione della  $\alpha$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub> in  $\beta''$ -Al<sub>2</sub>O<sub>3</sub>, dal quale si ottengono dischi di spessore 600 $\mu$ m [23]. Ottenute queste unità si procede ad unirle a formare un tubo tramite opportuni processi ad alta temperatura, e da questo tubo sarà ricavato il componente da inserire nella cella [10].

Per quanto concerne invece il **comparto anodico**, non è necessario delineare alcun tratto saliente del processo produttivo, dal momento che durante la fabbricazione non si inserisce sodio metallico nel sistema. Il sodio infatti è caricato esclusivamente al catodo sotto forma di sale: l'anodo subito dopo la produzione risulterà vuoto [11].

Descritti nel dettaglio tutti i costituenti della cella, è ora possibile analizzare come le singole celle sono tra loro assemblate per realizzare un **modulo**, e quali altri componenti sono necessari per produrre la batteria intesa come prodotto finito.

Prima di tutto è bene capire come possono essere collegate tra loro tutte le celle che andranno a costituire un modulo. Come anticipato nei paragrafi precedenti, la tecnologia presenta una certa tollerabilità nei confronti dei guasti in quanto la singola cella guasta risulta cortocircuitata, dunque agli effetti esterni si ha una riduzione della capacità e della tensione erogata, ma non un aumento della resistenza interna. Tra le funzionalità del BMS (Battery Monitoring System) vi è quella di adattare la tensione di carica al nuovo OCV (Open Circuit Voltage) che si presenta in seguito ai guasti. Dunque, non si ha un limite vero e proprio al numero di celle che possono essere collegate in serie né bisogna adottare dei dispositivi cortocircuitanti la cella guasta. Questo spiega perché si realizzano modelli aventi oltre duecento celle in serie, per le quali nel corso della vita utile non si richiedono mai interventi di manutenzione o sostituzione [10,11].

Per realizzare un modulo dal punto di vista costruttivo, si parte da una struttura metallica appositamente realizzata per poter allocare internamente tutte le celle e per poter inserire uno strato di isolante termico sotto la copertura esterna. Ogni stringa è separata da quelle adiacenti per mezzo di piastre, osservabili in Fig. 2.4, attraverso le quali è circolata aria ambiente attraverso un fan per l'eventuale raffreddamento del sistema (non sempre presente). Si inseriscono infine i riscaldatori ohmici, indispensabili per mantenere il sistema in temperatura, e si ottiene così un modulo completo, il cui schema è osservabile in Fig. 2.5. I moduli così realizzati possono poi essere collegati in serie o in parallelo per ottenere le specifiche desiderate per una data unità di accumulo [11].



Figura 2.4 Piastre della struttura

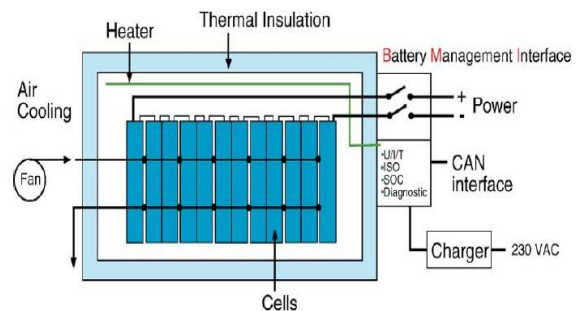


Figura 2.5 Batteria assemblata - dettaglio componenti

## 2. La tecnologia sodio – cloruro di nichel (NaNiCl<sub>2</sub>)

### 2.2 Il funzionamento della cella: reazioni di carica / scarica e failure mode

Analizzato il processo di realizzazione delle celle, in questo capitolo si passa al funzionamento del sistema dal punto di vista elettrochimico, descrivendo le reazioni che avvengono nei processi di carica e scarica e come queste influenzano la tensione di circuito aperto ai capi della cella (OCV). Particolare attenzione è posta al primo processo di carica e scarica a valle della fabbricazione; questo infatti, se non svolto adeguatamente, può compromettere le prestazioni del sistema per tutta la vita utile, pertanto deve essere svolto dal costruttore secondo un'apposita procedura. A conclusione del paragrafo si valutano le modalità di guasto che si possono presentare durante il funzionamento.

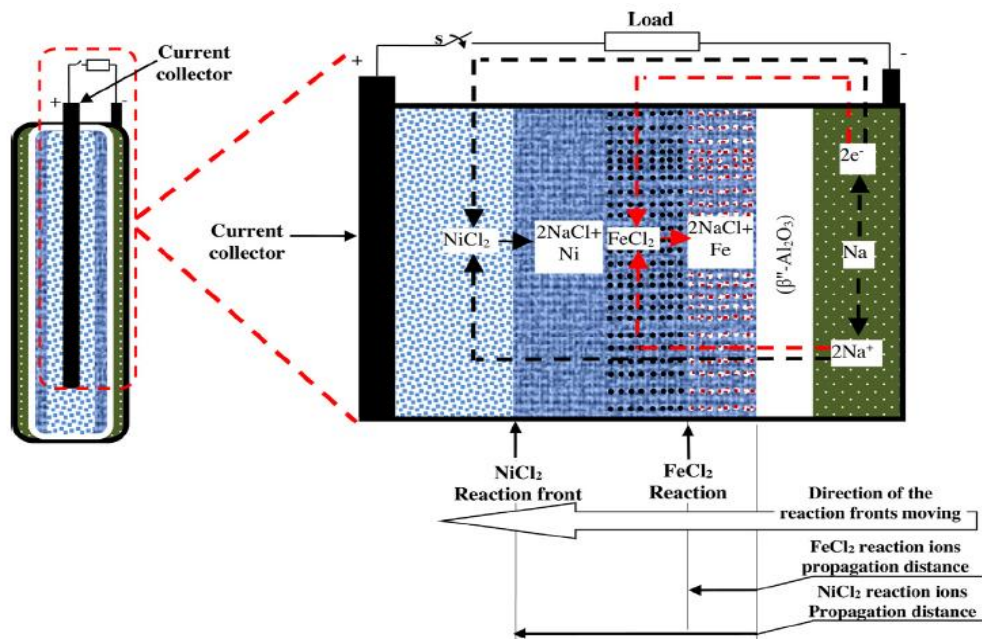


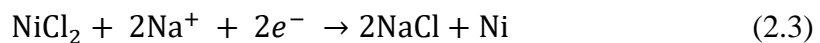
Figura 2.6 Schema di scarica per una cella drogata con ferro

Si descrive ora il funzionamento durante un processo di **scarica** con costante riferimento alla Fig. 2.6, che ben descrive il percorso di ioni ed elettroni in una cella drogata con ferro.

Nell'immagine si osserva come, all'inizio della scarica, il sodio metallico all'anodo si dissocia producendo ioni sodio ed elettroni secondo la seguente reazione:



I primi si muovono attraverso la  $\beta''$ -allumina per raggiungere il comparto catodico, stesso punto di arrivo degli elettroni che si muovono però sul circuito elettrico esterno posto a collegamento dei due elettrodi. Al catodo le specie qui pervenute reagiscono con il cloruro di nichel:



La reazione si sviluppa inizialmente in prossimità dell'elettrolita, ma al progredire della scarica il fronte di reazione, ossia la zona all'interno del comparto catodico in cui i

reagenti entrano in contatto tra loro, si muove progressivamente verso il conduttore del polo positivo a causa del progressivo consumo di cloruro di nichel. Il fatto che il fronte di reazione si muova sempre più verso l'interno del comparto catodico implica che gli ioni sodio devono percorrere una distanza sempre maggiore per prendere parte alla reazione. Questo ha un effetto rilevante sul funzionamento della cella in quanto si assiste, al ridursi del SoC (State of Charge), ad un aumento della resistenza interna e contestualmente a una riduzione della tensione ai morsetti della cella stessa.

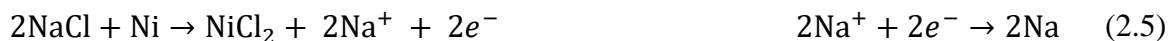
Questo comportamento giustifica l'introduzione di elementi droganti, addizionati al catodo proprio con lo scopo di limitare questo aumento di resistenza che diverrebbe eccessivamente penalizzante per bassi valori di SoC. Tali elementi infatti, non avendo ancora preso parte ad alcuna reazione, sono disponibili in prossimità dell'interfaccia con la β''-allumina, dunque se potessero reagire con gli ioni sodio garantirebbero l'operatività della cella con un valore di resistenza interna nettamente inferiore. Ciò può essere realizzato scegliendo opportunamente le specie in questione, come nel caso del drogaggio al ferro, con cui può svilupparsi la seguente reazione:



La sua peculiarità è che avviene per valori di OCV inferiori rispetto a quelli della reazione che coinvolge il nichel: 2,35 V contro 2,58 V. Questo le consente di svilupparsi solo in una fase avanzata del processo di scarica, quando è necessaria proprio in relazione ai valori di resistenza interna raggiunti.

Tutto quanto appena spiegato giustifica l'andamento della tensione di circuito aperto in funzione del DoD (Depth of Discharge) rappresentato in Fig. 2.8. Dopo la consueta riduzione di inizio scarica dovuta alle perdite di attivazione, si osserva un valore di tensione praticamente costante, corrispondente allo sviluppo delle reazioni (2.2) e (2.3). Ad un certo punto, a causa dell'aumento di resistenza interna, la tensione crolla sino a un valore in cui gli ioni sodio possono reagire con il ferro; ha luogo allora la reazione (2.4). Al tempo stesso la resistenza interna subisce quindi una brusca riduzione per poi riprendere a crescere gradualmente, dato che anche il fronte di reazione associato al nuovo reagente si sposterà progressivamente verso l'interno del comparto catodico.

La trattazione duale vale per il processo di **carica**, in cui avvengono le medesime reazioni precedentemente discusse ma con verso opposto:



Con riferimento alla Fig. 2.7 si osserva come in quello che prima era il comparto catodico, il cloruro di sodio reagisce con il nichel producendo ioni sodio e liberando elettroni, che percorrono poi le rispettive vie per giungere all'altro polo, dove andranno a produrre sodio metallico. Per quanto concerne invece la reazione (2.4) descritta per la scarica, la sua inversa non si verifica all'inizio del processo di carica come sarebbe intuitivo immaginare. Questa è associata piuttosto ad una caratteristica interessante di questa tecnologia che sarà descritta nei paragrafi seguenti.

## 2. La tecnologia sodio – cloruro di nichel ( $\text{NaNiCl}_2$ )

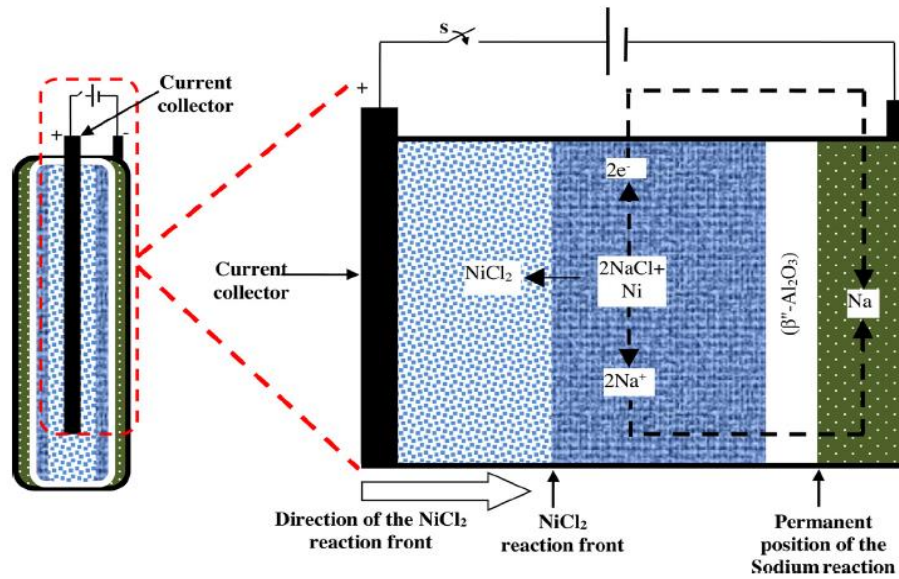


Figura 2.7 Schema di carica per una generica cella  $\text{NaNiCl}_2$

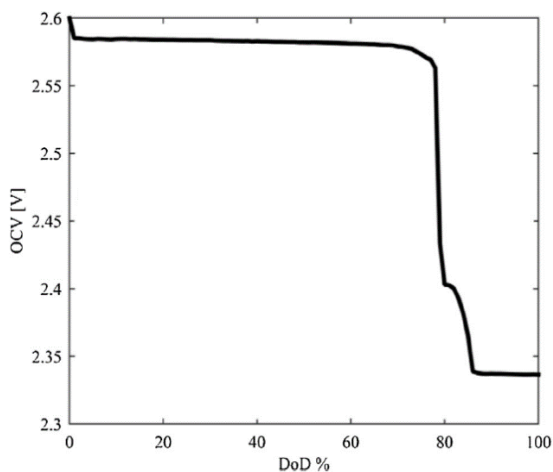


Figura 2.8 Misure di OCV in scarica a  $260^\circ\text{C}$

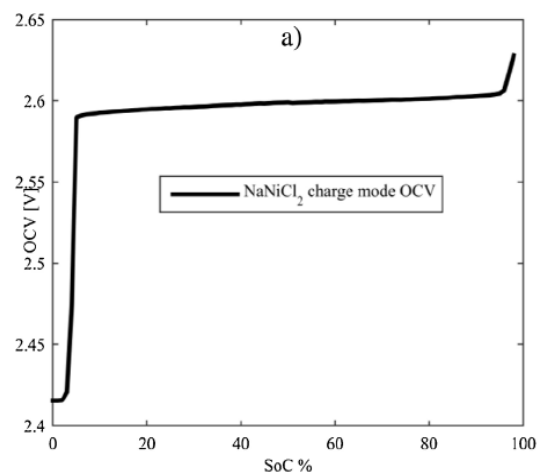


Figura 2.9 Misure di OCV in carica

In Fig. 2.9 è possibile osservare l'andamento della tensione di circuito aperto in funzione del SoC durante il processo di carica della cella [8].

Unendo concettualmente quanto finora descritto si ottiene la descrizione di un ciclo di carica-scarica, che può essere svolto da un qualsiasi valore di iniziale di SoC, senza alcun vincolo. Lo stesso non può valere per il **primo ciclo** a valle della realizzazione del sistema, che deve seguire invece una procedura specifica per non comprometterne le prestazioni nel corso della vita utile.

All'inizio della prima carica il sodio inizia a formarsi al polo negativo nell'intercapedine tra la  $\beta''$ - allumina e lo strato metallico che lo riveste, ricoprendo velocemente tutto il tubo e da qui anche l'intero comparto anodico. La carica deve necessariamente procedere finché tutto il cloruro di sodio risulta consumato: essendo la conduttività elettronica del conduttore di nichel molto maggiore della conduttività ionica dell'elettrolita secondario, la reazione tende a polarizzarsi verso la regione della  $\beta''$ - allumina. Solo un completo

consumo del cloruro di sodio assicura allora il passaggio del fronte di reazione in tutti i punti del comparto catodico.

Avendo consumato tutto il cloruro di sodio, la specie sodio si troverà interamente in forma metallica nel comparto anodico, in una quantità maggiore rispetto a quanta ne sarà richiesta in una scarica ordinaria. Solo la presenza di questo surplus assicura alla cella una certa tolleranza alle situazioni di sovra-scarica, riuscendo ugualmente a mantenere un flusso di cariche a tensioni più basse [10,11].

I processi di carica e scarica finora descritti sono quelli che rappresentano il funzionamento ordinario della cella, tuttavia non sempre i parametri operativi si mantengono entro i valori prima enunciati, come anticipato alla fine del precedente paragrafo: si possono verificare all'atto pratico delle situazioni di **sovra - carica e sovra - scarica** ed è bene pertanto analizzare il comportamento di una cella in situazioni di questo tipo.

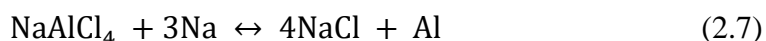
Partendo dal concetto di sovra-carica, come prima considerazione è bene precisare che questa si verifica nel momento in cui al catodo si esaurisce completamente il cloruro di sodio, e dunque la cella avrebbe esaurito la sua capacità di accumulare energia, senonché si continua ad applicare tensione dall'esterno. In tale circostanza interviene l'elettrolita secondario NaAlCl<sub>4</sub> che costituisce appunto una riserva di sodio e prende parte al funzionamento del sistema secondo la seguente reazione reversibile, denominata appunto reazione di sovra-carica:



Questa però richiede una tensione maggiore rispetto alla carica normale, dunque la tensione da applicare alla cella per caricarla ulteriormente deve aumentare fino a 3,05V, come illustrato in Fig. 2.10. Da questa caratteristica conseguono due aspetti positivi:

- La sovra-carica può essere inibita automaticamente nel momento in cui la OCV della cella eguaglia la consueta tensione di carica.
- Considerando dei moduli contenenti stringhe in parallelo, in caso di guasto di alcune celle, le altre che si trovano sulla stessa stringa possono essere sovraccaricate così da bilanciare la riduzione di tensione associata al guasto.

Il caso duale a quello appena descritto rappresenterà allora una situazione di sovra - scarica, in cui si tenta appunto di scaricare la cella oltre il consentito. In tale circostanza, la riserva di sodio presente nel comparto anodico e l'elettrolita secondario danno luogo a una nuova reazione, consentendo il proseguimento del processo di scarica seppur a una tensione inferiore alla precedente, come mostrato in Fig. 2.10 [11,22].



## 2. La tecnologia sodio – cloruro di nichel (NaNiCl<sub>2</sub>)

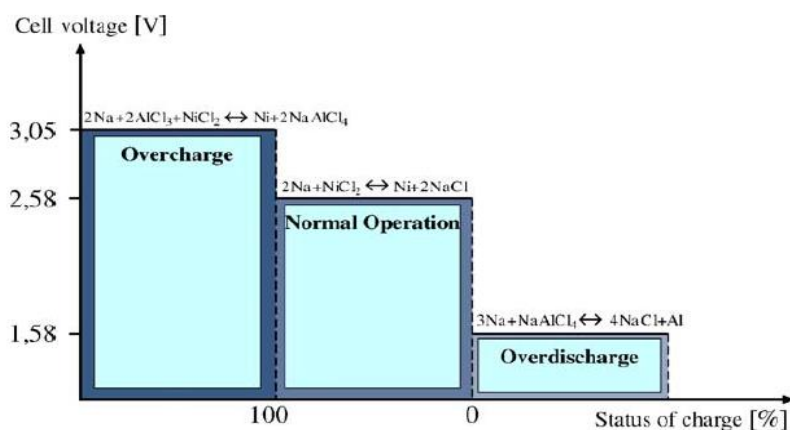


Figura 2.10 Tensione di cella e reazioni in sovra-carica e sovra-scarica

Conclusa la trattazione su sovra-carica e sovra-scarica, è possibile ora delineare alcune situazioni di **guasto** che si possono presentare nel corso della vita utile, descrivendo contestualmente il comportamento della cella in tali circostanze.

La prima modalità di guasto da analizzare è sicuramente quella più probabile, ossia la rottura della  $\beta''$ -allumina. Come già anticipato, in una situazione di questo tipo è l'elettrolita secondario ad intervenire mantenendo la cella in sicurezza: la rottura mette in comunicazione i due comparti e permette il trasporto del sodio metallico verso il catodo, dove entra in contatto con il catolita a dare la reazione (2.1). Questa libera meno energia rispetto alle reazioni ordinarie e produce prodotti solidi non reattivi che vanno a cortocircuitare la cella se non riescono a ripararne la rottura; il sistema allora prosegue nel funzionamento. In ogni caso si crea appunto una barriera solida che previene ulteriori reazioni indesiderate rendendo così la cella "fault tolerant".

La seconda modalità di guasto concerne la possibilità che la cella sia soggetta ad un urto così intenso da romperne l'involucro esterno. In linea teorica questo porterebbe in contatto il sodio metallico con l'ossigeno dell'aria con il conseguente sviluppo di una reazione fortemente esotermica. Tutto ciò però non si verifica: l'assenza di rilascio di sodio in ambiente è stata più volte dimostrata sperimentalmente. La ragione è riconducibile alla modalità di guasto precedente descritta, dal momento che un urto tale da danneggiare un involucro metallico andrebbe sicuramente a rompere anche la  $\beta''$ -allumina, con conseguente contatto tra il sodio metallico e l'elettrolita secondario.

Per quanto concerne invece la sicurezza del sistema da un punto di vista generale, è bene considerare che tale tecnologia è stata inizialmente sviluppata per applicazioni automotive dove le specifiche in merito a tenuta agli urti, assenza di innesco di incendio all'interno, tenuta ad un incendio nell'ambiente esterno sono molto più importanti che nelle applicazioni stazionarie. Già questo dà importanti garanzie per l'utilizzo stazionario. Inoltre, sono state svolte delle prove per testare il comportamento dei moduli in situazioni estreme: urti violenti, immersioni in acqua, esposizione al fuoco, caduta da altezza ragionevole, corto circuito interno conseguente a perforazione degli involucri, esposizione a fenomeni sismici e vibrazioni. Tutti questi test hanno dimostrato che in nessuna delle situazioni elencate il modulo dà origine a incendi o sversa all'esterno i



materiali che lo costituiscono, garantendo quindi un'ottima sicurezza della tecnologia sodio-cloruro di nichel [2].

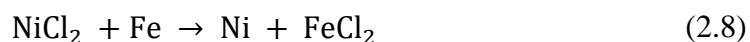
### 2.3 Le prestazioni della tecnologia

Nel precedente paragrafo è stato descritto in generale il funzionamento di una singola cella dal punto di vista elettrochimico. Si vuole ora partire dal quadro appena tracciato per approfondirlo in modo da delineare le prestazioni di una cella NaNiCl<sub>2</sub> e le sue caratteristiche che si manifestano in fase operativa, con eventuali riferimenti ad altre tecnologie di accumulo elettrochimico.

La prima caratteristica da analizzare dettagliatamente, dato il prestigio che conferisce alla tecnologia in analisi, è l'elevata **potenza di picco** (peak power pulses) che una cella può erogare indipendentemente dal valore di SoC.

Con riferimento al funzionamento della cella, durante un processo di scarica il fronte di reazione si sposta dall'interfaccia con la β''- allumina verso l'interno del comparto catodico; a questo spostamento è associato un aumento della resistenza interna della cella dal momento che gli ioni Na<sup>+</sup> devono percorrere una distanza sempre crescente per prendere parte alla reazione. Se la scarica viene interrotta da un processo di carica, seppur breve, quest'ultimo genera i suoi prodotti (che sono reagenti per una scarica) in prossimità dell'interfaccia con l'elettrolita. Nel momento in cui la scarica dovesse riprendere, troverebbe dei reagenti disponibili in prossimità dell'elettrolita e dunque il fronte di reazione non ripartirebbe da dove si era fermato, bensì proprio da questa interfaccia per sfruttare le specie qui disponibili. Rapidamente tornerebbe poi al punto originario, ma in questo breve istante la cella riuscirebbe a erogare una potenza di picco elevata in quanto la sua resistenza interna risulterebbe molto bassa. Tutto ciò avverrebbe per qualunque stato di carica.

Il fenomeno appena descritto è associato al solo meccanismo di funzionamento delle celle sodio-cloruro di nichel, tuttavia ha suggerito un metodo per essere migliorato, rendendolo così una peculiarità di questa tecnologia. Tale metodo si basa sull'aggiunta di elementi droganti al catodo, e conferisce quindi un'altra ragione all'aggiunta di ferro al comparto catodico. Aggiungendo il materiale drogante si crea internamente alla cella, una nuova cella sodio-ferro che può prendere parte alla reazione di scarica. Ricordando che la cella sodio-cloruro di nichel eroga una OCV di 2,58V mentre la cella sodio-ferro 2,35V, nel momento in cui si applica un carico che fa scendere la tensione a 2,35V, allora anche la seconda cella prende parte alla scarica secondo la reazione (2.4) con un fronte di reazione che parte dalla β''- allumina e dunque con una resistenza interna del tutto simile a quella di una cella carica. Dopo la scarica impulsiva la tensione torna a valori superiori a 2,35V e dunque, mentre la scarica prosegue, la cella sodio-ferro si ricarica secondo la seguente reazione, divenendo nuovamente pronta per una scarica impulsiva:



## 2. La tecnologia sodio – cloruro di nichel (NaNiCl<sub>2</sub>)

Complessivamente si ottiene un sistema con una notevole potenza di picco erogata indipendente dallo stato di carica, a discapito però di una penalizzazione dell'1% in termini di energia specifica, in quanto circa il 10% della capacità della cella è scaricato a una tensione più bassa. Al tempo stesso l'utilizzo di un drogaggio al ferro comporta un vantaggio in termini di costo in quanto va a sostituire per il 20% il nichel, che è un metallo molto più costoso [10,12,24].

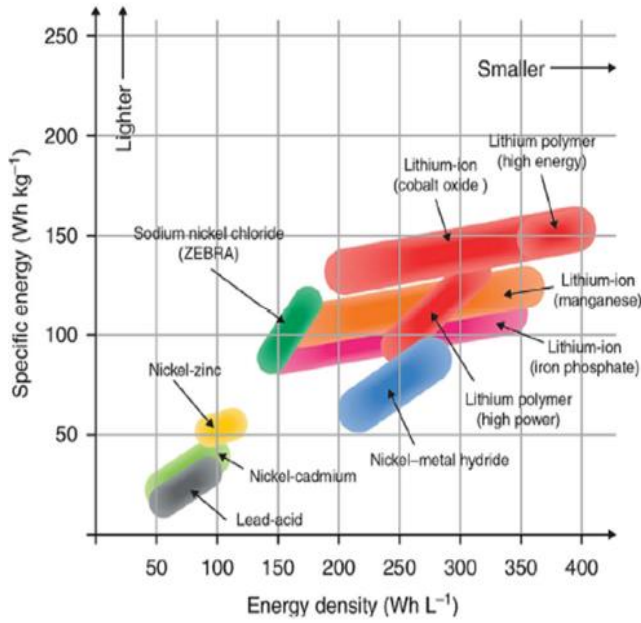


Figura 2.11 Potenza ed energia specifica delle principali celle elettrochimiche

OCV [V]	2,58
Capacità [Ah]	38
Dimensioni [mm]	36x36x220
Peso [kg]	0,685
Energia specifica [Wh/kg]	140
Energia specifica [Wh/l]	280
Potenza specifica [W/kg]	245
Densità di potenza [W/l]	491

Tabella 2.1 Specifiche di una cella

È bene ora considerare qualche valore di **potenza ed energia specifica** che caratterizzano la tecnologia in analisi, mettendo in relazione tali valori con quelli che caratterizzano altri tipi di batterie. A tal proposito è possibile fare riferimento alla Fig. 2.11, dove si mettono in evidenza le aree occupate dalle diverse tecnologie e si vede contestualmente il motivo alla base della massiccia diffusione delle batterie agli ioni di litio [2,11].

Per quanto concerne in particolare la tecnologia sodio-cloruro di nichel è possibile fare riferimento alla Tabella 2.1, in cui sono elencate le specifiche di una singola cella [25].

Per concludere la trattazione sulle prestazioni delle celle, si fa ora qualche cenno alla loro vita utile, premettendo che tale parametro è influenzato anche dalla temperatura operativa del sistema. Quest'ultimo aspetto sarà però oggetto del prossimo paragrafo.

I fattori che determinano una riduzione della vita utile del sistema sono essenzialmente tre: corrosione dei materiali, aumento di resistenza interna, perdita di capacità. Tali meccanismi di degradazione si manifestano essenzialmente con l'operatività della cella, non sono dunque particolarmente attivi in caso di inattività della stessa. Appositi esperimenti che hanno sottoposto le celle ad un elevatissimo numero di cicli e hanno messo in evidenza, oltre all'aumento di resistenza e alla riduzione di capacità, la



formazione di prodotti di corrosione in particolare sulle guarnizioni messe a tenuta dell'anodo e sui conduttori metallici esposti al contatto con le reazioni [10].

## 2.4 La temperatura operativa e i meccanismi di degradazione

Nel paragrafo appena concluso è stato fatto qualche cenno alla vita utile e ai meccanismi di degradazione agenti sul sistema. Tali aspetti sono ora approfonditi prendendo in considerazione la temperatura operativa della cella, una variabile molto importante nella caratterizzazione della tecnologia sodio-cloruro di nichel.

Una cella sodio-cloruro di nichel è anche denominata cella ad alta temperatura proprio perché ha delle specifiche **esigenze in termini di temperatura operativa**. In primo luogo, presenta un valore minimo ammissibile associato alla transizione di fase dell'elettrolita secondario NaAlCl<sub>4</sub>, che fonde a 154°C. In secondo luogo, presenta un valore massimo di 350°C associato alla necessità di evitare un'eccessiva dissoluzione di FeCl<sub>2</sub> nello stesso elettrolita secondario, con conseguente danneggiamento della β''- allumina e aumento della resistenza interna del sistema. Fissati i limiti estremi, la scelta del valore effettivo a cui mantenere il sistema deve considerare la conduttività ionica dell'elettrolita primario, che aumenta con la temperatura: a 260°C tale conduttività si attesta sui 0,2S·cm<sup>-1</sup>, mentre a 350°C sarebbe già 0,4S·cm<sup>-1</sup>. Sulla base di tutte queste valutazioni, una cella nella pratica lavora a circa 275°C ammettendo generalmente un aumento di temperatura fino a 330°C in caso di elevate correnti di scarica.

Tutte queste considerazioni da un lato giustificano la necessità di inserire nel modulo dei riscaldatori ohmici, indispensabili per portare il sistema in temperatura e mantenerlo tale. Dall'altro lato però sono responsabili di un vantaggio di questa tecnologia dal momento che il suo funzionamento risulterà sostanzialmente indipendente dalla temperatura ambiente [11,26].

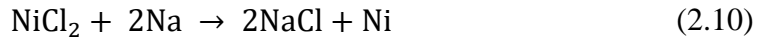
Prima di entrare nel dettaglio degli andamenti di temperatura e delle problematiche derivanti dalla scelta di tale parametro, è bene dare un **inquadramento teorico agli aspetti termici** che caratterizzano il sistema. Ricorrendo a tal proposito ad un approccio prettamente termodinamico, è possibile descrivere il sistema con la seguente equazione:

$$-\Delta H^\circ = -\Delta G^\circ - T\Delta S^\circ \quad (2.9)$$

- $-\Delta H^\circ$       Energia rilasciata dalla reazione di scarica (esotermica) se questa si sviluppasse per semplice miscelamento dei reagenti
- $-\Delta G^\circ - T\Delta S^\circ$       Energia rilasciata dalla reazione di scarica che avviene all'interno di un sistema elettrochimico reversibile
- $-\Delta G^\circ$       Energia disponibile sul circuito esterno come flusso di cariche che si muovono tra una differenza di potenziale
- $-T\Delta S^\circ$       Energia liberata internamente alla cella, che si denomina "calore reversibile".

## 2. La tecnologia sodio – cloruro di nichel (NaNiCl<sub>2</sub>)

Per fissare meglio le idee, la descrizione dei termini dell'equazione (2.9) è stata riferita alla reazione di scarica complessiva qui riportata, ottenuta sommando le reazioni (2.2) e (2.3):



È interessante notare che il calore reversibile non si libera in modo uniforme all'interno della cella, bensì per il 20% all'elettrodo NiCl<sub>2</sub>, e la restante parte tutta nel comparto del sodio, che sarà quindi la regione della cella interessata da incrementi di temperatura più significativi. Come il nome lascia intendere, tale energia è liberata nel corso di una scarica reversibile, ed è assorbita nella stessa quantità durante una carica reversibile, che dunque risulterà un processo endotermico.

Questi contributi però non sono gli unici che concorrono al bilancio termico del sistema, in quanto a fianco al calore reversibile compare anche un termine di dissipazione, denominato appunto “calore irreversibile”. Quest'ultimo contributo energetico è associato alle diverse irreversibilità interne al sistema, quali dissipazioni per effetto Joule, irreversibilità negli elettrodi, ecc., e può essere modellizzato come la potenza dissipata, sempre per effetto Joule, su una resistenza così calcolata:

$$R = \frac{E^\circ - E}{I} \quad (2.11)$$

E, I      Tensione e corrente misurate sulla cella operativa

E°      Tensione di circuito aperto

Il calore irreversibile, a differenza del precedente, non cambia segno con la corrente ma rappresenta sempre un termine dissipativo e, in relazione alla corrente di scarica e alle irreversibilità presenti, parte da essere un 10% di quello reversibile nei casi migliori, fino a diventare anche maggiore di quest'ultimo [21].

In considerazione della trattazione teorica appena conclusa e con riferimento alla Fig. 2.12, è possibile ora esprimere qualche breve considerazione in merito all'**andamento di temperatura della cella durante il suo funzionamento**. Tale variabile risulta generalmente funzione del SoC e del C-rate.

Tali grafici mostrano chiaramente come il C-rate del processo di scarica determina l'incremento di temperatura a cui è soggetto il sistema. Dunque, in considerazione dell'esistenza di un massimo ammissibile per la temperatura, ogni batteria avrà anche un C-rate massimo con cui può essere scaricata.

Durante un processo di carica invece, ricordando che la reazione è endotermica ma sono comunque presenti le dissipazioni interne, spesso è necessario attivare i riscaldatori per mantenere il sistema alla temperatura operativa prefissata. Tali riscaldatori intervengono ovviamente anche in caso di scariche molto lente e in caso di stand-by di una certa durata, in modo da compensare le dissipazioni verso l'ambiente.

## 2. La tecnologia sodio-cloruro di nichel ( $\text{NaNiCl}_2$ )

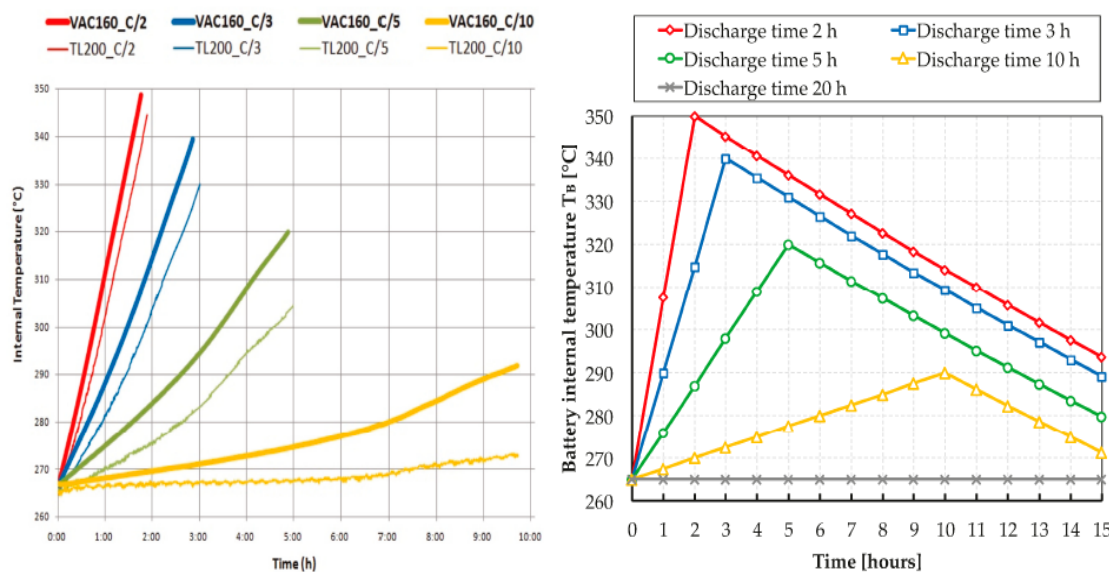


Figura 2.12 Andamento di temperatura e resistenza interna per diverse prove di scarica su una batteria FZSONICK

L'energia necessaria al loro funzionamento è prelevata direttamente dalla batteria: tale contributo energetico risulterà allora particolarmente impattante sull'efficienza complessiva del sistema [13].

Alla luce di tutte le considerazioni espresse in merito alla temperatura, è possibile analizzare i **meccanismi di degradazione** a cui la cella è soggetta; la temperatura infatti è una variabile chiave nello sviluppo di questi meccanismi, pertanto il suo valore può avere ripercussioni sulla vita utile di tutto il sistema.

La scelta di mantenere la cella a temperature di poco inferiori ai  $300^{\circ}\text{C}$  per migliorare la conduttività dell'elettrolita e dunque le performance elettrochimiche, comporta un progressivo decadimento nelle prestazioni a causa dell'insorgere di alcuni fenomeni che è bene enunciare. In primo luogo, si ha l'accrescimento delle particelle di nichel e cloruro di sodio, che sono causa di una riduzione di siti attivi e rispettivamente di una maggiore resistenza ohmica e maggiori perdite di polarizzazione. In secondo luogo, vi sono delle reazioni che si sviluppano internamente al catodo [23].

Alcuni studi [23] hanno provato a valutare il funzionamento della cella a diverse temperature, partendo dai valori consueti e scendendo progressivamente fino a  $175^{\circ}\text{C}$ , in modo da rispettare comunque il valore minimo ammissibile. I risultati hanno mostrato che le celle operanti a bassa temperatura soffrono di maggiori perdite di polarizzazione, in particolare verso la fine della scarica, a causa di una bassa conduttività ionica dei due elettroliti e della bassa bagnabilità del sodio sulla  $\beta''$ -allumina. Al tempo stesso però tali perdite di polarizzazione sono molto più stabili nel corso della vita utile del sistema, rimanendo sostanzialmente invariate con un dato numero di cicli. Utilizzando invece il solito valore di temperatura, tali perdite andrebbero a crescere del 55% se confrontate a parità di cicli. A bassa temperatura dunque l'accrescimento delle particelle e la conseguente riduzione di siti attivi risultano fortemente limitati, ma per utilizzare tali

## 2. La tecnologia sodio – cloruro di nichel ( $\text{NaNiCl}_2$ )

valori a livelli commerciali sono indubbiamente necessari sviluppi sugli elettroliti e sulla loro conduttività ionica.

Altri studi invece [26] hanno seguito una procedura duale a quella appena descritta, analizzando una cella operante a  $260^\circ\text{C}$  e una operante a  $350^\circ\text{C}$ , valore massimo ammissibile per la tecnologia. I risultati hanno mostrato una evidente degradazione a prescindere dal valore di temperatura utilizzato, seppur con meccanismi diversi. La cella a  $260^\circ\text{C}$  ha mostrato una minore resistenza per un certo numero di cicli, superato il quale tale resistenza ha iniziato a crescere portando rapidamente il sistema a perdere operatività. Le analisi condotte al termine della prova hanno spiegato quanto accaduto con la formazione di uno strato ad alta resistività costituito da particelle di  $\text{AlF}_3$  depositate sulla  $\beta''$ -allumina. La cella a  $350^\circ\text{C}$  non ha manifestato la stessa modalità di rottura improvvisa, bensì ha mostrato progressivamente una elevata resistenza interna e un'importante perdita di capacità per l'accrescimento delle particelle di nichel, incentivato dall'elevata temperatura operativa e dalla dissoluzione di  $\text{NiCl}_2$  nell'elettrolita secondario.

In conclusione, per attenuare la perdita di capacità della cella associata all'accrescimento delle particelle di nichel, è bene caricare nel sistema un eccesso di tale materiale, così da ridurre l'impatto che tale meccanismo ha sulla vita utile. Tale accorgimento consente contestualmente di affievolire l'accrescimento delle particelle di  $\text{NaCl}$ , principale responsabile della degradazione della cella, che si manifesta con cicli di carica e scarica caratterizzati da importanti variazioni di SoC [27].

### 2.5 La cella e la fine del suo ciclo di vita

A questo punto della trattazione, avendo ormai delineato funzionamento, caratteristiche costruttive e meccanismi di degradazione delle celle, si analizza brevemente la fine del loro ciclo di vita, delineando quindi la possibilità di riciclo dei diversi materiali o eventualmente il loro smaltimento. Tale tematica infatti, oltre ad essere rilevante in termini di impatto ambientale, ha effetti anche sul costo della tecnologia dal momento che i costi di smaltimento sono caricati sul prezzo di acquisto. Riciclare i materiali per le celle nuove o vendere sul mercato quelli recuperati da quelle vecchie può allora contribuire a ridurre il costo della tecnologia, aspetto cruciale per competere con le quelle convenzionali che già detengono le proprie quote di mercato.

Entrando nel dettaglio dei diversi componenti, è bene premettere che, a differenza di altre tecnologie, tutti i materiali sono recuperabili; dunque, almeno dal punto di vista teorico, nulla richiederebbe un apposito processo di smaltimento. Partendo dall'esterno del modulo, l'involucro in acciaio inossidabile e la lana di vetro ( $\text{SiO}_2$ ) che rappresenta l'isolante termico possono essere direttamente riciclati con appositi processi. È possibile poi recuperare dei sali di nichel, che si possono rivendere senza problemi dato il loro elevato valore di mercato. I materiali rimanenti, quali nichel, ferro, altri sali e la ceramica, possono essere recuperati tramite il processo di produzione dell'acciaio inossidabile semplicemente unendoli alla fusione dell'acciaio [2,9,11].

Secondo alcuni studi il valore dei materiali recuperati è tale da coprire il costo sostenuto per il processo di recupero degli stessi. Non vi dovrebbero dunque essere costi aggiuntivi da considerare nel calcolo del prezzo di vendita del prodotto [22].

## 2.6 Vantaggi e svantaggi

A scopo di sintesi di tutto quanto finora esposto, si elencano ora quali sono i vantaggi e gli svantaggi che caratterizzano la tecnologia sodio-cloruro di nichel.

I vantaggi sono i seguenti:

- Ottime caratteristiche di sicurezza sia in fase operativa sia in situazioni estreme (urti, vibrazioni, corto circuito, immersione in acqua, esposizione a incendi): le celle non sono mai causa di incendi, esplosioni o sversamenti di sostanze pericolose in ambiente. Per le batterie agli ioni di litio invece questa caratteristica rappresenta ancora una sfida.
- Nessuna emissione in ambiente derivante dal funzionamento. È consentita dunque l'installazione in luoghi chiusi senza particolari accorgimenti.
- Semplicità di installazione: tutto quanto necessario al funzionamento è contenuto nel modulo; non sono richiesti componenti ausiliari esterni ad esso.
- Riciclabilità di tutti i componenti in un processo efficiente e quindi sostenibile dal punto di vista dei costi: non ci sono spese extra per l'utilizzatore finale.
- Zero manutenzione: la capacità del sistema di far fronte ai guasti consente di progettare dispositivi che non dovrebbero richiedere manutenzione nel corso della vita utile. Eventuali guasti potrebbero comunque condizionare la disponibilità del sistema e le sue prestazioni operative.
- Funzionamento indipendente dalle condizioni ambiente: le celle possono funzionare in un ampio range di temperatura ambiente (a meno delle specifiche richieste dall'elettronica di potenza installata internamente), non ponendo quindi particolari vincoli sul luogo di installazione. Con i riscaldatori e fan di raffreddamento (dove presente: applicazioni automotive) il sistema gestisce autonomamente la sua temperatura.
- Elevata potenza di picco indipendentemente dallo stato di carica.
- Efficienza di Coulomb unitaria: l'elevata resistività elettrica dell'elettrolita ceramico impedisce internamente il transito di elettroni e dunque inibisce le reazioni di autoscarica.
- Vita utile elevata: 15 anni e 4500 cicli (all'80% DoD), caratteristica particolarmente invidiata dalle celle al piombo che non raggiungono un numero di cicli così elevato.

Lo svantaggio principale invece, è sicuramente associato alla necessità del sistema di mantenersi in temperatura, che lo costringe a dissipare su dei riscaldatori una parte

## 2. La tecnologia sodio – cloruro di nichel (NaNiCl<sub>2</sub>)

dell'energia stoccata al suo interno, in modo da compensare le dissipazioni verso l'ambiente (che dipenderanno chiaramente dalla temperatura dell'ambiente stesso). Per limitare l'impatto che questo assorbimento di energia ha sulle prestazioni della batteria e sul suo rendimento è opportuno mantenere il sistema costantemente in attività, o perlomeno evitare lunghi periodi di stand-by [12,13].

Il fatto che qui siano elencati moltissimi vantaggi a fronte di un solo svantaggio non deve far credere che tale tecnologia sia eccezionale, altrimenti si sarebbe diffusa già da tempo sul mercato e avrebbe fatto concorrenza alle batterie agli ioni di litio, che invece oggi detengono il ruolo principale tra i sistemi di accumulo elettrochimico. Tale svantaggio infatti risulta estremamente penalizzante sul rendimento del sistema e non consente di stoccare energia per lunghi periodi, in quanto il continuo prelievo di energia per il mantenimento della temperatura si comporterebbe al pari di un'autoscarica e andrebbe progressivamente a ridurre lo stato di carica del sistema fino ad azzerarlo.

### 2.7 La tecnologia oggi: applicazioni, costi e prospettive future

Al giorno d'oggi le batterie sodio-cloruro di nichel non rappresentano la tecnologia più diffusa sul mercato né tantomeno quella maggiormente consolidata, tuttavia, non solo hanno già raggiunto una maturità tale da essere una tecnologia commerciale in alcuni settori ma, grazie alle caratteristiche prima elencate, stanno trovando uso in ambito energy storage, energy backup e mobilità sostenibile, sia in applicazioni stazionarie sia nel settore trasporti.

Per descrivere come la tecnologia è utilizzata nei diversi settori, è bene partire dalle **applicazioni stazionarie**, ricordando che con questo termine si considerano tutte quelle applicazioni in cui il sistema di accumulo (BESS) lavora in modo integrato alla **rete elettrica**. In tale campo vi sono utilizzi sia in modo distribuito presso le utenze finali, sia su larga scala, ossia installazioni concentrate di una notevole capacità tipicamente in corrispondenza della rete di trasmissione. Tali aspetti saranno approfonditi anche nel capitolo 4.

Prima di fare riferimento alle installazioni pratiche, è bene aver chiara una macro-classificazione delle applicazioni che afferiscono a questo ambito.

Si parla di applicazioni energy intensive, o applicazioni in energia, nel momento in cui si richiede al sistema elettrochimico la possibilità di caricarsi o scaricarsi per tempi lunghi. Di contro si parla di applicazioni power intensive, o applicazioni in potenza, quando il sistema deve avere la capacità di caricarsi e scaricarsi in tempi molto rapidi, mettendo quindi a disposizione della rete una certa potenza e concorrendo quindi ad incrementarne l'energia regolante; quest'ultima infatti è in diminuzione per la crescente diffusione di impianti da fonte rinnovabile. A seconda dell'applicazione si hanno diversi utilizzi e diversi servizi che possono essere forniti alla rete elettrica stessa; la Fig. 2.13 ne offre una panoramica [2].

## 2. La tecnologia sodio-cloruro di nichel (NaNiCl<sub>2</sub>)

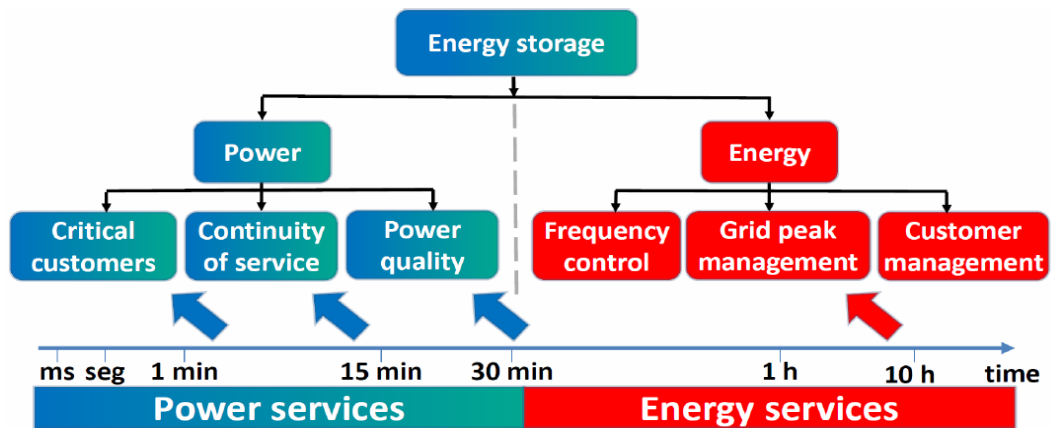


Figura 2.13 Possibili applicazioni dei sistemi BESS

Con questa breve introduzione ai diversi tipi di applicazioni, è ora possibile presentare alcuni casi pratici che hanno visto l'impiego della tecnologia sodio-cloruro di nichel in ambito stazionario, sebbene nella maggior parte dei casi si tratti ancora di progetti pilota e attività di ricerca.

- In merito alle applicazioni power intensive, Terna ha da tempo avviato un progetto pilota per aumentare la sicurezza del sistema elettrico nazionale sfruttando le potenzialità e i rapidi tempi di intervento offerti dai sistemi di accumulo elettrochimico. Tale progetto, denominato “Storage Lab”, è attualmente già in fase di sperimentazione e prevede nel tempo la progressiva installazione di sistemi di accumulo per 16MW tra diverse tecnologie (ioni di litio, sodio-cloruro di nichel, batterie a flusso e supercapacitori), da effettuarsi nella città di Codrongianos (Sardegna, Fig. 2.14) e Ciminna (Sicilia). Per quanto concerne la tecnologia in analisi, attualmente sono installati 3,4 MW [28].



Figura 2.14 Installazione di batterie NaNiCl<sub>2</sub> a Codrongianos

- Per quanto riguarda le applicazioni energy intensive realizzate con tecnologia sodio-cloruro di nichel, troviamo la “FIAMM energy storage island” situata nell'impianto FIAMM di Almisano (VI). Il sistema installato comprende un impianto fotovoltaico di circa 180 kWp connesso a un sistema di supervisione e controllo. Questo consente di alimentare i carichi dello stabilimento (30-80kW) e si interfaccia sia con la rete di distribuzione sia con un sistema di accumulo



## 2. La tecnologia sodio – cloruro di nichel (NaNiCl<sub>2</sub>)

modulare NaNiCl<sub>2</sub> di 230 kWh con lo scopo di gestire carichi e picchi di generazione, regolando la potenza immessa in rete [29].

- Vi sono altre installazioni di minore importanza nel contesto italiano, date le rispettive caratteristiche tecniche. Tra queste si cita l'impianto di Sant'Alberto (RA) realizzato dalla Tozzi Green. Nei pressi di un'azienda che si occupa di produzione casearia e allevamento di ovini è stata installata una microgrid con una turbina eolica da 7kW, un impianto fotovoltaico da 17kW e un sistema di accumulo sodio-cloruro di nichel da 35kW con lo scopo di rendere l'azienda autosufficiente dal punto di vista energetico [30].
- Considerando ora un contesto europeo, un progetto INES (Institut National de l'Énergie Solaire) - CEA (Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives) ha portato all'installazione di batterie sodio-cloruro di nichel nel Rodano-Alpi, una regione nel sud-est della Francia, per una potenza nominale di 120 kW con funzione di time shifting dell'energia prodotta da impianti rinnovabili (31).
- Spostandosi invece su scala mondiale, il "Rankin energy storage system" della Duke Energy in North Carolina (USA), è costituito da 282kWh/402kW di batterie NaNiCl<sub>2</sub> collegate all'uscita di una sottostazione di distribuzione a 12,47kV. Dal 2012, lavora sullo smorzamento delle fluttuazioni di potenza che caratterizzano la produzione di alcuni impianti fotovoltaici presenti nelle vicinanze (1,2MW), a cui non è però direttamente collegato. Effettua anche gestione di potenza attiva e reattiva per la regolazione di tensione e il controllo del fattore di potenza [32].
- Particolarmente interessante data la potenza installata è l'impianto Toucan sulla costa della Guiana Francese, dove 5MWp di pannelli fotovoltaici sono accoppiati a 1,6 MW di batterie sodio-cloruro di nichel, in modo che tutto l'impianto contribuisca alla stabilità della rete elettrica nazionale [33].

Rimanendo sempre nell'ambito delle applicazioni stazionarie ma muovendosi nel settore energy backup, la tecnologia in analisi grazie alla sua elevata affidabilità risulta particolarmente apprezzata nel settore delle telecomunicazioni. In primo luogo, risulta interessante per stazioni radio base, ripetitori a microonde, sistemi di trasmissioni via cavo e a fibra ottica, sia che questi lavorino connessi alla rete oppure in isola. In secondo luogo, la capacità di erogare grandi correnti di scarica rende la tecnologia interessante per centri di elaborazione dati e sale di controllo, con lo scopo di garantire la continuità nell'alimentazione dei calcolatori [34].

A questo punto è possibile prendere in considerazione le **applicazioni non stazionarie**, ossia l'utilizzo della tecnologia in ambito automotive e più in generale nell'intero settore trasporti. Si ricorda infatti che la tecnologia ZEBRA storicamente è nata per tale settore, solo successivamente si è evoluta e ha trovato impiego in applicazioni stazionarie. Nel settore trasporti risulta allora più consolidata e propone soluzioni commerciali, consentendo di realizzare veicoli ibridi oppure totalmente elettrici, e risultando particolarmente apprezzata per alcune delle sue caratteristiche: buona energia specifica,



sicurezza, funzionamento indipendente dalle condizioni ambiente, lunga vita utile, assenza di manutenzione. Permette di realizzare sia auto che veicoli di grossa taglia, anche se le sue quote di mercato riguardano principalmente veicoli commerciali e vetture per il trasporto pubblico [35]. Ne sono un esempio il furgone Daily electric della IVECO, caratterizzato da un'autonomia dichiarata fino a 280km (NEDC, New European Driving Cycle) e da una fast charge di due ore, e l'autobus Irizar i2e, dell'omonima casa produttrice spagnola, che monta batterie FIAMM da 376kWh con un tempo di ricarica di sei ore.

Oltre a questi veicoli tradizionali, altre due applicazioni afferiscono al settore trasporti. Le batterie sodio-cloruro di nichel stanno iniziando a trovare impiego anche su mezzi di estrazione mineraria: proprio per un ambiente critico come una miniera, un mezzo a zero emissioni, con una batteria ad elevata affidabilità e caratterizzata da sicurezza intrinseca, non può che risultare particolarmente adeguato. Infine, tali batterie trovano utilizzo nel settore ferroviario come dispositivi di backup per i sistemi di bordo e per la segnaletica dell'infrastruttura [34].

A conclusione di questo paragrafo, è opportuno fare qualche cenno ai **costi della tecnologia** sulla base di quanto descritto in un report IRENA [36], dal momento che, per quanto una data tecnologia possa risultare estremamente apprezzabile in considerazione dei suoi vantaggi, il parametro che ne determina la diffusione sul mercato è proprio il suo costo specifico.

Pertanto, è possibile far riferimento alla Fig. 2.15 che mette chiaramente e confronto le principali tecnologie per la realizzazione di sistemi di accumulo elettrochimico in termini di numero di cicli nella vita utile e costo specifico all'unità di energia installata.

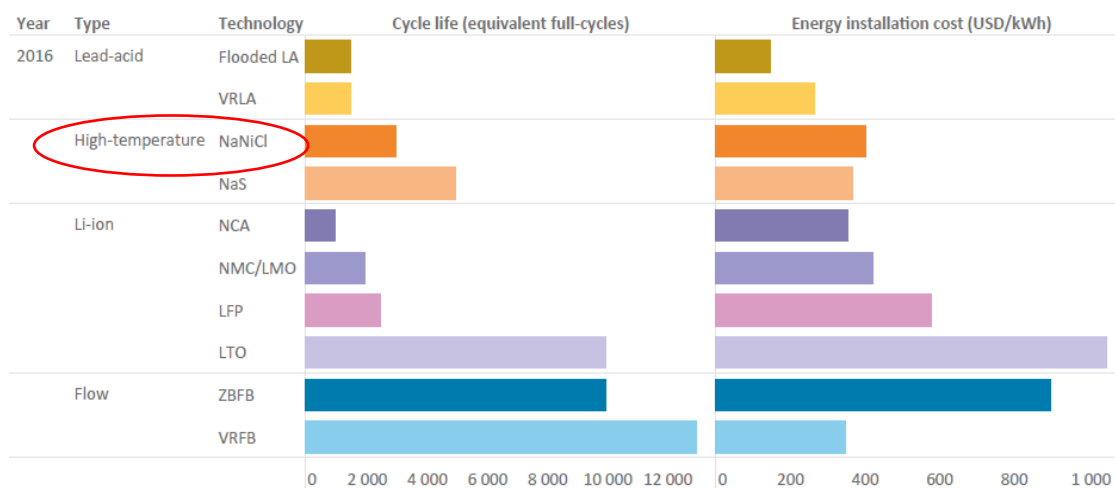


Figura 2.15 Numero di cicli e costo specifico di alcune tecnologie (riferimento anno 2016)

Si osserva che le celle ad alta temperatura, categoria a cui appartiene ovviamente la tecnologia sodio-cloruro di nichel, in generale manifestano un comportamento intermedio: da un lato hanno dei costi di installazione competitivi e ragionevoli (circa 400USD/kWh), pur non essendo i più bassi in assoluto, e al tempo stesso manifestano la capacità di funzionare per un buon numero di cicli, risultando sicuramente un buon

## 2. La tecnologia sodio – cloruro di nichel (NaNiCl<sub>2</sub>)

compromesso tra i due aspetti. Chiaramente non solo questi due aspetti determinano la scelta di una tecnologia per una data applicazione: è necessario di volta in volta valutare attentamente tutte le caratteristiche tecniche descritte in precedenza, prestando sempre attenzione alle esigenze specifiche del dispositivo o dell'impianto che la batteria dovrà alimentare.

A conclusione dell'interno capitolo sulla tecnologia sodio-cloruro di nichel, è bene delineare quali sono le sue **prospettive di sviluppo** [36]. A tal proposito è possibile far riferimento alla Fig. 2.16 per quanto riguarda le previsioni sull'andamento dei costi, e alla Fig. 2.17 in merito alla possibile evoluzione delle specifiche tecniche.

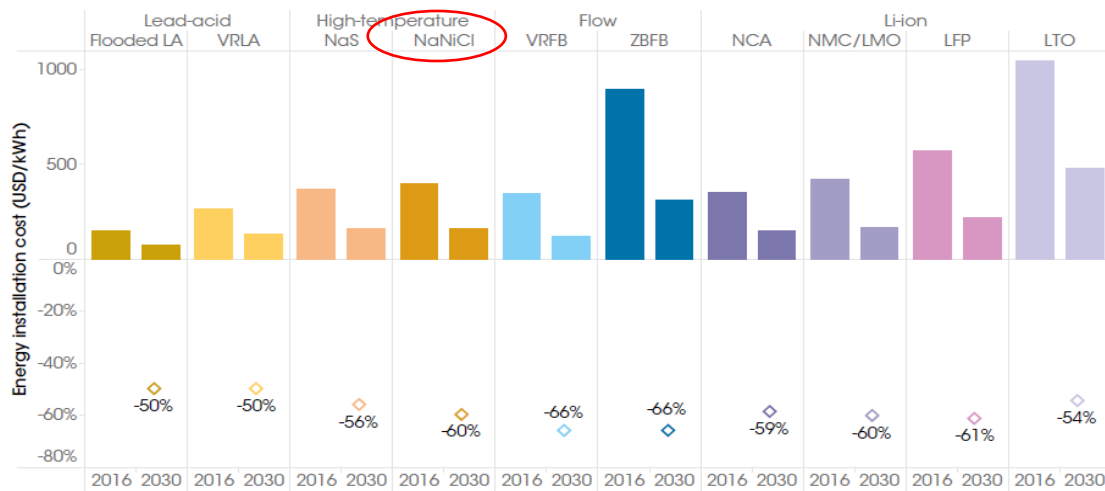


Figura 2.16 Costi di installazione delle diverse tecnologie: valori attuali e stima al 2030

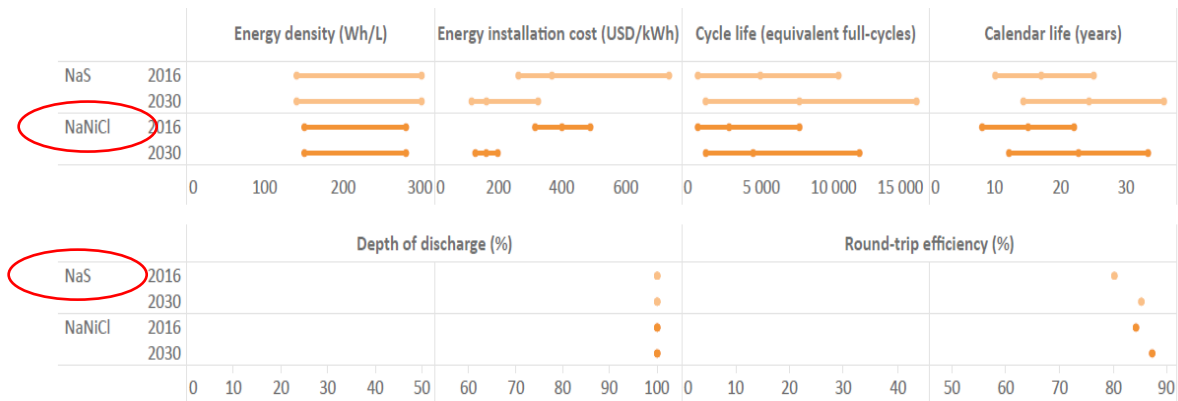


Figura 2.17 Caratteristiche tecniche delle celle ad alta temperatura e loro stima al 2030

Per quanto concerne l'andamento dei costi, si prevede che tutte le tecnologie risulteranno più economiche con riduzioni di costo comprese tra il 50% e il 66%, portandosi quasi tutte al di sotto dei 300USD/kWh. In tale scenario, le batterie sodio-cloruro di nichel vedranno ridursi il loro costo del 60%, tenendo quindi un buon trend rispetto alle altre. Parallelamente alla riduzione di costo si assisterà anche ad uno sviluppo tecnologico che porterà ad un miglioramento delle diverse performance.

Per ottenere degli sviluppi significativi sul fronte dei costi e su quello delle caratteristiche tecniche, gli aspetti su cui concentrare la ricerca sono essenzialmente due: i meccanismi

di corrosione e la temperatura operativa della cella. In merito alla corrosione, questo è di per sé un problema critico per tutti i sistemi che lavorano in temperatura dal momento che è causa di invecchiamento. Servono pertanto materiali più robusti o nuovi rivestimenti che riescano a preservare i componenti dall'azione degradante di questi meccanismi. Per quanto riguarda invece l'aspetto termico, l'obiettivo deve essere quello di garantire una buona conduttività ionica dell'elettrolita anche a temperature nettamente più basse di quelle utilizzate oggi. Su questo fronte alcune alternative sono già oggetto di ricerca e valutano diverse soluzioni: vi è la possibilità di realizzare una copertura all'elettrolita per prevenire il contatto con l'umidità e quindi la formazione di strati particolarmente resistivi, oppure si può alterare il comparto anodico con degli additivi, o eventualmente modificare la cella da un punto di vista strutturale. L'idea più innovativa però si basa sulla possibilità di sostituire direttamente la  $\beta''$ - allumina con un nuovo materiale a conduttività ionica estremamente elevata, realizzando una cella che lavora interamente allo stato solido e che quindi non richiede temperature elevate.

Da un punto di vista di mercato, sarebbe auspicabile anche la nascita di nuovi costruttori di queste batterie, oggi prodotte esclusivamente dalla FZSoNick. Nuove aziende potrebbero portare innovazione e dare impulso al mercato: in presenza di società concorrenti, ciascun produttore cercherebbe di sviluppare e personalizzare quanto più possibile la propria gamma di prodotti.

## 2. La tecnologia sodio – cloruro di nichel ( $\text{NaNiCl}_2$ )

### 3 I MODELLI DELLE BATTERIE SODIO-CLORURO DI NICHEL

Tutti i processi decisionali che portano all'installazione di sistemi di accumulo elettrochimico hanno generalmente un percorso preciso e definito, e si compongono di scelte di natura tecnico- ingegneristica e di un'analisi economica. Il punto di partenza è rappresentato chiaramente dal servizio che è richiesto al sistema di accumulo. Una volta scelta la taglia, si prendono in considerazione diversi dispositivi anche basati su tecnologie diverse e li si comparano in termini di densità di energia e densità di potenza, i parametri chiave per un sistema di accumulo. In questo modo è possibile valutare la loro capacità di sostenere lunghi periodi di carica o scarica, piuttosto che di fornire elevate correnti di picco. Dopodiché se ne valuta l'efficienza, in modo tale da inquadrare le prestazioni del sistema nello stoccaggio di energia. Alla luce delle scelte tecniche, si dà spazio alle considerazioni economiche per valutarne la fattibilità e la sostenibilità sul piano finanziario: si considerano quindi sia il costo di investimento associato all'acquisto del sistema di accumulo, sia i costi operativi dovuti al rendimento e alla vita utile del sistema stesso, nonché quelli per il funzionamento degli apparati ausiliari.

Il contesto appena delineato però dà per scontata la disponibilità di dati relativi al sistema di accumulo e alle sue prestazioni, ma soprattutto la veridicità delle stesse. Per molte tecnologie, in considerazione del loro sviluppo, tale disponibilità di informazioni si basa esclusivamente sui datasheet dei costruttori, contenenti risultati di prove condotte nei laboratori aziendali e delle quali raramente se ne descrive la procedura o il profilo di test utilizzato. Oggigiorno infatti non esistono procedure sufficientemente standardizzate per testare una batteria.

Scegliendo un dispositivo sulla sola base di queste informazioni, non si può che incombere in una differenza (non sempre trascurabile) tra le prestazioni dichiarate e quelle riscontrabili nell'applicazione reale, a discapito dell'utente finale e dell'analisi economica effettuata. Quest'ultima potrebbe rivelarsi infatti poco accurata o, nei casi peggiori, priva di ogni valore. A titolo di esempio è sufficiente pensare al caso in cui il sistema lavori per la regolazione primaria di frequenza: con cariche e scariche a C- rate estremamente variabile sarebbe difficile avere il medesimo rendimento calcolato a partire da una prova di laboratorio non ben caratterizzata. Un buon processo decisionale quindi dovrebbe prendere in considerazione le caratteristiche di diversi dispositivi (densità di potenza, rendimento, vita utile attesa e necessità di sistemi ausiliari) valutate su applicazioni affini a quelle dell'utente in analisi.

Dal punto di vista del costruttore risulta però impossibile realizzare molteplici datasheet a copertura di tutte le possibili condizioni operative. La soluzione sta allora nella ricerca e nello sviluppo, ad opera dello stesso costruttore o di un centro di ricerca, di un modello della specifica tecnologia di batteria. In questo modo, con un numero limitato di prove mirate si dispone di uno strumento che simula il funzionamento di quella tecnologia in

### 3. I modelli delle batterie sodio – cloruro di nichel

una qualsiasi condizione, in modo che il progettista disponga dei dati rappresentativi dell'applicazione di suo interesse.

La presenza di modelli è allora una condizione necessaria per la diffusione di una tecnologia [3].

#### 3.1 Le differenti tipologie di modello: accuratezza vs. onere computazionale

In base a quanto descritto a conclusione del precedente paragrafo, sembra che avendo a disposizione un modello si possa scegliere tranquillamente il sistema più adatto alla propria applicazione. Esistono tuttavia diverse categorie di modelli [3], pertanto bisogna saper scegliere quello più adatto a una specifica esigenza. I modelli infatti differiscono principalmente per il livello di dettaglio con cui riproducono il comportamento del sistema di accumulo: si parte da modelli che vedono il sistema come una “black box” e tramite apposite equazioni ne descrivono il funzionamento, fino ad arrivare a quelli che entrano nel dettaglio della fisica del problema e dei suoi meccanismi di funzionamento, analizzando i diversi aspetti elettrochimici che lo caratterizzano. È intuitivo capire come, al crescere del livello di dettaglio, si assiste ad un aumento dell'onere computazionale del modello e del suo tempo di esecuzione, a discapito della praticità di utilizzo. Con riferimento alla Fig. 3.1 si possono osservare i diversi approcci di modellazione in relazione all'accuratezza dei risultati forniti e al tempo richiesto per produrre tali risultati.

- *Modelli analitici.* Rappresentano l'approccio che richiede il minor tempo di simulazione, pertanto risultano particolarmente adatti alle fasi di pre-dimensionamento. Di contro, a causa della bassa accuratezza, possono dare errori anche grossolani nello stimare le prestazioni di un sistema. Non si basano su una rappresentazione fisica dei processi, quanto piuttosto cercano di riprodurre le caratteristiche principali (SoC e rendimento) tramite bilanci di energia ed equazioni derivanti da fitting di dati sperimentali.
- *Modelli stocastici.* Senza entrare nel dettaglio di questo approccio che esula dallo scopo della trattazione, l'assunzione di base è che i complessi meccanismi elettrochimici sono influenzati da variabili random come possono essere la temperatura ambiente e il profilo di utilizzo. Il funzionamento è descritto allora come una successione di stati, in pratica come una catena di Markov con un certo numero di stati di carica. Il numero di questi stati è legato alle unità di carica presenti nella batteria. Anche in questo caso non si entra nel merito della fisica dei fenomeni, tuttavia a differenza dell'approccio precedentemente descritto si ha una buona capacità di quantificare i parametri che descrivono la fine della carica e la fine della vita utile.
- *Modelli elettrici (o modelli a circuito elettrico).* Come il nome suggerisce, tali modelli si focalizzano sulle caratteristiche elettriche della batteria, riproducendo in modo dinamico tensione e corrente ai morsetti esterni del sistema. Per fare questo si rappresenta la batteria come un circuito elettrico equivalente in cui

compaiono diversi parametri: si parte dai circuiti più semplici con una resistenza in serie a un generatore ideale di tensione, per poi crescere di complessità aggiungendo in serie un numero crescente di rami con resistenze e capacità tra loro in parallelo. A differenza degli approcci precedenti, gli elementi circuitali possono essere rappresentativi di fenomeni che hanno luogo all'interno del sistema reale. Il risultato è una buona accuratezza dei risultati e soprattutto un ottimo compromesso tra accuratezza e onere computazionale. Questo risultato rende tale approccio uno dei più utilizzati in diversi settori, dal design di nuovi sistemi al controllo di batterie già operative: nel primo caso infatti serve per validare le scelte tecnologiche e il dimensionamento, nel secondo caso per stimare con la maggior accuratezza possibile la risposta a un dato set-point in potenza. Di contro è necessaria una grande quantità di dati per una corretta definizione degli elementi circuitali.

- *Modelli elettrochimici.* Si tratta dell'approccio di modellazione più completo dal momento che considera tutti i fenomeni fisici aventi luogo all'interno del sistema, e dunque è il metodo preferibile nella progettazione strutturale di una batteria. Al tempo stesso però tale modello ha un onere computazionale elevatissimo e risulta anche complesso da sviluppare: si devono considerare reazioni chimiche, bilanci di massa, energia e momento per ciascuna specie, ciascuna fase e ciascun elemento di una cella. Si basa infatti su sistemi di equazioni differenziali alle derivate parziali nello spazio e nel tempo. Il vantaggio inequivocabile è la capacità di descrivere nello spazio e nel tempo tutto ciò che concerne il sistema: concentrazioni, potenziale elettrico, flussi interni al sistema, temperatura, oltre che tensione e corrente ai morsetti esterni.

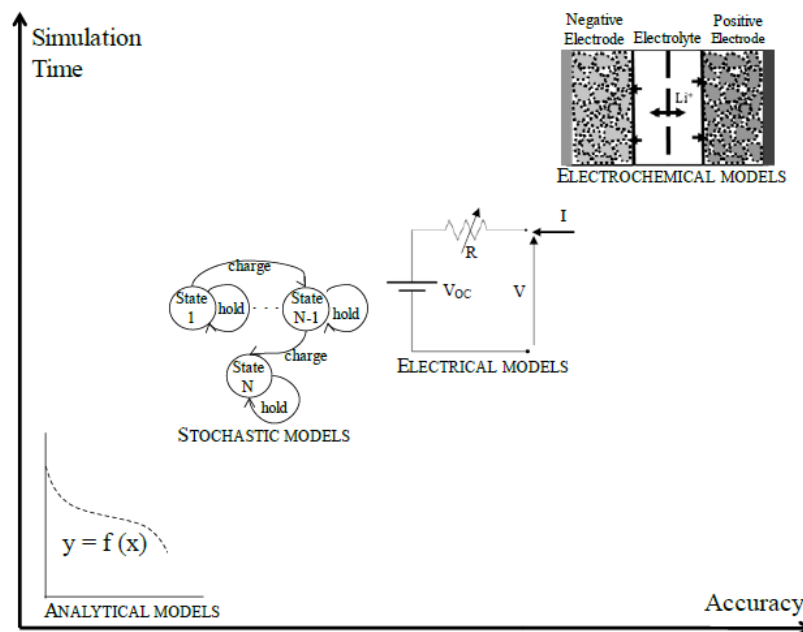


Figura 3.1 Accuratezza e tempo di simulazione per differenti approcci di modellazione

### 3. I modelli delle batterie sodio – cloruro di nichel

In relazione all'ottimo compromesso tra accuratezza dei risultati e onere computazionale, in questa trattazione si farà uso di un **modello elettrico** in ragione dell'opportunità di produrre una simulazione del comportamento delle celle elettrochimiche opportunamente accurata, come dettagliato nei paragrafi seguenti. Pertanto, si presentano ora i due principali modelli elettrici delle batterie sodio-cloruro di nichel presenti in letteratura, precisando che tale tipologia di modellazione è quella su cui vertono il maggior numero di pubblicazioni. Solo gli autori di [37] hanno provato a sviluppare un modello più affine all'ambito elettrochimico, pur mantenendo su alcuni aspetti una modellazione circuitale. Entrando nel merito dei modelli elettrici, è bene precisare che essi possono essere divisi in due categorie: modelli impedance-based e modelli Thévenin-based. Nei modelli impedance-based gli elementi circuitali sono ricavati tramite EIS (Electrochemical Impedance Spectroscopy) e si basano quindi su profili di tensione e corrente analizzati nel dominio delle frequenze. In quelli Thévenin-based si hanno opportune combinazioni di resistenze, capacità e generatori di tensione i cui valori sono derivati sempre da prove in tensione e corrente, condotte però nel dominio del tempo.

Con riferimento ai Thévenin-based, è bene precisare che si tratta di modelli più intuitivi e di più semplice derivazione, pertanto trovano maggiore diffusione nelle applicazioni pratiche. Per quanto riguarda gli elementi circuitali, non vi è una scelta univoca in merito al loro numero: più elementi si hanno nel circuito, migliore sarà l'accuratezza del modello, a discapito chiaramente del tempo necessario alla sua esecuzione. Nella pratica si ricorre a un generatore di tensione in serie a una resistenza nel momento in cui si vuole privilegiare la semplicità del modello, mentre si aggiungono anche due rami costituiti dal parallelo di una resistenza e una capacità nel caso limite in cui si voglia dare importanza alla sua accuratezza, in particolare sul funzionamento dinamico del sistema.

Solo in uno studio [38] per applicazioni automotive si utilizza una configurazione di circuito diversa da quelle qui presentate con lo scopo di tenere in considerazione sia il funzionamento della cella al nichel sia di quella al ferro. In questo caso però si ricorre anche a due generatori di tensione, dunque tale approccio esula dallo schema qui delineato e non si adatta agli scopi di questa trattazione.

Qualunque sia la topologia del circuito, nel caso più generale i valori di resistenze e capacità sono funzione di SoC, C-rate e temperatura, mentre il generatore di tensione, rappresentativo della tensione di circuito aperto erogata dalla batteria, dipende essenzialmente dal SoC e dalla direzione della corrente [12].

In considerazione della panoramica sui modelli appena presentata e delle motivazioni che spingono a preferire quelli elettrici, i prossimi paragrafi sono dedicati proprio alla descrizione di due modelli elettrici pubblicati in letteratura per la tecnologia sodio – cloruro di nichel. Seguendo l'ordine di presentazione, il primo utilizza come circuito equivalente un generatore di tensione connesso in serie a una resistenza; per tale motivo lo si denomina "Modello equivalente di Thévenin". Il secondo invece aggiunge alla topologia del precedente anche una serie di due rami RC, e lo si denomina pertanto "Modello equivalente di Thévenin con rami RC". La ragione della scelta di questi due



modelli considera che, tra i pochi presenti in letteratura, nessuno definisce così nel dettaglio la procedura seguita per ricavare i valori degli elementi circuitali.

### 3.2 Modello equivalente di Thévenin

Il primo modello elettrico che si è scelto di presentare è stato sviluppato per una singola cella sodio-cloruro di nichel e il suo circuito elettrico equivalente è costituito da un generatore di tensione collegato in serie a una resistenza. Le sue peculiarità consistono nell'obiettivo di rappresentare tutte le celle afferenti a questa tecnologia e nell'ambizione di simularne il comportamento con qualunque profilo di funzionamento imposto. Per perseguire la prima caratteristica, i suoi elementi circuitali, a parità delle variabili da cui essi dipendono, devono avere variazioni molto contenute se ricavati per celle diverse. Di conseguenza, la necessità di tenere sempre controllato questo aspetto impone di limitare il numero degli stessi elementi circuitali al minimo essenziale, ossia a un generatore di tensione in serie a una resistenza; quest'ultima sarà rappresentativa soprattutto delle resistenze ioniche interne al sistema.

Per avere invece dei risultati accurati indipendentemente dal profilo imposto, il modello completo è stato sviluppato in due step successivi. Dapprima è stato realizzato un cosiddetto "modello stazionario" con l'obiettivo di simulare il comportamento della cella in applicazioni energy intensive, ossia applicazioni in cui si hanno lunghi periodi di carica o scarica (3÷5h), con corrente costante o variabile, senza però avere una transizione tra i due regimi. Questo è stato poi sviluppato ottenendo un nuovo modello, denominato "modello transitorio", in modo da rappresentare anche il funzionamento della cella in applicazioni power intensive e dunque in situazioni di transitorio, ossia con repentini passaggi da regimi di carica a regimi di scarica e viceversa. L'aspetto interessante è che tale implementazione non ha richiesto l'aggiunta di elementi capacitivi al circuito equivalente, necessari solo, secondo gli autori, a descrivere dinamiche più veloci (con tempi caratteristici inferiori al secondo) di quelle richieste nell'applicazione per cui il modello è progettato, ossia l'integrazione delle fonti rinnovabili nella rete di trasmissione. Il passaggio al nuovo modello si è basato esclusivamente su considerazioni inerenti al funzionamento fisico della cella, che hanno consentito di identificare un nuovo parametro che influenza il valore degli elementi circuitali [2].

Si descrive ora il **modello stazionario** [8]. Su una cella FIAMM (2,6 V – 38 Ah) con BMS disattivato al fine di eliminare la sua influenza sull'esito dei test, mantenendo tuttavia il controllo della temperatura minima, sono state condotte opportune prove sperimentali da cui poter estrarre i valori degli elementi circuitali al variare dei parametri illustrati in Fig. 3.2 in riferimento ad un processo di scarica. La tensione di circuito aperto (OCV) è funzione del solo DoD ( $\text{DoD} = 100 - \text{SoC}$ ), seppur richiederà una piccola correzione in funzione della temperatura, mentre la resistenza interna e la temperatura sono funzioni di DoD e C-rate. Nella carica invece queste dipendenze subiscono delle semplificazioni: in primo luogo la temperatura tende a mantenersi costante poiché il carattere endotermico delle reazioni compensa le dissipazioni interne, dunque questa variabile non deve essere più considerata, in secondo luogo si osserva sperimentalmente

### 3. I modelli delle batterie sodio – cloruro di nichel

che il C-rate non influenza più il valore di resistenza interna. L'OCV si mantiene funzione del solo DoD, tuttavia con il segno della corrente cambia anche il legame funzionale. Una volta caratterizzati i diversi parametri in funzione DoD e C-rate, si racchiude il tutto in apposite matrici che consentiranno tramite interpolazione doppia o singola di dedurre il valore di OCV, resistenza interna e temperatura in tutte le possibili condizioni di funzionamento. Si può quindi entrare nella logica operativa del modello, rappresentata in Fig. 3.3.

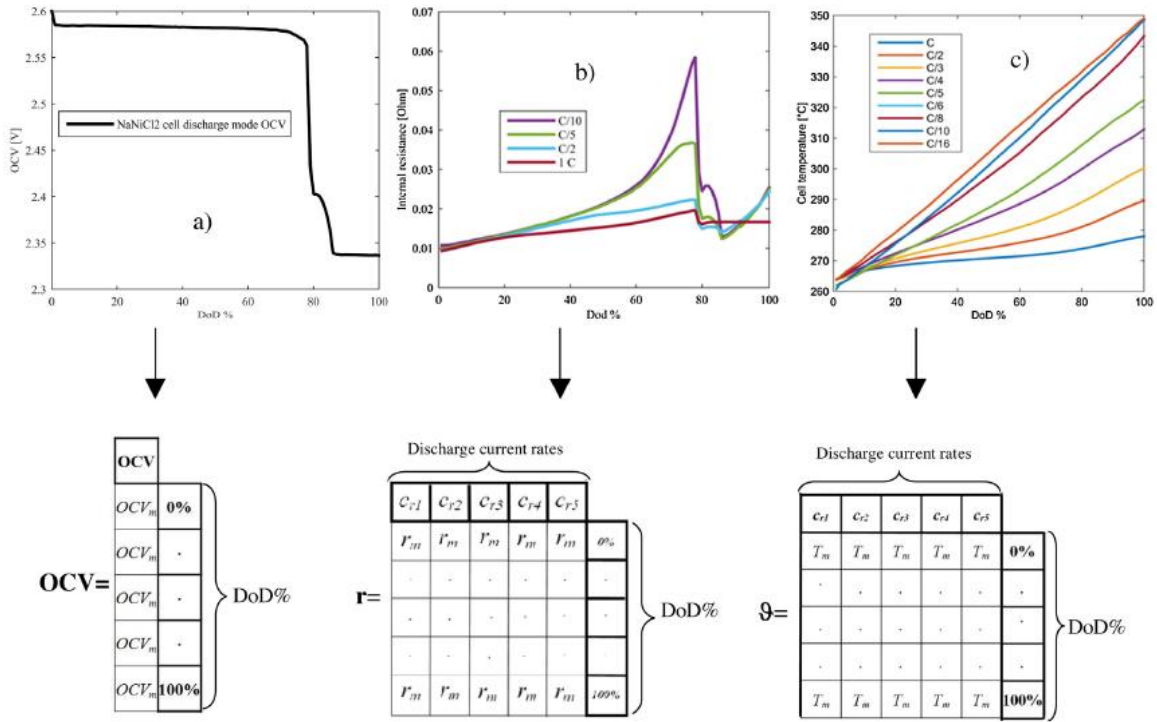


Figura 3.2 Rappresentazione grafica e matriciale di OCV, resistenza interna e temperatura nel modello stazionario

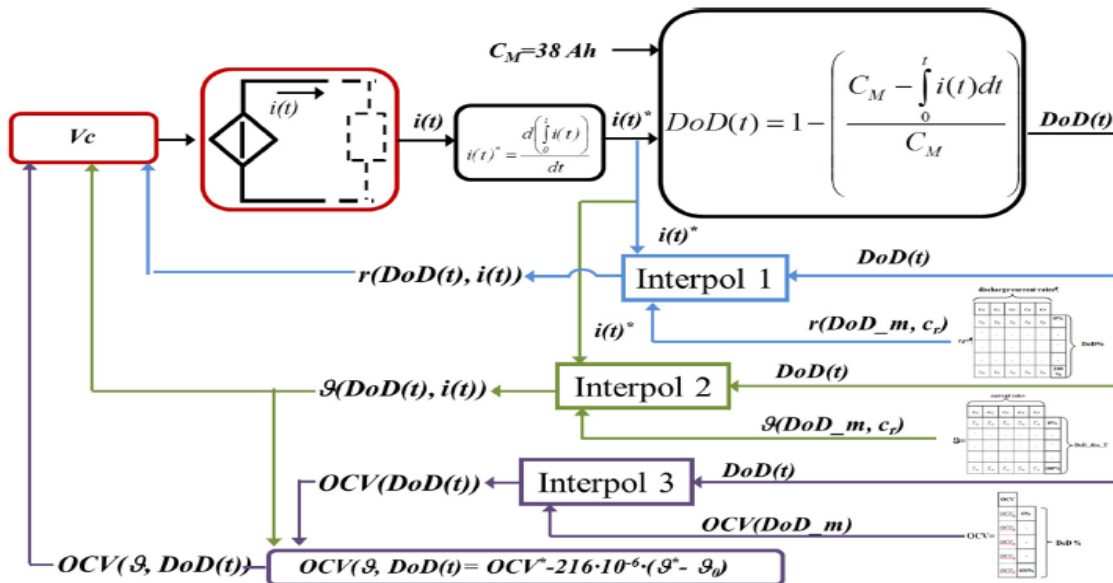


Figura 3.3 Schema a blocchi del modello stazionario in un processo di scarica

Volendo descrivere in sintesi il funzionamento del modello in un processo di scarica, nota la capacità nominale della cella, a partire dalla corrente da essa erogata, è possibile valutare in ogni istante lo stato di carica della cella stessa. Noti DoD e C-rate in ogni istante, ricorrendo a doppie interpolazioni denominate in figura “interpol 1”, “interpol 2” e “interpol 3”, si ricava rispettivamente il valore di resistenza interna, di temperatura e di OCV. La temperatura è poi variabile di input per correggere la tensione di circuito aperto per mezzo di una correlazione empirica. Arrivati a questo punto, si è dunque a conoscenze di tensione del generatore, valore della resistenza e corrente circolante, dunque con una legge alla maglia è possibile ricondursi alla tensione applicata al carico.

Il modello appena presentato impone però delle limitazioni al profilo di utilizzo della cella, in quanto non sono ammesse transizioni da carica a scarica e viceversa. Pertanto, si è resa subito necessaria una sua evoluzione verso un **modello transitorio** [24] al fine di poter simulare un generico profilo, compatibilmente con i tempi caratteristici dell'applicazione per cui è stato sviluppato. Per rendersi conto delle limitazioni del modello stazionario precedentemente descritto, gli autori hanno applicato alla cella un profilo dinamico, caratterizzato quindi da potenza variabile in modulo e verso. Il risultato chiaramente è stato pessimo proprio in corrispondenza della transizione tra carica e scarica, quando la resistenza interna assume valori nettamente inferiori del previsto. Questa osservazione ha consentito di mettere in discussione le relazioni che caratterizzavano il modello stazionario sulla base del funzionamento fisico del sistema. Da ciò è stato sviluppato un modello generale, valido anche per il regime transitorio.

Laddove nel modello precedente si utilizzava il DoD per entrare nelle matrici di interpolazione, nel nuovo bisogna fare riferimento alla posizione del fronte di reazione, quello sul cloruro di nichel per la scarica e quello associato alla riduzione del sodio per la carica. La resistenza interna è associata allora alla posizione del fronte di reazione, che durante la scarica si sposta dalla  $\beta''$ -allumina verso l'elettrodo catodico; ma interrompendo la scarica con una fase di carica, alla scarica successiva si osserva che la resistenza riparte dal suo valore minimo, indipendentemente dallo stato di carica della cella. Lo stesso discorso vale per la tensione di circuito aperto. Si può ora confrontare il modello stazionario rappresentato in Fig. 3.3 con quello transitorio raffigurato in Fig. 3.4, entrambi riferiti ad un processo di scarica.

La differenza sostanziale sta nel blocco preposto al calcolo dello stato di carica del sistema, il cui output ora non serve più come variabile da porre in ingresso alle interpolazioni. L'input alle interpolazioni è ora un valore fittizio di DoD rappresentativo della posizione del fronte di reazione all'interno della cella. Tale valore è calcolato da un nuovo blocco denominato “DoD- cycle”, che ha la peculiarità di azzerare l'estremo inferiore di integrazione ogni volta che si registra un cambio di verso per la corrente, in analogia alla posizione del fronte di reazione che durante la transizione da un regime ad un altro torna all'interfaccia con la  $\beta''$ -allumina. Per le altre parti del modello e per il passaggio tra modello di carica e modello di scarica valgono le considerazioni precedentemente espresse, purché si ragioni sempre con la posizione del fronte di reazione.

### 3. I modelli delle batterie sodio – cloruro di nichel

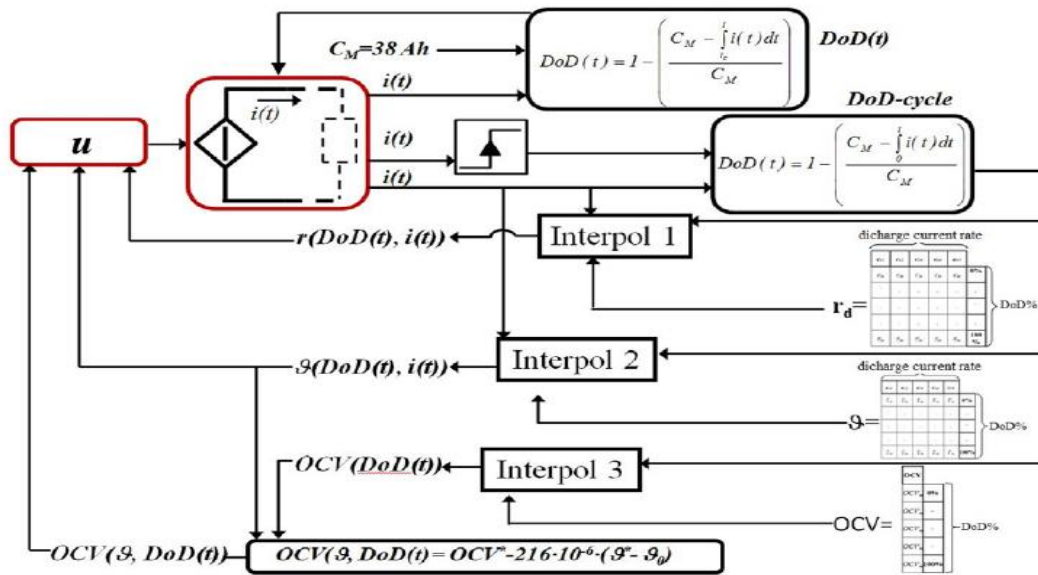


Figura 3.4 Schema a blocchi del modello transitorio in un processo di scarica

Derivato quindi il modello transitorio, si è in possesso di un buono strumento per simulare il comportamento di una cella. Prima di fidarsi nel suo funzionamento, gli autori hanno effettuato un accurato processo di validazione tramite confronto con dati sperimentali, in modo da verificare quantitativamente che eventuali scostamenti nei risultati si mantenessero entro una certa tolleranza. A tal proposito, la Fig. 3.5 mette a confronto i risultati sperimentali e il comportamento simulato per un aging test e un capacity test, da cui gli autori traggono conclusioni circa l'accuratezza del modello sviluppato: l'errore commesso dal modello si attesta in condizioni di transitorio sull'1%.

Per concludere la descrizione di questo modello, sintetizzandone contestualmente il contenuto, si riporta direttamente una frase degli autori. “Il modello sviluppato è di tipo sperimentale, e consente ad un utente di rappresentare qualunque tipo di batteria  $\text{NaNiCl}_2$ , per qualsiasi tipo di funzionamento, semplicemente dando in ingresso al modello i dati di misure standard, disponibili presso il costruttore, eseguite in regime stazionario, ignorando completamente l'elettrochimica della batteria” [2].

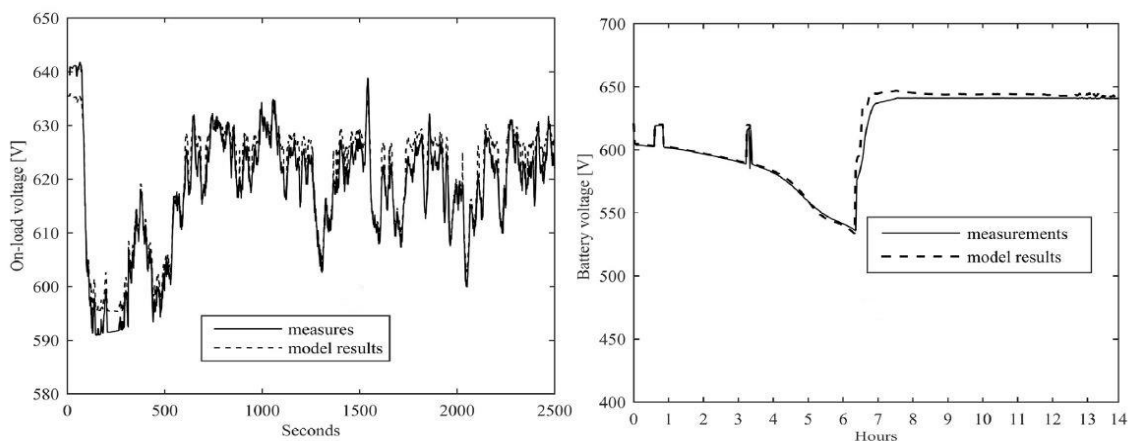


Figura 3.5 Risultati sperimentali VS valori simulati per un aging test (a sinistra) e un capacity test (a destra)

Per quanto tale modello risulti ben dettagliato sia nei fondamenti teorici che nella procedura sperimentale, non può essere certo immune da **critiche**. In particolare, è bene prendere in considerazione all'interno del modello stazionario la dipendenza della temperatura da C-rate e DoD. Per quanto il grafico rappresentato in Fig. 3.2c sia frutto di dati sperimentali, appare molto strano come l'incremento di temperatura subito dal sistema sia tanto maggiore quanto più bassa è la corrente di scarica: fissato il  $\Delta h$  della reazione di scarica, maggiore è la corrente con cui la cella è scaricata maggiori dovrebbero essere le irreversibilità e dunque l'energia dissipata internamente. Tale considerazione è infatti confermata da altri studi [13] che, avendo elaborato un modello termico però di tutto il sistema di accumulo, hanno studiato l'evoluzione di temperatura in scariche a diverse correnti. Questo risultato è rappresentato nel capitolo relativo alla tecnologia, in Fig. 2.12.

Al fine di dimostrare quanto appena sostenuto e confermato da altri studi, si riportano anche i risultati di alcune prove realizzate presso i laboratori del Politecnico di Milano, durante le quali il sistema di accumulo è stato scaricato completamente con diversi valori di corrente. I risultati sono qui rappresentati in Fig. 3.6

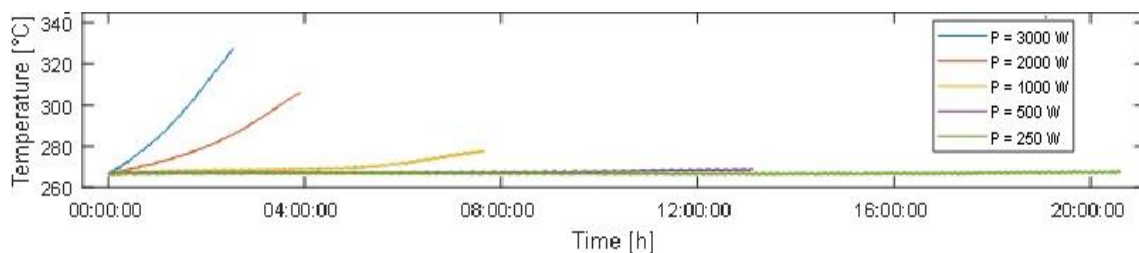


Figura 3.6 Andamento di temperatura durante processi di scarica a diversa potenza

### 3.3 Modello equivalente di Thévenin con due rami RC

Nel momento in cui si scelgono di includere nel circuito elettrico anche dei bipoli capacitivi, chiaramente si rinuncia alla semplicità di derivazione del modello stesso a beneficio di una sua maggiore accuratezza, in particolare verso il comportamento dinamico del sistema.

A tal proposito, si presenta ora un modello [12] il cui circuito elettrico equivalente è costituito da due rami RC connessi in serie a una resistenza e a un generatore di tensione. La necessità di considerare un circuito di questo tipo, nasce appunto da un limite che generalmente caratterizza i modelli con una sola resistenza, ossia l'accuratezza non ottimale nel riprodurre le dinamiche lente e veloci, e soprattutto le situazioni in cui la batteria eroga potenze di picco.

La sua implementazione è stata condotta tramite prove su una batteria commerciale da 23,5 kWh di caratteristiche riportate in Tab. 3.1: a differenza del caso precedente, si tratta ora di un modello per l'intero sistema di accumulo e non per la singola cella. Tali prove hanno consentito di quantificare i diversi elementi circuitali al variare dello stato di carica del sistema.

### 3. I modelli delle batterie sodio – cloruro di nichel

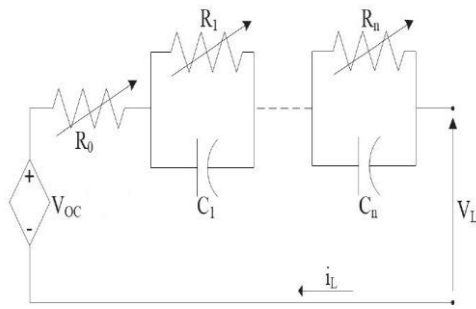


Figura 3.7 Circuito equivalente del modello con rami RC

<b>Rated discharge power [kW]</b>	7,8
<b>Rated voltage [V]</b>	620
<b>Iron-component OCV [V]</b>	564
<b>Nominal capacity [kWh]</b>	23,5
<b>Nominal temperature [°C]</b>	260
<b>Calendar life @80% DoC</b>	15
<b>Cicle life @80% DoC</b>	4500

Tab.3.1 Caratteristiche tecniche della batteria

Benché infatti i diversi elementi siano in generale funzione non lineare di SoC, C-rate e temperatura, nel modello si trascurano le dipendenze di temperatura e C-rate per concentrarsi su come cambia il valore dei parametri circuitali al variare del SoC. Il risultato è un modello particolarmente adeguato a condizioni di funzionamento che mantengono lo stato di carica del sistema nel range 90% ÷ 40%, dove gli errori tra i dati sperimentali e quelli prodotti dalle simulazioni si mantengono inferiori all'1%. Al di sotto di tale range l'errore si amplifica a causa di marcate non linearità derivanti dall'entrata in esercizio delle celle al ferro. Complessivamente si tratta di un modello facilmente implementabile in contesti di smart grid e microgrid, dove si vuole simulare il comportamento di una batteria sodio-cloruro di nichel, oppure in tutti questi contesti in cui vi sia interesse a controllare in tempo reale le prestazioni di un sistema di questo tipo.

Il primo aspetto da analizzare è sicuramente il **significato fisico** che caratterizza ciascun bipolo presente nel circuito. Il generatore di tensione rappresenta sempre la tensione di circuito aperto ai capi della cella in condizioni di equilibrio. La resistenza  $R_0$  rappresenta fisicamente la resistenza ohmica sui circuiti della cella e sugli elettrodi. I due rami RC sono legati chiaramente al comportamento in condizioni di transitorio. Il primo ramo è associato alle dinamiche veloci, tipicamente quelle legate alla cinetica delle reazioni e alla formazione del double-layer sull'interfaccia elettrodo-elettrolita, il secondo invece è rappresentativo delle dinamiche lente tipiche dei processi diffusivi.

Valutato il significato fisico, è bene procedere all'**identificazione dei diversi parametri** tramite prove sperimentali. Per caratterizzarli nel range di SoC compreso tra il 90% e il 10%, si ricorre a un profilo di scarica a onda quadra a 0,25C caratterizzato da tempi di rilassamento variabili dai venti minuti per SoC superiori al 30% ai quaranta minuti negli altri casi.

Analizzando il profilo di tensione misurato ai morsetti della batteria durante la prova e rappresentato in Fig. 3.8, si possono identificare tre differenti comportamenti:

- 90% < SoC < 40% → La scarica e il tempo di rilassamento sono influenzati solo dalle celle al nichel, difatti la tensione torna rapidamente al valore di OCV.
- 30% < SoC < 20% → Il funzionamento è influenzato anche dalle celle al ferro. Si può osservare che, al termine del gradino, la tensione torna molto rapidamente a un valore superiore all'OCV delle celle al ferro (linea rossa tratteggiata). A questo



punto la transizione verso un valore stazionario di tensione risulta più lenta dal momento che, internamente al sistema, sta avendo luogo la carica delle stesse celle al ferro ad opera di quelle al nichel.

- $15\% < \text{SoC} < 10\%$  → In quest'ultima fase le celle al nichel sono completamente scariche e dunque non riescono più a sostenere la carica di quelle al ferro, di conseguenza la tensione della batteria non riesce più a portarsi a un valore stazionario.

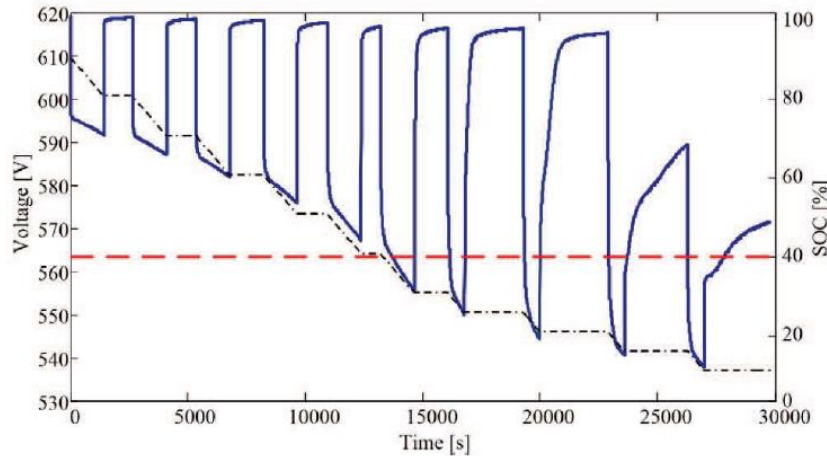


Figura 3.8 In blu: profilo di tensione misurato durante la scarica a gradini a 0,25C. In rosso: OCV delle celle al ferro. In nero tratteggiato: evoluzione del SoC.

A causa di quanto appena mostrato, gli autori del modello ritengono che questo manifesti le sue prestazioni ottimali nel range di stato di carica corrispondente al primo punto del precedente elenco, dove la cella al ferro non interviene e dunque un circuito elettrico relativamente semplice riesce a riprodurre il reale comportamento della batteria.

Per la determinazione sperimentale dei diversi parametri, bisogna quindi studiare l'evoluzione della tensione nei periodi di rilassamento. Per fare questo ci si serve della legge di Ohm per la resistenza  $R_0$  e, ricordando che la tensione è variabile di stato per i condensatori e dunque non può variare con discontinuità, dall'equazione (3.1) che descrive proprio l'evoluzione della tensione sui rami RC, si ricavano i valori dei parametri  $R_1$ ,  $C_1$ ,  $R_2$ ,  $C_2$ . I risultati al variare del SoC sono rappresentati in Fig. 3.9.

$$V_i(t) = V_i(t_{SS}) + [V_i(t_0) - V_i(t_{SS})]e^{-t/\tau_i} = R_i i_i (1 - e^{-t/\tau_i}) \quad (3.1)$$

Una volta mappate le diverse variabili in funzione del SoC, la costruzione del modello è completa e si può procedere al suo utilizzo. La Fig. 3.10 fornisce una rappresentazione schematica di tale modello, mettendo in evidenza i diversi step da svolgere per il suo corretto utilizzo. Discretizzato il profilo di utilizzo della batteria in tanti intervalli di tempo in base al livello di dettaglio richiesto, una volta noto lo stato di carica all'istante iniziale, si interpola tra i dati sperimentali per calcolare il valore dei diversi bipoli costituenti il circuito.

### 3. I modelli delle batterie sodio – cloruro di nichel

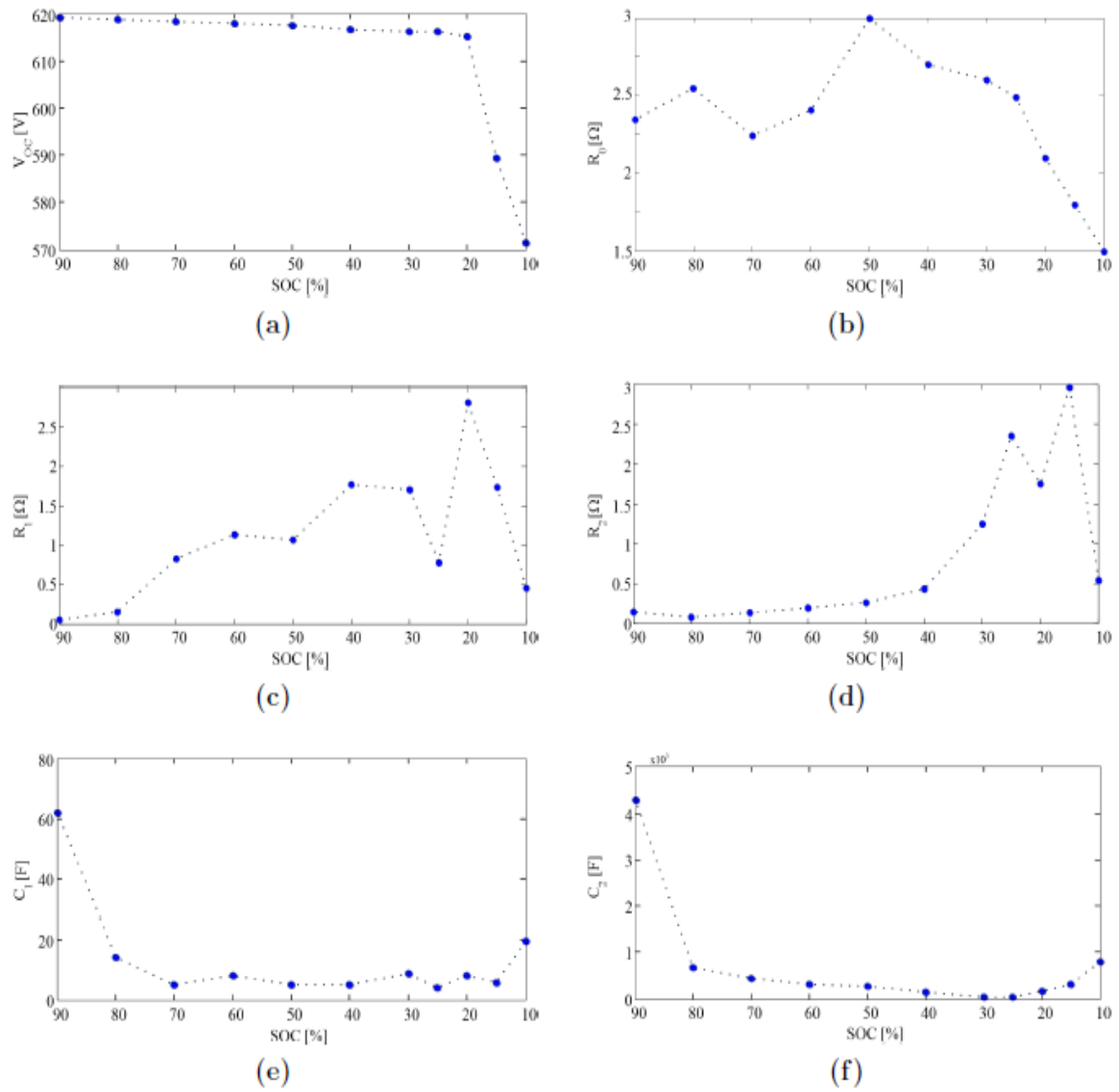


Figura 3.9 Andamento dei parametri al variare del SoC: (a) OCV, (b)  $R_0$ , (c)  $R_1$ , (d)  $R_2$ , (e)  $C_1$ , (f)  $C_2$

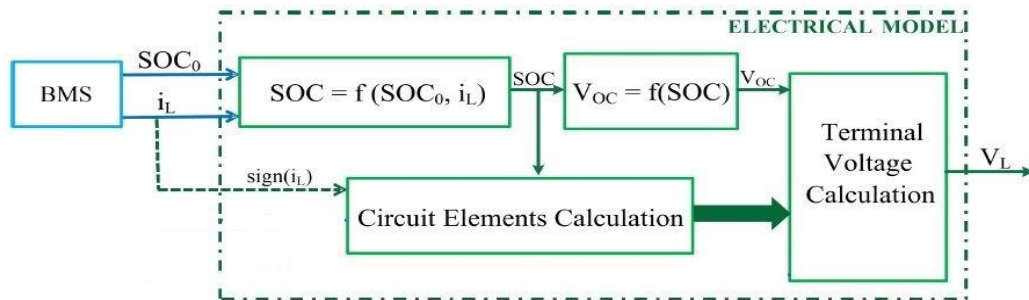


Figura 3.10 Rappresentazione del modello tramite schema a blocchi



Calcolati tutti gli elementi circuitali, è possibile calcolare la corrente erogata dalla batteria e la tensione ai morsetti del carico con le equazioni riportate nel sistema (3.2), per cui si assume convenzionalmente una corrente negativa per un processo di scarica. Da queste informazioni, ricordando che le batterie sodio-cloruro di nichel hanno rendimento di Coulomb unitario, è possibile calcolare tramite l'equazione (3.3) il SoC con cui avrà inizio il timestep successivo e procedere con il medesimo approccio fino al completamento del profilo che si vuole simulare.

$$\begin{cases} P_{batt} = V_{batt} * I_{batt} \\ V_{batt} = V_{OC} + R_0 * I_L + V_1 + V_2 \\ V_i + \tau_i \frac{dV_i}{dt} = R_i * I_L, \text{ con } i = 1, 2 \end{cases} \quad (3.2)$$

$$SoC(t) = SoC(t - 1) + \frac{1}{C_{nom}} \int i(t) dt \quad (3.3)$$

In conclusione, anche questo modello è stato validato tramite sperimentalmente per due differenti profili di scarica, che hanno appunto garantito la sua affidabilità per stati di carica compresi tra il 90% e il 40% quando appunto l'errore si mantiene inferiore all'1%.

I risultati di questa validazione e i rispettivi errori sono riportati in Fig. 3.11.

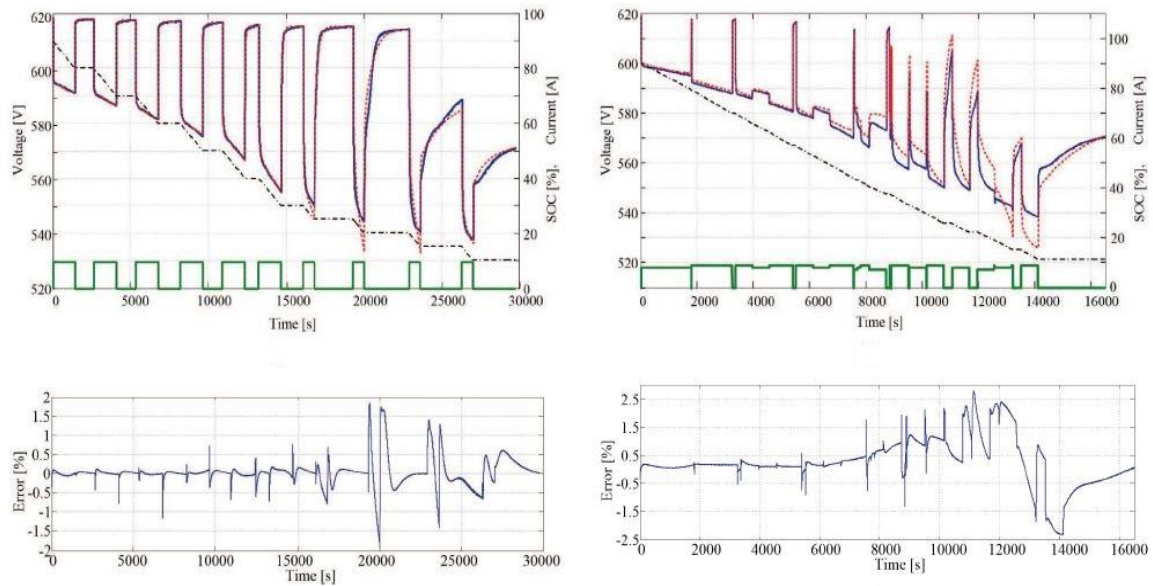


Figura 3.11 Validazione del modello con due profili di scarica differenti: in blu la tensione misurata e in rosso quella simulata. In verde l'onda quadra di corrente e in blu tratteggiato il SoC

### 3. I modelli delle batterie sodio – cloruro di nichel

## 4 SISTEMI DI ACCUMULO: APPLICAZIONI E PROFILI DI TEST

Nel capitolo precedente sono stati descritti i modelli delle batterie sodio-cloruro di nichel, spiegando come sono stati costruiti e qual è la loro funzione. In particolare, è stato detto che consentono di riprodurre le prestazioni del sistema di accumulo oggetto di analisi conoscendo quella che dovrà essere la sua funzione e la sua modalità di utilizzo; in questo modo un progettista può adottare le decisioni migliori in fase di dimensionamento e scelta della tecnologia. Se in quest'ottica al progettista può essere relativamente semplice conoscere le richieste di una data utenza o di una specifica applicazione, osservando invece la questione da un altro punto di vista, si capisce come, per chi sviluppa nuovi sistemi BESS, il tutto non sia particolarmente immediato: non si ha a che fare con una specifica utenza ma bisogna progettare e ottimizzare un dispositivo sicuramente per numerosi utenti e magari anche per diverse applicazioni, così da accrescere le potenziali quote di mercato.

Prima di progettare e testare una batteria, è necessario costruire alcuni profili standard di utilizzo, i profili di test appunto, che siano rappresentativi di come gli utenti finali utilizzano effettivamente il sistema per le diverse applicazioni. Deve trattarsi sostanzialmente di un profilo da laboratorio di semplice utilizzo e il cui contenuto informativo rispecchi le condizioni operative di diversi dispositivi.

Una volta individuati questi profili standard, il passo successivo sarebbe quello di definire delle vere e proprie procedure di test standardizzate a livello di tutta la comunità scientifica, con le quali andare a caratterizzare i diversi sistemi di accumulo. In questo modo si andrebbe anche a porre rimedio alla situazione attuale, in cui ogni costruttore fornisce le specifiche tecniche del proprio sistema sulla base di prove condotte e definite internamente all'azienda. Fornire risultati sulle prestazioni senza illustrare la procedura di prova utilizzata, rende impossibile stabilire se nelle applicazioni reali tale sistema manifesterà le medesime performance.

Per definire dei profili di test bisogna chiaramente focalizzarsi sugli specifici campi di utilizzo dei sistemi BESS, tipicamente il settore automotive e il mondo delle applicazioni stazionarie. Se per il primo ambito esistono già dei profili standard consolidati, basti pensare ad esempio ai vari cicli di guida utilizzati per valutare le emissioni delle autovetture alimentate da motori a combustione interna, lo stesso non vale per le applicazioni stazionarie, il cui sviluppo è tutt'oggi oggetto di ricerca per ragioni di diversa natura [6].

In primo luogo, le applicazioni stazionarie rappresentano un settore in continua evoluzione, un settore che continua a coinvolgere sempre nuove funzionalità, in conseguenza al forte dinamismo di una rete elettrica con crescente penetrazione di impianti da fonte rinnovabile: massimizzazione dell'autoconsumo, peak shaving, spinning reserve, regolazione di frequenza e differimento di investimenti nella rete di

#### 4. Sistemi di accumulo: applicazioni e profili di test

trasmissione e distribuzione sono solo alcune delle possibili applicazioni. Per ciascuna di queste sarebbe opportuno definire un profilo di test che ne rispecchi le rispettive caratteristiche.

In secondo luogo, vi è il fatto che non è sufficiente definire l'applicazione per ricavarne un profilo rappresentativo, ma è necessario anche considerare che una specifica applicazione può avere esigenze diverse. Si fa riferimento alle caratteristiche sociali, geografiche e climatiche del sito in cui un dato dispositivo sarà installato, ma anche alla tipologia di impianti di potenza diffusi nello stesso sito.

In terzo luogo, bisogna anche considerare che vi sono differenti tecnologie in grado di adempiere a una data funzionalità. Il profilo quindi deve cercare di essere oggettivo e valutare le prestazioni di tutto il sistema, inclusi gli apparati di controllo e l'elettronica di potenza. Nel fare questo però può scontrarsi inevitabilmente con la differente maturità che caratterizza le varie tecnologie.

In questo capitolo saranno inizialmente descritti le possibili applicazioni di un sistema di accumulo a batteria, focalizzandosi inizialmente sulla piccola realtà domestica in cui l'utente finale vuole massimizzare l'autoconsumo del proprio impianto da fonte rinnovabile, per poi considerare un punto di vista globale sull'intera rete elettrica, in cui un sistema di accumulo potrebbe potenzialmente avere un ruolo nel Mercato dei Servizi di Dispacciamento. Lo scopo è quindi individuare dove questi sistemi trovano maggiore applicazione, così da delineare le funzionalità per cui sia necessario sviluppare profili di test. Questo sarà il punto di partenza per la seconda parte di questo capitolo, in cui per tali applicazioni si presenteranno dei possibili profili di test per batterie riportati in letteratura.

##### 4.1 Le applicazioni dei sistemi di accumulo a batteria

Da un punto di vista più generale possibile, si definisce sistema di accumulo un qualunque dispositivo che sia in grado di realizzare una conversione energetica bidirezionale, estraendo energia da una sorgente ad esso esterna, stoccandola al suo interno in una forma diversa per un certo periodo di tempo, per poi restituirla al momento opportuno nella sua forma originaria (4). Applicando tale definizione all'ambito elettrico, si intuisce subito l'utilità di un sistema di questo tipo su una rete che vive di un bilancio istantaneo di potenze ma che, a causa della crescente diffusione di impianti da FER non programmabile, fatica sempre di più a garantire la propria stabilità. Un sistema di accumulo permette quindi di prelevare energia dalla rete, stoccarla, e restituirla in accordo con le esigenze della rete stessa, siano esse di natura tecnica oppure economica.

Prima di proseguire nel descrivere quanto possa essere utile un sistema di accumulo a batteria per la rete elettrica, è indispensabile fornire una macro-classificazione delle possibili applicazioni in cui tali sistemi possono trovare impiego in ambito on-grid. Si parla di utilizzi "front of the meter", generalmente per applicazioni centralizzate, nel momento in cui il sistema lavora a beneficio della rete elettrica, mentre si usa il termine "behind the meter" per indicare tutte quelle applicazioni su piccola scala in cui il sistema lavora a beneficio dell'utente finale [4].

### 4.1.1 Applicazioni “behind the meter”

Le applicazioni “behind the meter” (letteralmente “dietro il contatore”) includono di fatto tutte quelle realtà minori in cui l’utente finale possiede un sistema di accumulo accoppiato a un piccolo impianto da fonte rinnovabile.

La principale funzione in questo campo è la **massimizzazione dell’autoconsumo**. Secondo un report ENEA [47] è la logica di utilizzo del sistema di accumulo che massimizza i benefici economici per l’utente, dal momento che evita di immettere in rete il surplus istantaneo della produzione per poi acquistare energia, a un prezzo maggiore, in situazioni di produzione insufficiente. Dal punto di vista operativo quindi, il sistema si carica nei momenti in cui la produzione PV supera il carico per poi scaricarsi quando questa relazione si inverte. Nel caso in cui l’accumulo giunga a saturazione, inevitabilmente sarà necessario immettere in rete l’eccesso di produzione.

Da quest’ultima considerazione si capisce quindi come tale logica di funzionamento sia a unico beneficio dell’utente e non certo della rete, che in situazioni già di intensa produzione fotovoltaica vedrebbe ulteriori immissioni di potenza a causa delle unità di accumulo domestico andate in saturazione.

### 4.1.2 Applicazioni “front of the meter”

Si tratta di tutte quelle applicazioni che coinvolgono ciò che è davanti al contatore e dunque l’intera rete elettrica. Prima però è indispensabile esprimere alcune considerazioni in merito allo scenario attuale che caratterizza il sistema elettrico, servendosi della descrizione fornita da una pubblicazione [39] relativa all’utilizzo di sistemi BESS per i servizi ancillari.

Se in passato la rete viveva su un modello centralizzato in cui pochi grandi impianti producevano l’energia necessaria ad alimentare tutti i carichi, ora si sta assistendo progressivamente ad una transizione verso un sistema a generazione distribuita, in cui tanti piccoli impianti producono una quota sempre più importante dell’energia richiesta dall’intero sistema. Ciò comporta dei problemi poiché tali impianti sono tipicamente alimentati da FER non programmabili e dunque non sono in grado di partecipare al mantenimento della stabilità della rete elettrica. La conseguenza è che di tutta l’energia scambiata sui mercati, una frazione sempre più rilevante è gestita su MSD in quanto la rete ha una maggior esigenza di far fronte agli sbilanciamenti causati da tale tipologia di impianti.

Poiché tale transizione è ancora in atto, è prevedibile che le quote di energia gestite su MSD aumenteranno ulteriormente, e dunque se non si attuano modifiche alle logiche di regolazione, in futuro vi sarà progressivamente una carenza di impianti in grado di erogare servizi di rete, in quanto attualmente solo centrali convenzionali di grossa taglia sono titolate ad erogarli.

Se in un’ottica di questo tipo i vecchi protagonisti di MSD stanno scomparendo, la soluzione più ovvia implica proprio l’apertura di tale mercato ai nuovi attori del sistema elettrico, già coinvolti negli ultimi anni in appositi progetti pilota. Tre sono le modalità per consentire tale partecipazione a nuovi soggetti.

#### 4. Sistemi di accumulo: applicazioni e profili di test

- Aggregazione di impianti non rilevanti: un singolo operatore di mercato può gestire in modo coordinato più impianti di piccola taglia, disponendo complessivamente della capacità aggregata.
- Apertura del mercato agli utenti passivi, disponibili quindi ad adattare dietro remunerazione il proprio profilo di carico in accordo alle esigenze della rete.
- Apertura del mercato ai sistemi BESS: pur essendo sistemi che riescono a mettere a disposizione della rete un valore limitato di potenza ed energia, si adattano bene a un funzionamento su MSD, che manifesta su un determinato periodo di tempo (a seconda del servizio reso) richieste nette di energia sostanzialmente nulle. Due sono le peculiarità che distinguono tali sistemi nella fornitura di servizi di rete, le quali costituiscono di fatto i rispettivi vantaggi e svantaggi:
  - Elevata accuratezza nel seguire il profilo di potenza richiesto dalla rete grazie alla rapidità di intervento associata alle rampe di carico praticamente istantanee.
  - Incapacità di erogare il servizio per lunghi periodi. Le richieste della rete spesso portano a saturazione lo stato di carica del sistema, impedendo quindi il proseguimento della regolazione.

Presentato quindi lo scenario attuale che caratterizza il sistema elettrico, è possibile entrare nel dettaglio delle applicazioni “front of the meter”. In considerazione della rapidità di intervento che caratterizza i sistemi BESS, come appena dichiarato, i servizi di rete maggiormente compatibili sono la regolazione primaria di frequenza e la spinning reserve.

Il primo servizio di rete che si andrà a descrivere è la **regolazione primaria di frequenza**. Per riprendere quanto detto nel paragrafo precedente aggiungendo però qualche informazione di dettaglio, si tratta di un servizio che gli impianti di produzione aventi potenza efficiente superiore ai 10 MVA (ad eccezione di quelli che utilizzano fonti rinnovabili non programmabili) sono obbligati a fornire a titolo gratuito. Tale servizio è regolato da quanto previsto dall'allegato A 15 del grid code italiano, e l'obiettivo è quello di mantenere il bilancio energetico della rete elettrica. Per perseguire tale obiettivo, il singolo impianto deve rendere disponibile una banda di regolazione di  $\pm 1,5\%$  della potenza efficiente, secondo un'apposita curva definita nel piano potenza-frequenza, che quantifica l'energia regolante dell'impianto secondo una legge a statismo rappresentata in Fig. 4.1. Tale curva caratteristica è costituita da tre differenti regioni:

1. Banda morta (generalmente  $\pm 20$  mHz rispetto alla frequenza nominale): le variazioni di frequenza della rete sono piccole, dunque il sistema non deve intervenire.
2. Legge di intervento a statismo: la potenza da immettere o erogare in rete varia linearmente con lo scostamento tra la frequenza misurata e il suo valore nominale secondo un coefficiente  $\sigma$ , denominato appunto statismo, definito dalla formula (4.1).

$$\sigma = \frac{\Delta f / f_{nom}}{\Delta P / P_{max}} \quad (4.1)$$

3. Legge di intervento a potenza costante: una volta saturata la potenza  $P_{max}$  messa a disposizione per il servizio, la regolazione prosegue a potenza costante.

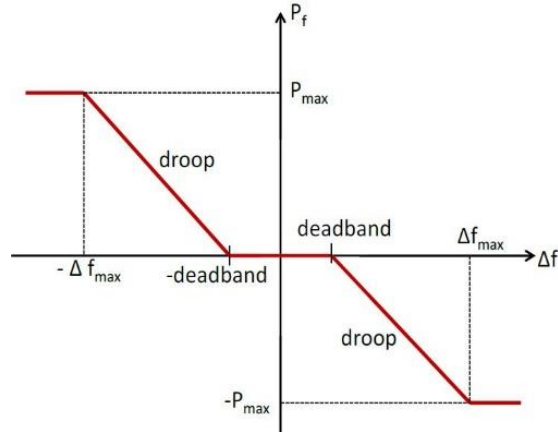


Figura 4.1 Curva caratteristica con legge a statismo per la regolazione primaria di frequenza

In sintesi, a partire dal  $\Delta f$  misurato sulla rete si calcola la potenza di regolazione che l'impianto deve fornire. Di questo valore, la metà deve essere erogata in quindici secondi, la restante parte entro trenta secondi dall'inizio della perturbazione. La somma dei due deve essere garantita per quindici minuti.

Questo è il quadro normativo di riferimento per gli impianti convenzionali, gli unici di fatto obbligati a fornire tale servizio. Negli ultimi anni, a seguito della diminuzione di energia regolante della rete a seguito della diffusione di impianti FER non programmabile, uno studio [40] riferisce che le delibere AEEGSI n. 231/2013/R/eel e 66/2014/R/eel hanno posto le prime basi (seppur un adeguato quadro normativo non sia ancora definito) per aprire la partecipazione ai servizi di rete dietro remunerazione anche ai sistemi BESS; data la loro rapidità di intervento e data la capacità di passare tempestivamente da carica a scarica e viceversa, risulterebbero particolarmente adatti per la regolazione primaria.

La dimostrazione che i BESS possano avere un ruolo su MSD viene dalla società tedesca Caterva [41], che offre, a livello internazionale (l'applicazione non è ad oggi commerciale in Italia ma lo è in diversi paesi europei quali Germania, Olanda e Austria), sistemi di accumulo domestico denominati "Caterva Suns" e basati su batterie agli ioni di litio, di taglia variabile fino ai 20 kWh – 20 kW. Tutti i sistemi installati, oltre ad adempiere alle convenzionali funzioni di accumulo per uso domestico, hanno la peculiarità di essere tra loro interconnessi e gestiti da un unico sistema di controllo che, sulla base della disponibilità dei diversi sistemi, riesce ad utilizzare una certa frazione della loro capacità così offrire potenza regolante per il bilancio energetico della rete. Secondo quanto riportato dalla stessa Caterva, con i servizi di rete è possibile generare un ricavo aggiuntivo, che è poi ridistribuito tra tutti i possessori del sistema, a vantaggio della sostenibilità economica dell'investimento iniziale.

#### 4. Sistemi di accumulo: applicazioni e profili di test

Una seconda funzionalità nello scenario dei servizi di rete è la **spinning reserve**. Si tratta sostanzialmente di una capacità di immettere o assorbire energia dalla rete in tempi molto rapidi, e risulta particolarmente importante per le rampe che caratterizzano la curva di carico giornaliera, o per tutte le repentine richieste di potenza imputabili a situazioni anomale, quali ad esempio il guasto di un impianto di produzione di taglia significativa. Escludendo le situazioni di gusto, nelle prime ore della mattina e nelle tarde ore serali si manifestano rispettivamente delle rampe di carico a salire e a scendere. Tali rampe infatti sono poco compatibili con la produzione da impianti termoelettrici tipici del carico di base, per i quali i transitori dei cicli termodinamici pongono sostanzialmente dei vincoli sulle variazioni di carico tollerabili dall'impianto. Generalmente si ricorre alle turbine a gas sfruttando la loro rapidità di intervento, tuttavia anche i BESS risulterebbero ben predisposti: con sostanziale assenza di transitori e intervento immediato potrebbero essere una valida soluzione per questa applicazione.

Inoltre vi è anche la funzionalità di **peak shaving** [47]. È una logica di gestione che prevede di caricare un sistema di accumulo in quegli istanti in cui si hanno elevate immissioni di potenza in rete, per poi scaricarlo in quegli istanti a tendenza opposta.

Vi sono una molteplicità di altre applicazioni front of the meter [3]. Non si entrerà nel dettaglio di queste ultime, tuttavia per completezza è bene comunque elencarle in modo da aver chiaro l'intero contesto.

- Integrazione delle rinnovabili. Accoppiando un sistema di accumulo ad un impianto da fonte rinnovabile non programmabile, si riesce a minimizzare l'intermittenza che caratterizza la produzione e rendere dispacciabile l'energia prodotta, conferendole quindi più valore in un contesto di mercato elettrico. Per tale applicazione, la taglia tipica del sistema di accumulo varia dalle centinaia di kW alle decine di MW a seconda che l'installazione abbia luogo rispettivamente nella rete di trasmissione o distribuzione.
- Supporto alla regolazione di tensione. Il sistema, il cui tempo di intervento deve essere molto rapido, immette o assorbe potenza reattiva per mantenere un determinato valore di tensione nel punto della rete presso cui è installato.
- Arbitrage/shortage trade. Il sistema in questo caso lavora in uno scenario di mercato elettrico, assorbendo e quindi acquistando energia dalla rete nelle ore in cui i prezzi di mercato sono bassi, per poi scaricarsi e rivenderla nelle ore in cui il prezzo zonale raggiunge valori elevati. Le peculiarità richieste a tali sistemi sono la capacità di stoccare energia su medio termine (ore-giorni) e un'elevata efficienza sull'intero ciclo di carica-scarica, in modo che la differenza tra l'energia acquistata e quella rivenduta non sia tale da pregiudicare il guadagno dovuto all'importante differenza di prezzo.

A questo punto sono stati descritti nel dettaglio i diversi servizi che è possibile effettuare con un sistema BESS. Per tali applicazioni sarà allora interessante ricercare in letteratura eventuali profili di test proposti, che sarebbero quindi di fondamentale importanza per sviluppare nuovi sistemi e ottimizzare quelli già esistenti.



## 4.2 Un esempio di metodologia: profili di test per applicazioni automotive

Obiettivo di questo capitolo è presentare dei profili standard per applicazioni stazionarie tra quelle pubblicate in letteratura; tuttavia si ritiene opportuno partire dal settore automotive, per il quale uno studio [42] ha ricostruito un profilo di test per una batteria (100 Ah, 350 V) di un autobus ibrido a partire da dati reali sul suo funzionamento. Il mezzo è azionato da una cella a combustibile di tipo PEM accoppiata a una batteria agli ioni di litio. Non è interessante tanto il punto di arrivo, in quanto il profilo ottenuto non sarà sicuramente applicabile in ambito stazionario; ciò che si vuole mettere in evidenza è l'approccio utilizzato.

Sono stati raccolti per un certo periodo i dati sul funzionamento in campo della batteria, e dai suoi profili di utilizzo sono stati individuati quattro diversi tipi di funzionamento, in relazione soprattutto alle modalità operative del mezzo su cui è stata montata.

1. *Pure electric mode*: la batteria lavora in sola scarica per alimentare il veicolo.
2. *Joint work mode*: la cella è esercitata a carico nominale e la batteria lavora per gestire le differenze con le richieste in potenza del veicolo: si scarica quando la richiesta è maggiore di quanto erogata dalla cella, si carica nel momento in cui è minore.
3. *Braking energy recovery mode*: la batteria riceve delle correnti di carica impulsive quando il veicolo è in frenata.
4. *Parking charge mode*: la batteria è caricata a tensione e corrente costante.

Si sono analizzati i profili di tensione e corrente della batteria monitorando contestualmente la velocità del mezzo nelle quattro modalità sopra descritte. Trascurando l'ultima in quanto le condizioni di standby prolungato non sono certo rilevanti ai fini della caratterizzazione di un profilo di test, in tutte le altre modalità i profili di corrente sono stati analizzati nel dettaglio. In primo luogo, sono stati caratterizzati con un approccio statistico per capire quali fossero i valori di corrente più frequenti, in secondo luogo stati studiati tramite FFT (Fast Fourier Transform) in modo da individuare le frequenze principali con cui la batteria passa da un regime di carica a uno di scarica. I risultati hanno messo in evidenza che il periodo di transizione tra carica e scarica nelle diverse modalità considerate varia tra 50s e 150s: tale valore dovrà assomigliare al periodo caratteristico del profilo che si andrà a ricostruire.

Il profilo di test ricostruito a valle di tale analisi è rappresentato in Fig. 4.2, dove si possono vedere i le quattro parti caratteristiche che lo compongono:

- *Calibration*: si scarica completamente la batteria e la si ricarica fino al SoC di partenza in modo che il BMS esegua la calibrazione.
- *Rest period*: un'ora di rilassamento per recuperare l'equilibrio termico ed elettrochimico prima di applicare un ciclo.
- *Idle-parking condition*: 100s in cui la batteria viene caricata a 0,3C. Rappresenta il momento in cui il veicolo è ancora fermo ma la cella è in funzione, dunque la

#### 4. Sistemi di accumulo: applicazioni e profili di test

potenza prodotta da quest'ultima, al netto di quanto consumato dagli ausiliari di bordo, viene immessa nella batteria.

- *Road running condition*: onda quadra tra  $\pm 1,5C$  di periodo 60s ripetuta per dieci volte.

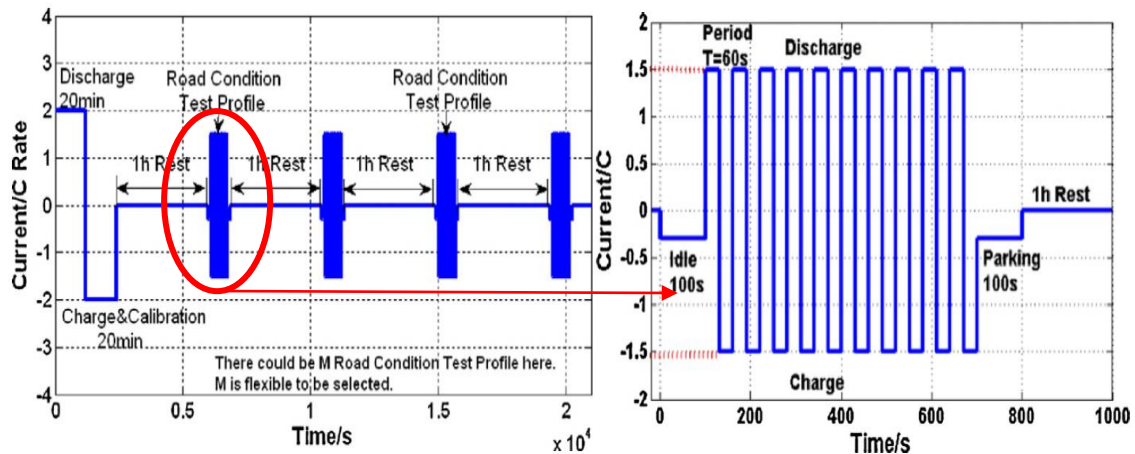


Figura 4.2 Profilo di test (sx) e un suo ingrandimento (dx)

La calibrazione si esegue solo all'inizio della prova, mentre le altre tre fasi si ripetono in sequenza a dare il profilo di test complessivo.

#### 4.3 Profili di test per applicazioni stazionarie

È possibile considerare ora le applicazioni stazionarie dei sistemi BESS. Talvolta questi sistemi sono utilizzati in aree remote in accoppiamento e piccoli impianti da fonte rinnovabile o generatori alimentati a combustibili fossili. Si tratta di una modalità di funzionamento in isola, in cui il sistema di accumulo deve garantire la continuità di alimentazione all'utenza (spesso si tratta di apparati per le telecomunicazioni). Non è obiettivo di questa trattazione investigare sulle procedure di test associate a questa modalità operativa.

Ben più interessante è la situazione in cui vi sia una connessione alla rete elettrica. In tal caso le modalità di funzionamento sono sì diverse, ma afferiscono a determinate funzionalità che il sistema può compiere a beneficio della rete elettrica e dell'utente finale.

##### 4.3.1 La regolazione primaria di frequenza e la spinning reserve

Il primo esempio di profilo di test per regolazione di frequenza è stato sviluppato dai Sandia National Laboratories negli USA [5], dove i codici di rete sono chiaramente diversi da quelli europei. Di conseguenza questo non rispecchia le curve di intervento e il quadro normativo delineati nel paragrafo 4.1.2.

Il profilo è stato sviluppato a partire da un anno di misurazioni della frequenza di rete, alla quale è stata applicata la legge di intervento prevista dal codice americano. Tutte queste misure sono poi state suddivise in base alla loro deviazione standard (alta, media

e bassa). Dalle misure a media e alta deviazione standard sono stati scelti due cicli, da due ore ciascuno, neutrali dal punto di vista di un bilancio energetico e tali che la loro deviazione standard fosse pari alla deviazione standard media di tutte le misure appartenenti alla stessa categoria. Mettendo in successione per due volte tre cicli a media deviazione standard, seguiti da uno ad alta deviazione standard, e concludendo con quattro cicli a media, si è ottenuto il profilo di 24h rappresentato in Fig. 4.3, espresso come potenza normalizzata rispetto alla potenza nominale del sistema di accumulo.

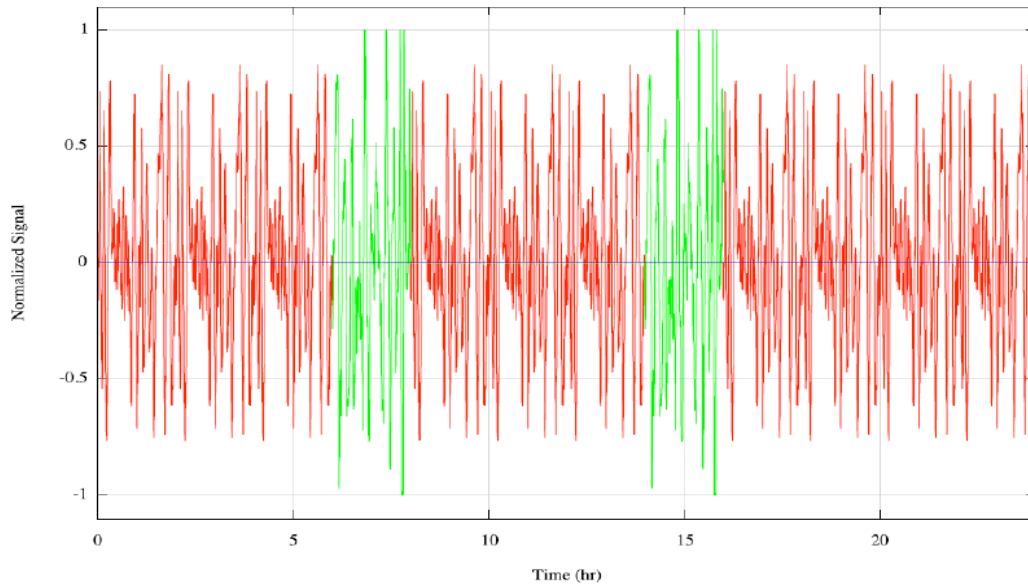


Figura 4.3 Profilo di test per la regolazione di frequenza (convenzione:  $P>0$  scarica)

Dovendo rispecchiare la regolazione di frequenza, il profilo è molto irregolare. All'interno della fonte è disponibile un collegamento al file Excel contenente il profilo.

Un altro studio [6] ha riportato un profilo di prova in grado di testare le prestazioni di un sistema di accumulo che può lavorare in regolazione primaria di frequenza e in spinning reserve.

Prima di applicare la procedura proposta, gli autori suggeriscono, come operazione preliminare, di scaricare interamente la batteria ed eseguire un completo ciclo di carica seguendo le procedure del costruttore; in questo modo si può quantificare con precisione la reale capacità del sistema. Entro scostamenti del  $\pm 10\%$  si accetta il valore fornito dal costruttore. Se lo scostamento fosse superiore si utilizza il valore ricavato sperimentalmente, mentre se fosse inferiore è bene rivolgersi al medesimo costruttore perché il sistema oggetto di test potrebbe presentare anomalie, con possibili ripercussioni sull'esito della prova stessa.

Il profilo proposto è stato inizialmente derivato per una batteria al piombo acido da 20 MW – 14 MWh, tuttavia il risultato è espresso in termini di potenza normalizzata dunque può essere generalizzato a un qualunque sistema. Entrando nel merito del profilo, esso parte a sistema completamente carico e con la prova di regolazione di frequenza, la quale si basa su un'opportuna ripetizione del profilo a potenza pulsante della durata di 160 minuti rappresentato in Fig. 4.4.

#### 4. Sistemi di accumulo: applicazioni e profili di test

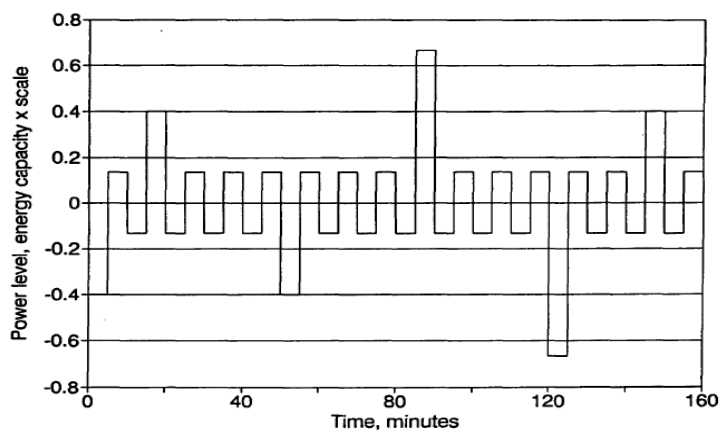


Figura 4.4 Ciclo base da 160 minuti per la prova di regolazione di frequenza

Tale profilo deve essere ripetuto tra le dieci e le venti volte per realizzare una sessione di prova per la regolazione di frequenza della durata complessiva di 40-50h. Terminata la prima sessione, si esegue un ciclo di carica intermedia con un C-rate tale che lo stato di carica massimo raggiungibile sia 95%. Si eseguono in questo modo altre due sessioni di regolazione di frequenza secondo lo schema rappresentato in Fig. 4.5, la cui durata è ora limitata a circa 30h. Al termine della terza sessione non si esegue la carica ma si passa direttamente alla prova per la spinning reserve in accordo al medesimo schema generale, così da avere un profilo della durata complessiva di una settimana.

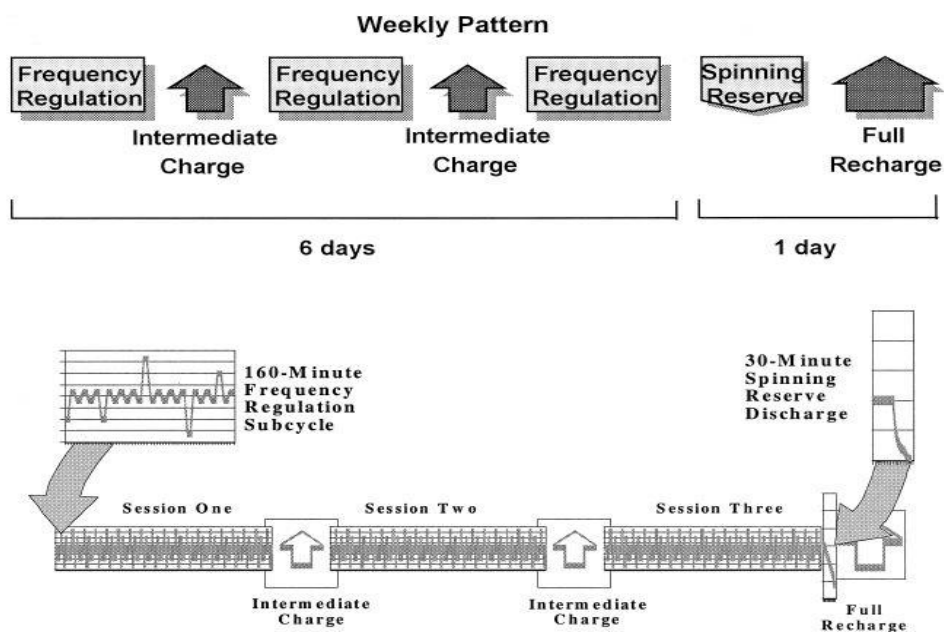


Figura 4.5 Profilo di prova complessivo per il test della regolazione di frequenza e della spinning reserve

Per la spinning reserve si parte dalle condizioni in cui la terza sessione di regolazione primaria ha lasciato la batteria. Si esegue così una scarica di trenta minuti fino a SoC 40%, utilizzando un profilo a potenza costante per il primo quarto d'ora e concludendo la prova con una rampa a scendere fino a un valore di potenza nulla.

## 4.3.2 La funzionalità di peak shaving

In considerazione della descrizione riportata nella sezione 4.1.2, lo studio citato per la precedente funzionalità [6] propone anche un profilo per testare il comportamento di un sistema di accumulo in merito al peak shaving. Tale profilo è rappresentato in Fig. 4.6.

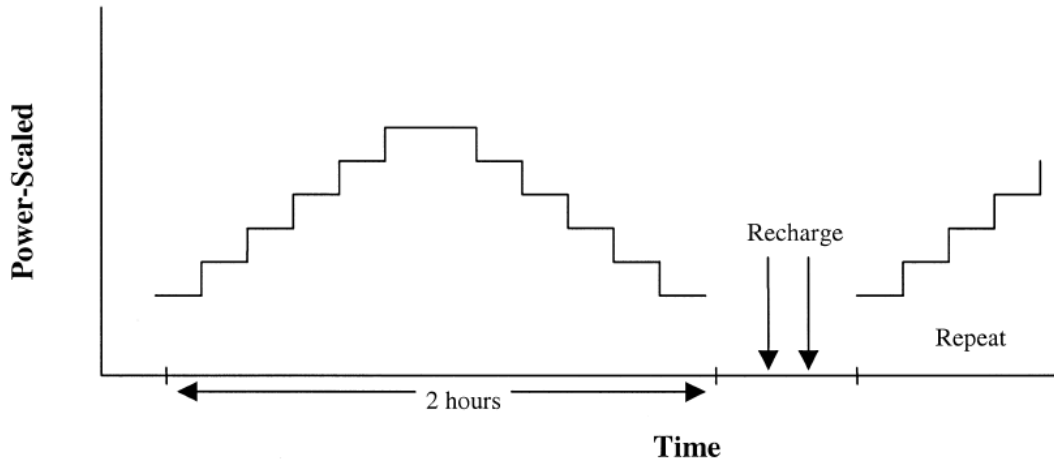


Figura 4.6 Profilo di test per la funzionalità di peak shaving

Si compone di tanti step a potenza costante, progressivamente crescente nella prima parte e decrescente nella seconda, a simulare proprio un sistema che si scarica per coprire un picco di carico, il quale poi si esaurisce. I gradini devono essere opportunamente calcolati sulla base della potenza che il sistema di accumulo può mettere a disposizione per adempiere a tale funzionalità. Il profilo rappresentato può essere ripetuto più volte, dopo aver caricato il sistema in accordo con le indicazioni del costruttore o aver osservato un opportuno periodo di rilassamento. Lo stato di carica iniziale può essere scelto in accordo al profilo che si vuole sottoporre a test, non è quindi obbligatorio partire con 100%. La prova può invece considerarsi conclusa dopo un predeterminato numero di cicli di carica-scarica, o quando le sue grandezze in output non gli consentono più di adempiere a tale compito.

Rimanendo sempre in ambito di peak shaving, un altro studio [5] già citato per la regolazione di frequenza propone un profilo di test differente da quello appena presentato in quanto non si basa su un profilo normalizzato in potenza o su rampe di carica e scarica. È costituito piuttosto da finestre di carica e scarica, all'interno delle quali il sistema si mantiene nel medesimo regime di funzionamento. La ragione di tale scelta sta nella volontà di avere a disposizione un profilo applicabile a tutte le tecnologie indipendentemente dalla taglia e dalle condizioni operative; l'unico vincolo sta nel fatto che, all'interno della medesima finestra, il processo in questione deve avvenire a potenza costante.

Entrando nel merito, lo studio propone tre differenti approcci che differiscono per il tempo di scarica (sei, quattro o due ore), ma hanno tutti una carica della durata di 12h, come è possibile osservare in Fig. 4.7.

#### 4. Sistemi di accumulo: applicazioni e profili di test

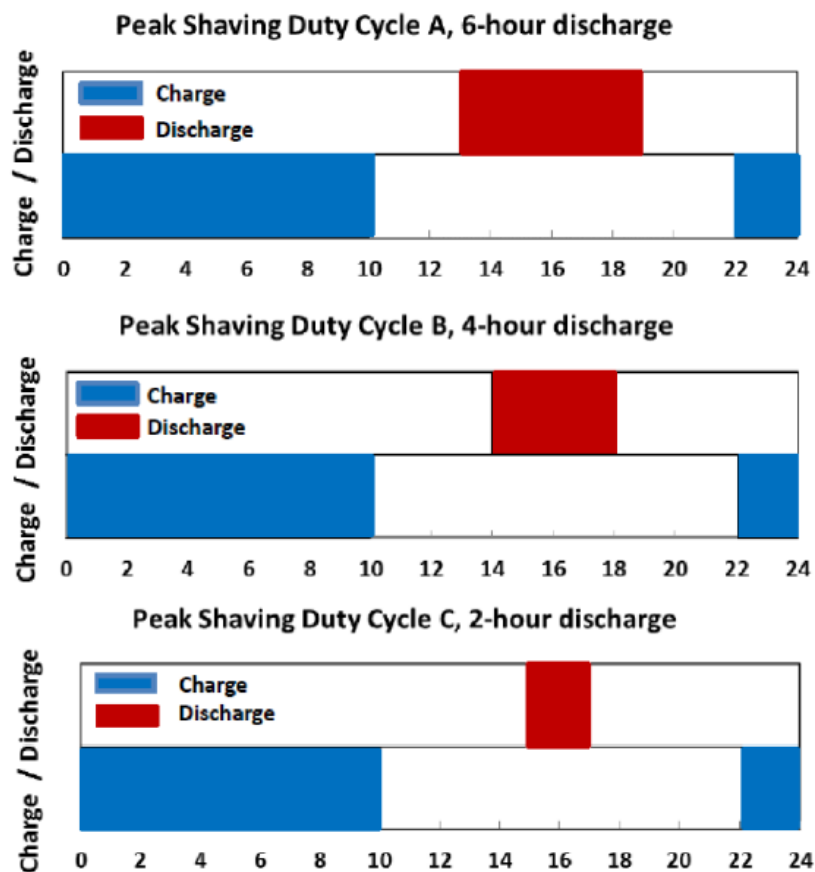


Figura 4.7 Ciclo di lavoro per la funzionalità di peak shaving

Per ottenere complessivamente un profilo di 24h si separano i processi di carica e scarica con dei tempi di rilassamento in cui il sistema si mantiene in standby. La procedura di prova è la seguente:

- Nella fase antecedente all'esecuzione del test bisogna eseguire una carica a potenza nominale e portare il sistema a SoC 100%.
- Dallo stato di carica massimo si parte con la finestra di scarica, la cui durata dipende dall'approccio scelto. Nota la durata e sapendo che la scarica deve portare il sistema al minimo stato di carica, si può calcolare il valore di potenza che deve essere mantenuto costante per tutta la durata della prova.
- Si prosegue poi con una carica di 12h che deve riportare il sistema al massimo stato di carica, utilizzando sempre un profilo a potenza costante.
- Carica e scarica sono sempre separate da un periodo di standby in cui lo stato di carica non si conserva dal momento che il sistema deve continuare ad alimentare i propri ausiliari.

Complessivamente quello che conta è che inizio e termine della prova siano caratterizzate dal medesimo stato di carica in modo da aver realizzato un ciclo completo.

In conclusione, in questo capitolo dopo una breve introduzione sulle diverse modalità di utilizzo dei sistemi BESS, sono stati presentati i principali profili di test per batterie

proposti in letteratura. Si evince chiaramente come il numero di tali profili sia piuttosto ristretto, e soprattutto come in alcuni casi, in particolare per l'applicazione di peak shaving, il profilo abbia un andamento ideale o comunque molto diverso da una reale applicazione sul campo. Per porre rimedio a tale situazione, il capitolo seguente proporrà una metodologia strutturata per ricavare profili di test per la funzione di massimizzazione dell'autoconsumo, che fa parte delle applicazioni behind the meter.

#### 4. Sistemi di accumulo: applicazioni e profili di test



## 5 ANALISI DI PROFILI DI BATTERIA PER LA DETERMINAZIONE DI PROFILI STANDARD: METODOLOGIA PROPOSTA

Questo capitolo è interamente dedicato all'analisi di profili giornalieri di batteria, con lo scopo di identificare un numero limitato di profili standard, facili da replicare in laboratorio e che siano contestualmente rappresentativi di tutti quegli utenti domestici che possiedono un impianto fotovoltaico e un sistema di accumulo elettrochimico. Tali profili inoltre devono essere tali da rappresentare ciascuno una specifica tipologia di utenti, le cui abitudini implicano determinate prestazioni dello stesso sistema di accumulo. Innanzi tutto, è bene precisare che con il termine profilo di batteria si intende di fatto la potenza che la batteria scambia nel corso del tempo. Con riferimento a un sistema di accumulo elettrochimico che lavora accoppiato a un impianto fotovoltaico, tale profilo sarà frutto di un bilancio tra la produzione PV, il carico dell'utenza, eventuali perdite e il consumo degli ausiliari interni al sistema stesso.

Il primo step di questa analisi si focalizzerà sul generare tramite il Load Profile Generator [14], un software la cui funzione sarà descritta nel dettaglio nella sezione 5.3.1, i profili di carico annuali per sessantatré famiglie diverse, ciascuna con le sue peculiarità in termini di composizione del nucleo familiare, così da avere un campione rappresentativo delle diverse realtà domestiche. Con delle opportune ipotesi sulla produzione dell'impianto fotovoltaico, si ricaveranno i profili ideali (cioè che non considereranno autoconsumi o perdite) di una batteria installata presso l'utenza e che lavora per massimizzare l'autoconsumo.

Dopo un'elaborazione preliminare necessaria alla costruzione di un dataset, si procederà alla ricerca di criteri in base ai quali svolgere delle clusterizzazioni. Si premette che una clusterizzazione è una suddivisione in gruppi di un dataset, eseguita secondo opportune logiche ad opera di un algoritmo di machine learning.

Lo step successivo si baserà sull'effettivo utilizzo di un algoritmo di clusterizzazione per individuare un certo numero di gruppi all'interno del dataset. Chiaramente il numero di gruppi sarà pari al numero di profili standard che si desidera ottenere; questi profili standard dovranno poi essere ricavati dai profili risultati essere centroidi dei differenti cluster.

Si ricorda che l'obiettivo è individuare dei profili standard rappresentativi dei diversi cluster, all'interno dei quali i profili reali devono manifestare un rendimento simile. Pertanto, una volta ottenuti questi gruppi, si utilizzerà un modello di batteria sodio-cloruro di nichel per valutare il rendimento che caratterizza i singoli profili reali, dopodiché si definirà un opportuno indicatore per verificare che la clusterizzazione abbia effettivamente prodotto dei gruppi di profili con rendimento simile.

5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
metodologia proposta

Quanto appena delineato è il filo conduttore generale sulla base del quale si presenterà l'analisi condotta. La trattazione sarà opportunamente suddivisa in due parti. In questo capitolo sarà descritta nel dettaglio la metodologia utilizzata, in modo da renderla ripetibile per un qualunque set di profili di carico. Il capitolo 6 invece darà spazio ai risultati che tale procedura ha prodotto a partire dai profili considerati nella presente analisi.

Prima di entrare nel dettaglio della procedura adottata, è però opportuno fornire qualche breve cenno teorico su due argomenti fondamentali per la trattazione: la FFT (Fast Fourier Transform) e gli algoritmi di clusterizzazione. Senza alcuna pretesa di esaustività, si vogliono fornire alcuni concetti essenziali alla comprensione del procedimento adottato.

### 5.1 Cenni alle tecniche di cluster analysis

La clusterizzazione è un processo che suddivide un set di dati in un certo numero di gruppi, detti appunto cluster, in modo che gli elementi appartenenti ad uno stesso cluster abbiano caratteristiche comuni, manifestando contestualmente delle dissimilarità rispetto agli elementi appartenenti ad altri cluster. La similarità non deriva certo da una scelta qualitativa, bensì è determinata da algoritmi che valutano ad esempio distanze euclidee. Si tratta di un'analisi che trova applicazione in una molteplicità di settori, tuttavia per capire la sua utilità pratica si cita un esempio afferente al mondo manageriale. Si consideri a tal proposito il direttore generale di una grande azienda, che si trova costretto a raggruppare i suoi clienti in modo da assegnarli a cinque manager, suoi stretti collaboratori. La scelta migliore è quella di assegnare a ciascun manager dei clienti che siano molto simili tra loro, facendo in modo di conseguenza che clienti diversi non finiscano sotto il controllo della stessa persona. In questo modo ogni collaboratore può focalizzarsi sulla tipologia di cliente di sua competenza e adottare scelte mirate a vantaggio della produttività aziendale [15].

Creare partizioni all'interno di un gruppo è proprio quello che compete alla cluster analysis, e il suo utilizzo può essere chiaramente esteso al mondo del data mining, in cui si andranno a creare raggruppamenti all'interno di grandi set di dati, così da mettere insieme quegli elementi che presentano peculiarità comuni. L'obiettivo infatti è sempre quello di ottenere dei risultati facili da interpretare e soprattutto da utilizzare per uno scopo preciso. Inoltre, in letteratura esistono già numerosi studi [17,43] che la applicano all'ambito dei sistemi elettrici e in particolare ai profili di carico. Da questo punto di vista quindi, la compatibilità della cluster analysis con l'argomento di ricerca oggetto della presente trattazione non può essere messa in discussione.

In letteratura esistono diversi algoritmi di cluster analysis. In questa trattazione si utilizzerà l'algoritmo *k-means*, che rientra nella famiglia dei "partitioning methods". Si tratta di algoritmi che sfruttano l'idea più semplice e intuitiva per realizzare una clusterizzazione: creare un numero assegnato di partizioni all'interno di un set di dati in modo che ogni elemento appartenga esclusivamente a una di queste. Il loro funzionamento si basa su una funzione obiettivo che coinvolge delle distanze euclidee e

che deve essere opportunamente ottimizzata per garantire similarità tra gli elementi appartenenti ad uno stesso cluster.

Entrando invece nel dettaglio dell'algoritmo *k-means*, ciò che lo contraddistingue da altri algoritmi appartenenti alla stessa famiglia è l'impiego dei cosiddetti centroidi. Un centroide è ciò che rappresenta l'intero cluster, concettualmente il suo centro, e nella pratica è la media di tutti i punti appartenenti a quel cluster. La funzione obiettivo  $E$  che guida l'intero algoritmo coinvolge chiaramente la distanza di ogni elemento dal centroide del cluster di appartenenza, in accordo con la seguente formula in cui  $k$  è il numero di cluster,  $p$  gli elementi del dataset,  $c_i$  e  $C_i$  rispettivamente l' $i$ -esimo centroide e l' $i$ -esimo cluster:

$$E = \sum_{i=1}^k \sum_{p \in C_i} dist(p, c_i)^2 \quad (5.1)$$

Inizialmente l'algoritmo riceve in input il numero di cluster e seleziona in modo random un ugual numero di elementi del dataset, così da avere dei centroidi di primo tentativo. In seguito, tutti gli altri elementi sono assegnati al cluster rappresentato dal centroide a loro più simile, ossia a quello che rispetto a loro presenta la minima distanza euclidea. Si calcola quindi la media effettiva di tutti gli elementi appartenenti a un dato cluster così da individuare i centroidi di secondo tentativo. A questo punto si riassegnano gli elementi ai diversi cluster, utilizzando sempre il criterio della minima distanza, e si procede iterativamente finché tra un'iterazione e l'altra non si osserva più alcun cambiamento nella composizione dei cluster stessi. Schematicamente l'algoritmo è rappresentato in Fig. 5.1 [15].

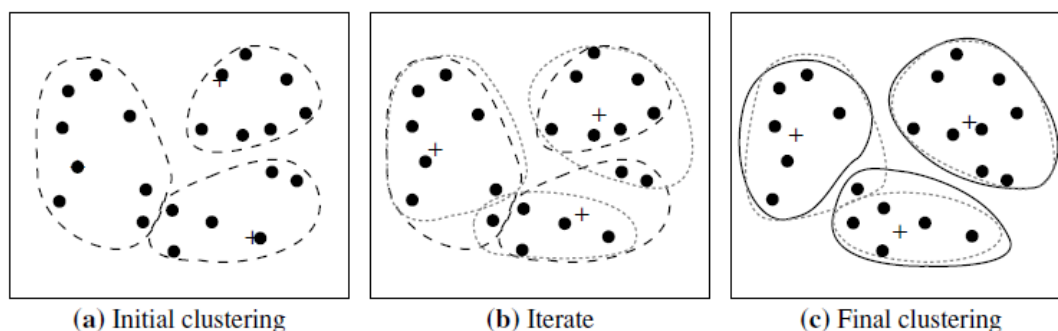


Figura 5.1 Rappresentazione schematica di un'iterazione dell'algoritmo *k-means*

## 5.2 Cenni sulla trasformata discreta di Fourier

La FFT, acronimo di Fast Fourier Transform, è un metodo che consente di calcolare la trasformata discreta di Fourier, ed è particolarmente apprezzata per il poco onere computazionale richiesto dalla sua esecuzione. Senza entrare nel dettaglio della trattazione matematica relativa alla FFT, che esula fortemente da questa trattazione, ci si limiterà a considerarla come uno strumento che riceve in input una certa grandezza espressa nel dominio del tempo e restituisce in output la stessa quantità espressa nel

5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
metodologia proposta

dominio delle frequenze. Tale trasformata è già implementata nell'omonima funzione Matlab.

Mantenendo quindi un approccio del tipo "black-box", si ha a che fare uno strumento che converte un profilo temporale in un segnale espresso nel dominio delle frequenze: tempo e frequenza sono infatti grandezze tra loro reciproche. Con riferimento alla Fig. 5.2, si vede chiaramente come la FFT consenta di fatto un altro punto di vista sui dati, riuscendo a scomporre un segnale in tutte le armoniche che lo costituiscono. In questo modo, a partire da un qualunque profilo, si può capire quali sono le armoniche principali che lo compongono e, eliminando tutte le altre, si può quindi procedere nell'analisi con un profilo nettamente più semplificato, a discapito di una perdita di informazioni sicuramente trascurabile.

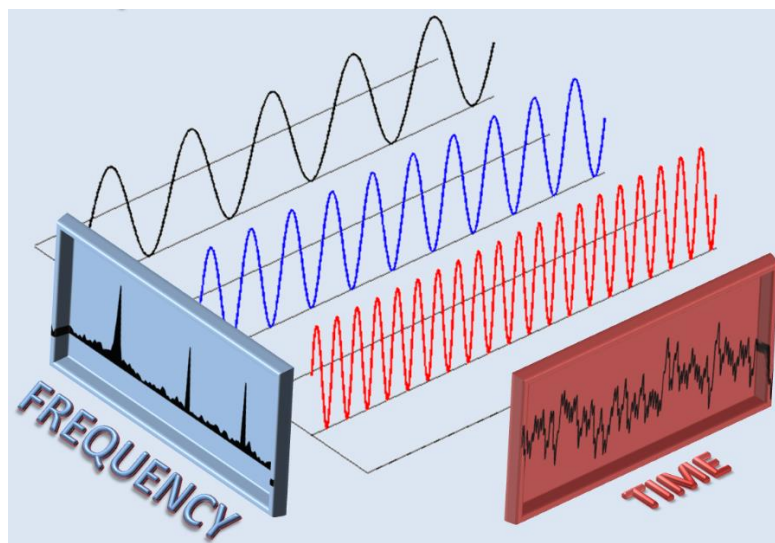


Figura 5.2 Rappresentazione di un segnale in uno spazio 3D con frequenza e tempo

Si entra ora nel merito della descrizione, da un punto di vista teorico, della procedura adottata nella presente analisi. L'obiettivo è proprio quello di delineare una metodologia strutturata, il più possibile indipendente dal dataset in oggetto (benché qualche riferimento pratico risulterà indispensabile per una descrizione esaustiva), in modo che questa sia ripetibile, auspicabilmente con eventuali sviluppi, in analisi successive a partire da un qualunque set di profili di carico.

### 5.3 Ipotesi di lavoro e costruzione dei profili di batteria

Ricordando che l'obiettivo di questa trattazione è l'analisi dei profili di batteria al fine di individuare profili standard facili da replicare in laboratorio, in considerazione dei cenni introduttivi appena delineati, si procede ora con alcune considerazioni preliminari in modo da dichiarare fin da subito le ipotesi adottate.

Per fissare meglio a livello concettuale tali ipotesi, si consideri per semplicità un profilo di batteria giornaliero. Nel caso ideale in analisi, ossia quello che non prevede alcun

5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
metodologia proposta

autoconsumo per gli ausiliari del sistema di accumulo né alcun tipo di perdite, tale profilo è univocamente determinato dai seguenti tre fattori:

1. Profilo di carico caratteristico dell'utenza
2. Profilo di irradianza solare
3. Taglia e orientamento dell'impianto fotovoltaico

Il primo aspetto è sicuramente quello a cui sarà data più attenzione all'interno della presente analisi. Per il momento si precisa che saranno considerati i profili di carico giornalieri di un anno intero per un elevato numero di famiglie, così da avere un campione rappresentativo di tutte le possibili realtà domestiche.

Il secondo aspetto riveste quasi la medesima importanza del precedente, tuttavia in questo caso si è scelto di lavorare con il profilo di irradianza solare registrato a Milano il giorno 18 aprile 2004 con l'ipotesi di cielo limpido (fonte: [www.soda-pro.com](http://www.soda-pro.com)). Si tratta chiaramente di un'ipotesi semplificativa molto forte, che è stata resa indispensabile per limitare il numero di variabili da considerare nella costruzione dei profili. Si è ritenuto quindi opportuno escludere gli effetti legati alla variabilità meteorologica e stagionale. Bisogna infatti osservare che in letteratura non sono presenti studi svolti direttamente sui profili di batteria: tale analisi si presenta quindi come un precursore in tale campo di ricerca. Ai primi passi di una nuova analisi a maggior ragione è ragionevole utilizzare assunzioni che semplifichino il problema, al fine di concentrarsi sulla metodologia e strutturare così un approccio di studio.

Non avendo in questo caso una taglia di impianto da scegliere, si è scelto di adottare come un riferimento p.u. (per unit) il profilo di irradianza appena indicato, variandone di volta in volta il contenuto energetico così da creare un profilo di produzione fotovoltaica tale per cui a livello giornaliero l'energia in arrivo dall'impianto PV sia esattamente uguale a quella richiesta dall'utenza.

Tali ipotesi, che si ripete essere molto forti, sono state fatte con l'obiettivo di eliminare la dipendenza del profilo di batteria da tutto ciò che concerne la produzione fotovoltaica, così da limitare le variabili aleatorie del problema e concentrarsi prevalentemente su ciò che caratterizza i profili di carico. Alla luce di queste considerazioni risulta facile comprendere perché è stato utilizzato per tutto l'anno il profilo di radiazione solare misurato in un preciso giorno: se ciò che conta è ricevere giornalmente la stessa energia consumata dal carico, l'unico aspetto importante è utilizzare un profilo che rispecchi la reale evoluzione giornaliera della potenza in arrivo dal sole, senza creare delle distinzioni a livello stagionale.

Si potrebbe comunque contestare il fatto che l'evoluzione del profilo stesso e la durata del dì hanno comunque delle variazioni significative in base alla stagione. In tal caso è bene precisare che anche tale problematica è stata inizialmente presa in considerazione. Si è scelto proprio un profilo di irradianza misurato a metà aprile, cioè a metà primavera, confidando che potesse acquisire un significato di profilo medio rispetto a tutti i mesi dell'anno.

Puntualizzate tutte le assunzioni alla base dell'analisi qui condotta, è ora possibile entrare nel merito dei **profili di carico**, a partire dai quali si ricaveranno i profili di batteria. È

5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
metodologia proposta

bene ricordare che proprio la variabilità dei profili di carico è una delle principali preoccupazioni di questa trattazione. Pertanto, è indispensabile considerare un elevato numero di famiglie che differiscono per alcuni fattori: tipologia di nucleo familiare, propensione al risparmio energetico, abitudini, stile di vita, attività lavorative, ecc....

A tal proposito non si sono utilizzate misure reali, ma si è fatto riferimento al Load Profile Generator, un software che permette di simulare diversi profili di carico, tra cui quello dell'energia elettrica, per sessantatré famiglie già definite di default con un elevato livello di dettaglio in termini di composizione del nucleo familiare, abitudini quotidiane, dimensione dell'abitazione e tipologia di elettrodomestici presenti nella stessa. Il programma consente anche un'estrema personalizzazione di tutte queste caratteristiche, tuttavia il numero e la varietà di famiglie predefinite è sembrato sufficiente a rappresentare una casistica piuttosto ampia. Tali famiglie sono elencate in Tab. 5.1.

1. Coppia, entrambi al lavoro	2. Coppia, 30-64 anni con lavoro
3. Famiglia, 1 figlio, entrambi al lavoro	4. Coppia, 30-64, uno con lavoro, uno a casa
5. Famiglia, 3 figli, entrambi al lavoro	6. Uomo single e disoccupato
7. Uomo single con lavoro	8. Donna single, 2 bambini, con lavoro
9. Donna single, 30-64 anni, con lavoro	10. Uomo single, lavoratore a turni
11. Studentessa di filosofia	12. Studente di filosofia
13. Studente lavoratore	14. 3 adulti:coppia 30-64 anni (lavoro) e un senior
15. Coppia che lavora, 2 bambini e due senior	16. Coppia over 65
17. Famiglia con 2 bambini, genitori disoccupati	18. Coppia, entrambi al lavoro, con domestica
19. Coppia, un lavoratore, 3 figli	20. Coppia 30-64 anni, lavoratori a turno
21. Donna single, lavoratrice, 1 figlio	22. Uomo over 65, single
23. Donna over 65, single	24. Donna single, under 30, lavoratrice
25. Donna single, under 30, disoccupata	26. Famiglia, entrambi al lavoro, 2 figli
27. Uomo single, under 30, disoccupato	28. Uomo single, under 30, lavoratore
29. Uomo single, pensionato	30. Donna single, pensionata
31. Coppia under 30, disoccupati	32. Coppia under 30, lavoratori
33. Coppia under 30, un lavoratore	34. Donna single, 30-64 anni, lavoratrice
35. Donna single, 30-64 anni, disoccupata	36. Uomo single, 30-64 anni, lavoratore

5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
metodologia proposta

37. Uomo single, 30-64 anni, disoccupato	38. Coppia, 30-64 anni, lavoratori
39. Coppia, 30-64 anni, disoccupati	40. Famiglia con 3 figli, entrambi al lavoro
41. Uomo single lavoratore, 2 bambini	42. Uomo single lavoratore, 1 bambino
43. Famiglia con 2 bambini, un lavoratore	44. Famiglia con 1 bambino, un lavoratore
45. Donna single disoccupata, 1 bambino	46. Donna single disoccupata, 2 bambini
47. Famiglia di disoccupati, 2 bambini	48. Famiglia di disoccupati, 1 bambino
49. Donna single disoccupata, 3 bambini	50. Coppia over 65
51. Studenti che condividono casa	52. Famiglia, un lavoratore, 2 figli
53. Coppia di pensionati	54. Coppia sui 40 anni, entrambi lavoratori
55. Famiglia, 2 bambini, moglie al lavoro	56. Famiglia, 2 bambini, marito al lavoro
57. Coppia di pensionati	58. Famiglia di disoccupati, 3 bambini
59. Famiglia, 1 neonato, un lavoratore	60. Famiglia, 1 bambino, lavoratori
61. Coppia con due bambini, uomo al lavoro	62. Coppia di pensionati
63. Coppia di lavoratori a turno	

Tabella 5.1 Elenco delle famiglie predefinite in Load Profile Generator

Per ciascuna di queste famiglie è stato generato il profilo di carico per un anno, dal 1° gennaio al 31 dicembre 2016, mantenendo sempre le impostazioni predefinite fatta eccezione per il passo di discretizzazione temporale, imposto pari a un minuto, e per l'intensità energetica che deve caratterizzare il profilo. In merito a tale caratteristica, che tiene conto del numero di apparecchiature elettriche presenti nell'abitazione e della loro efficienza energetica, si è scelto di effettuare sia una simulazione in modalità "Energy saving" sia una in modalità "Energy intensive", in modo da avere alla fine i risultati di centoventitré famiglie diverse. I profili annuali così generati hanno ad esempio l'andamento mostrato in Fig. 5.3.

I profili generati presentano però delle interruzioni nette quando la famiglia è in vacanza. Tali interruzioni, non hanno un contenuto informativo rilevante dal momento che in questa analisi si considerano i singoli profili giornalieri. Pertanto, si esegue un'analisi preliminare in modo da scartare tutti quei giorni la cui energia richiesta sia nettamente inferiore rispetto a quella che caratterizza tutti gli altri. A seguito di questa prima elaborazione si ottengono dei profili di carico privati delle interruzioni dovute alle vacanze (Fig. 5.4). Chiaramente ogni famiglia ha il proprio periodo di ferie, dunque nei diversi casi si rimuove un numero di giorni variabile: si avranno quindi dei profili annuali composti complessivamente da un numero diverso di giorni.



5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
metodologia proposta

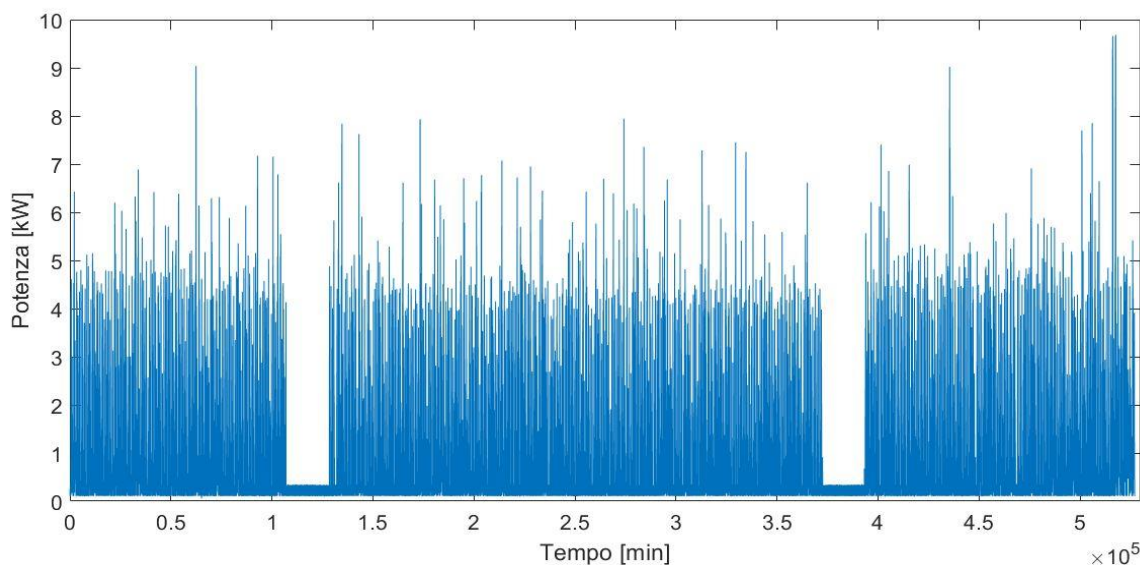


Figura 5.3 Profilo di carico annuale per la famiglia n.1 in modalità "energy intensive"

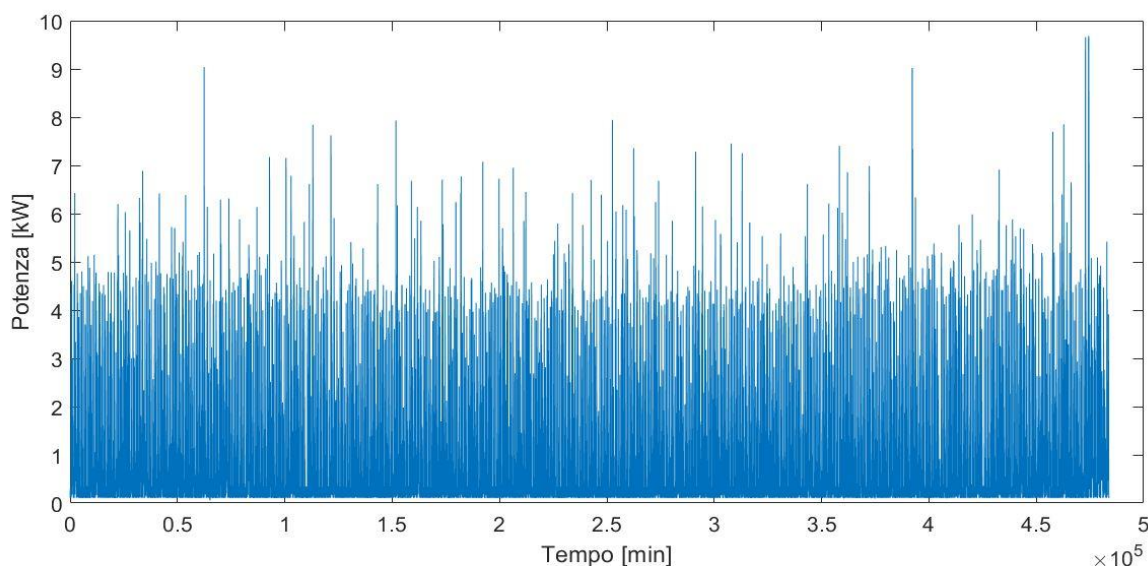


Figura 5.4 Profilo di carico annuale per la famiglia n.1 in modalità "energy intensive" rimossi i periodi di vacanza

A questo punto si hanno tutti i profili di carico. A partire dal profilo di irradianza solare scelto, bisogna generare per ogni giorno e per ogni famiglia il **profilo di produzione dell'impianto fotovoltaico** in modo che l'energia richiesta giornalmente dal carico sia pari a quella in arrivo dall'impianto stesso. A titolo di esempio si presentano in Fig. 5.5 i due profili per la famiglia 1 in modalità energy intensive il giorno 4 luglio 2016, evidenziando come il loro contenuto energetico sia equivalente.

Per ottenere infine il **profilo di batteria**, è sufficiente sottrarre istante per istante il profilo di carico a quello di produzione: si otterrà allora un profilo con valori positivi per potenze assorbite dalla batteria e negativi per quelle erogate. Il risultato è presentato in Fig. 5.6. Utilizzando lo stesso approccio per tutti i giorni e per tutte le famiglie si costruisce un dataset di 44.115 profili giornalieri.



5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
metodologia proposta

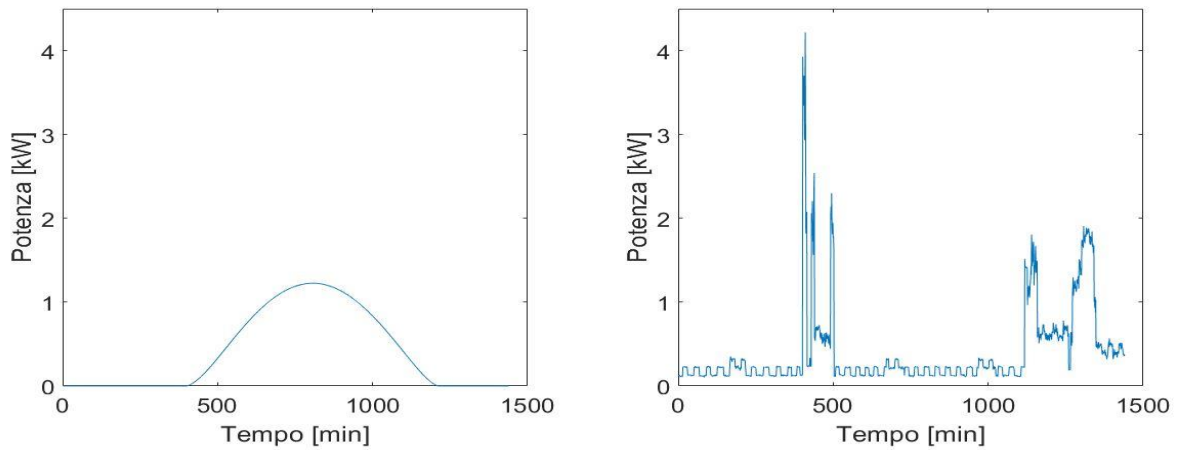


Figura 5.5 Profilo di produzione dell'impianto fotovoltaico (sinistra) e profilo di carico (destra)

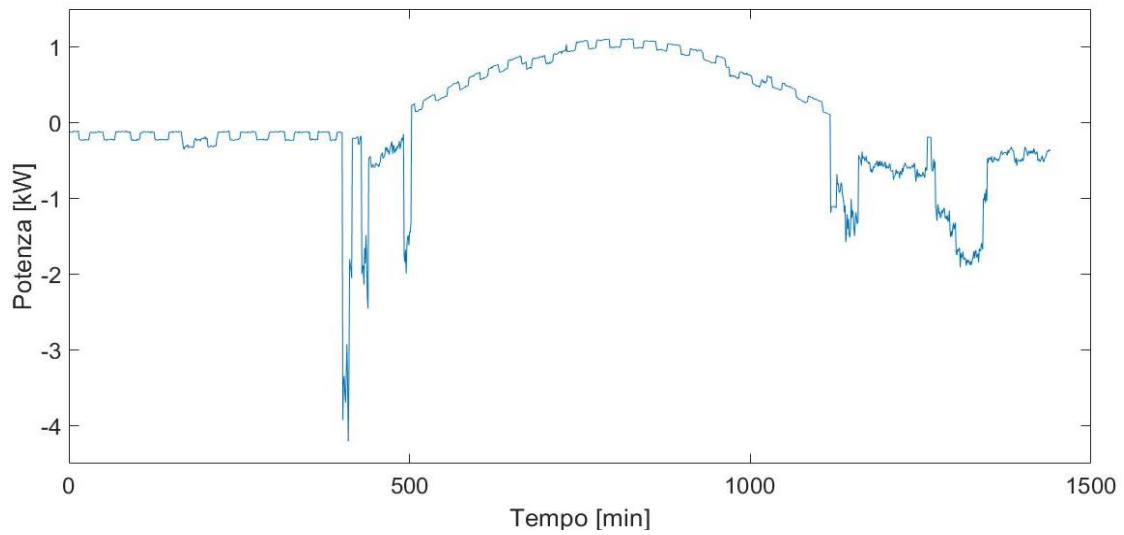


Figura 5.6 Profilo di batteria per la famiglia n.1 (energy intensive) il 4 luglio 2016

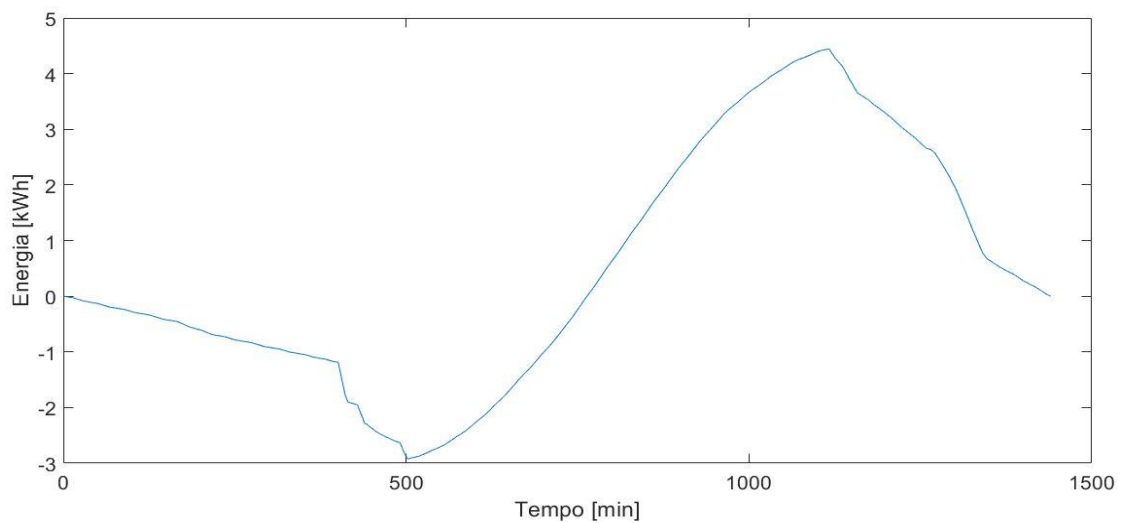


Figura 5.7 Andamento dell'energia cumulata della batteria per la famiglia n.1 (energy intensive) il 4 luglio 2016

5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard: metodologia proposta

## 5.4 Introduzione alla cluster analysis

Prima di ricorrere agli algoritmi di clusterizzazione, un approccio più semplice per arrivare a una soluzione potrebbe essere suddividere i profili giornalieri di batteria in base a caratteristiche di immediato riscontro pratico, quali sono appunto il numero di componenti delle diverse famiglie e la tipologia di giorno della settimana (giorni feriali, sabato, festivi). Chiaramente con un obiettivo di questo tipo non si considera ciascun profilo nella sua evoluzione temporale, ma si preferisce una caratterizzazione in termini di potenza massima in modulo e massima variazione di contenuto energetico della batteria su base giornaliera.

Volendo avere una visione grafica di queste due grandezze, per la potenza massima in modulo è sufficiente fare riferimento alla Fig. 5.6, considerarne i valori assoluti e prendere il massimo, per la massima variazione di contenuto energetico della batteria è necessario invece considerare la Fig. 5.7 in cui è rappresentata la curva cumulata dell'energia contenuta nella batteria in funzione del tempo. Si definisce massima variazione di contenuto energetico della batteria (in breve  $\Delta$ Energia), la differenza tra il massimo e il minimo assoluti di questa curva. La scelta di queste variabili non è casuale ma considera due parametri che condizionano il dimensionamento di una batteria sul campo: la potenza massima sarà associata al C-rate, mentre la massima variazione di energia alla capacità della batteria stessa.

È indispensabile valutare tale approccio alternativo in modo da giungere inevitabilmente alla conclusione che i criteri pratici sono inadeguati a una suddivisione dei profili. L'unica via da percorrere deve necessariamente considerare gli algoritmi clusterizzazione.

Appurata la necessità di algoritmi di machine learning per dar luogo allo studio che si ha l'obiettivo di condurre in questa trattazione, è bene delineare un quadro introduttivo alla clusterizzazione con lo scopo di dettagliare tutte le scelte alla base dei procedimenti che saranno utilizzati nei prossimi paragrafi.

### 5.4.1 Scelta dell'algoritmo e del numero di cluster da ricercare

La prima scelta vincolata in ordine logico è relativa all'algoritmo da impiegare nello svolgimento dell'analisi. Come precisato nei cenni introduttivi, in letteratura esistono numerosi algoritmi di cluster analysis, di conseguenza la scelta non è univoca né tantomeno esistono scelte oggettivamente preferibili di altre. Ad ogni modo, si sceglie di utilizzare per questa trattazione l'algoritmo *k-means*, appartenente alla famiglia dei "partitioning methods" e caratterizzato dall'impiego dei cosiddetti centroidi come elementi rappresentativi dei diversi cluster. Tale algoritmo è già implementato in Matlab con l'omonima funzione.

Le ragioni alla base di tale scelta sono di diversa natura. La prima ragione ha una motivazione di carattere molto pragmatico: trattandosi infatti di uno degli algoritmi il cui principio di funzionamento risulta più intuitivo, è immediato comprendere come tale caratteristica si presti bene per una trattazione come la presente. In questo caso infatti ci si vuole servire di un algoritmo per ottenere dei risultati da poter utilizzare nella pratica e sui cui poter esprimere delle considerazioni, senza dover approfondire i fondamenti

5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
metodologia proposta

teorici dell'algoritmo stesso o focalizzarsi su vari criteri per la scelta di quello più adatto. La seconda motivazione invece nasce dall'esigenza di mantenere comunque un approccio rigoroso, e si basa quindi sul valutare come l'algoritmo *k-means* trova impiego in altre pubblicazioni di simile argomento. A tal proposito si conferma che numerosi studi, i quali però considerano la clusterizzazione dei profili di carico, fondano la loro trattazione su questo algoritmo. A titolo di esempio se ne citano solo alcuni. In un caso [43] gli autori presentano una breve revisione letteraria di diversi algoritmi grazie alla quale definiscono il *k-means* come il più conosciuto e come uno dei più efficaci metodi di clusterizzazione. Lo stesso si ripete per un altro studio [18] in cui tale algoritmo è presentato come uno dei più consolidati. In un altro caso [19] si adduce come motivazione alla base dell'utilizzo del *k-means* il fatto che sia quello meglio conosciuto e soprattutto il più utilizzato per clusterizzare dati di carico.

Si potrebbero comunque fare obiezioni sul non aver preso in considerazione il possibile utilizzo di altri algoritmi, perlomeno a livello di analisi preliminare, in modo da poter valutare e confrontare le caratteristiche dei risultati ottenuti. In tal caso allora è bene ribadire che scendere ad un eccessivo livello di dettaglio nello studio di algoritmi esula dagli obiettivi. Ad ogni modo, un possibile sviluppo futuro della presente procedura potrebbe proprio includere uno step preliminare finalizzato ad ottimizzare la scelta dell'algoritmo. A tal proposito si ritiene opportuno suggerire una pubblicazione [20] che propone un interessante criterio per la scelta dell'algoritmo di clusterizzazione più adatto alle esigenze del proprio studio. Tale criterio si basa sulla definizione e sul calcolo di un indice che valuta la stabilità del risultato per ciascuno degli algoritmi presi in considerazione. La sua definizione è stata introdotta dagli autori sulla base di alcune osservazioni, le quali hanno riscontrato delle differenze nel risultato di una clusterizzazione eseguita più volte con lo stesso algoritmo e con lo stesso numero di cluster come dato di input.

Avendo scelto l'algoritmo *k-means*, la decisione successiva deve necessariamente riguardare il numero di cluster che si vuole ottenere: un aspetto negativo di questo algoritmo è appunto il fatto che il numero di cluster deve essere un dato di input, e non è definito automaticamente in base alle caratteristiche del dataset.

Anche in questo caso la letteratura suggerisce dei criteri per effettuare la scelta migliore. Tutti questi criteri però implicano di fatto l'esecuzione dell'algoritmo di clusterizzazione, di volta in volta con un numero di cluster diverso in input. Ciò richiede quindi di aver già definito la logica rispetto a cui eseguire la cluster analysis in modo da poter lanciare l'algoritmo. Sembra dunque prematuro valutare tali criteri allo stato attuale dell'analisi. Si preferisce allora assumere di voler cercare quattro cluster diversi, sulla base della considerazione che quattro possa essere un buon compromesso tra l'esigenza di limitare il numero di profili standard da testare in laboratorio, e la necessità di rispecchiare comunque la diversificazione dei profili reali. Alla fine, si metterà in discussione questa scelta servendosi dei criteri suggeriti in letteratura oppure definendo opportunamente un indice per una valutazione critica del risultato ottenuto. In ogni caso si pone a cinque il

5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard: metodologia proposta

numero massimo di profili standard che si è disposti ad ottenere, altrimenti la praticità di utilizzo del risultato dovuta appunto al numero ristretto di profili sarebbe compromessa.

## 5.5 Clusterizzazioni basate su parametri caratteristici

Definito l'algoritmo e il numero di cluster da ricercare, si procede ora con le clusterizzazioni dei profili descritti per mezzo di parametri caratteristici, e non considerati quindi nella loro evoluzione temporale.

Prima di tutto si applica l'algoritmo scelto allo scenario descritto nel paragrafo 5.4, ossia ai profili di batteria caratterizzati in potenza massima giornaliera e  $\Delta$ Energia, al fine sia di valutare graficamente le caratteristiche del risultato sia di ottenere già una clusterizzazione degli stessi profili definiti uno spazio bidimensionale. Successivamente, dopo aver opportunamente definito una terza grandezza che caratterizzi i profili, si applica nuovamente l'algoritmo di clusterizzazione su dei profili definiti però in uno spazio tridimensionale, in modo da poter anche valutare l'evoluzione del risultato al crescere delle dimensioni caratteristiche del problema. Per completezza si sceglie infine di ripetere le clusterizzazioni anche sulla base di profili descritti in uno spazio monodimensionale in termini di sola potenza massima o  $\Delta$ Energia.

Solo in un secondo momento si procederà a clusterizzare i profili così come sono descritti nel loro dominio di definizione.

Gli algoritmi di clusterizzazione infatti possono elaborare dati definiti in uno spazio  $n$  - dimensionale, con  $n$  indefinitamente grande, dunque non vi sono particolari limitazioni a riguardo. Tuttavia, si ritiene indispensabile procedere inizialmente con delle clusterizzazioni sui profili descritti in uno spazio a poche dimensioni in modo da poter comprendere graficamente il modus operandi dell'algoritmo. A tal proposito si elencano ora quali sono le clusterizzazioni basate sui parametri caratteristici che saranno eseguite:

- Clusterizzazioni 1D, una in termini della sola potenza massima giornaliera in modulo, una in base al solo  $\Delta$ Energia. La logica è voler valutare se tra i due indicatori fondamentali nel dimensionamento di una batteria ve ne sia uno di rilevanza maggiore dell'altro ai fini della clusterizzazione.
- Clusterizzazione 2D in potenza massima e  $\Delta$ Energia.
- Clusterizzazione 3D in potenza massima in modulo,  $\Delta$ Energia e rapporto tra il tempo in cui la batteria opera in un regime di carica e quello in cui si ha un regime di scarica.
- Clusterizzazione 3D in potenza massima in modulo,  $\Delta$ Energia e numero di cambi di segno della corrente. Di fatto la terza variabile è un altro parametro arbitrariamente scelto, in analogia a quanto fatto per il rapporto tra il tempo in carica e quello in scarica. La motivazione di tale scelta sta sempre nel voler capire se una terza dimensione riesca ad aggiungere informazioni rispetto ad una rappresentazione in termini di potenza ed energia; però si vuole provare anche con una grandezza diversa rispetto a quella utilizzata prima.

## 5.6 Clusterizzazioni basate su profili completi: definizione criteri

Finora è stata dimostrata la necessità di una cluster analysis per poter procedere nello studio dei profili di batteria, è stato poi scelto l'algoritmo *k-means* e si è ipotizzato inizialmente di voler cercare quattro cluster; è bene ricordare infatti che l'algoritmo selezionato richiede come dato di input il numero di cluster da ricercare. Tale scelta si giustifica con l'ottimo compromesso che quattro può rappresentare tra la necessità di contenere il numero di profili standard, e l'esigenza di mantenere la diversificazione caratteristica dei profili reali.

Questa analisi vuole però coinvolgere il profilo nella sua evoluzione temporale, in quanto non sembra sufficiente la sua descrizione con un numero limitato di variabili. In altre parole, l'intero profilo giornaliero di potenza dovrà costituire l'input dell'algoritmo. Tuttavia, per fare ciò è bene definire appositi criteri con cui elaborare il profilo prima del suo passaggio in input all'algoritmo di clusterizzazione; la motivazione di ciò sarà più chiara nel prossimo paragrafo.

L'algoritmo può sì gestire dati definiti in uno spazio  $n$  – dimensionale, ma ricorrendo al calcolo di distanze euclidee, analogamente al caso bidimensionale, sussiste sempre la possibilità che tra le diverse dimensioni ve ne siano alcune caratterizzate da valori numerici in modulo nettamente inferiori a quelli di altre. Il risultato è che tali dimensioni avrebbero un'importanza irrilevante nel calcolo della distanza e dunque si perderebbero le informazioni in esse contenute.

Per eliminare tale problema bisogna in un certo senso predisporre i dati di input, prevedendo delle normalizzazioni o eventualmente elaborandoli con criteri per i quali un differente valore numerico sia effettivamente indice di quanto quel dato sia rilevante o trascurabile. In termini più pratici, in un profilo espresso in funzione del tempo non è vero che i valori piccoli siano meno rilevanti di quelli a potenza elevata, in quanto entrambi concorrono a caratterizzare il comportamento di quel dato profilo. Esprimendo però lo stesso profilo in un altro modo, dei dati numericamente più piccoli potrebbero invece indicare che l'informazione da essi rappresentata non è rilevante ai fini della caratterizzazione del profilo stesso.

Ad ogni modo, in questa trattazione si svolgeranno delle clusterizzazioni su:

- Profili di batteria normalizzati per il rispettivo valore di modulo massimo
- Profili di batteria non normalizzati
- Profili di batteria, normalizzati e non, espressi come risultato dalla FFT

Obiettivo principale del prossimo paragrafo è descrivere le operazioni preliminari eseguite in tutti i punti appena elencati, in modo da comprendere come devono essere i profili di batteria da passare in input al *k-means*.

5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
metodologia proposta

5.6.1 Profili normalizzati per il rispettivo valore di modulo massimo

Questo approccio si basa appunto sul dividere ciascun profilo di batteria, considerato in tutta la sua evoluzione giornaliera, per il proprio elemento di modulo massimo. Così facendo tutti i valori risultanti appartengono all'intervallo  $[-1;1]$ , in cui è bene ricordare che valori negativi indicano potenze erogate dalla batteria. A titolo di esempio si riporta in Fig. 5.8 lo stesso profilo rappresentato in Fig. 5.6, a seguito della normalizzazione appena descritta: si evidenzia come la forma sia la medesima e come l'unico cambiamento sia chiaramente sull'asse delle potenze.

La scelta di normalizzare i profili deriva sì da un'esigenza associata al modus operandi dell'algoritmo, tuttavia ha anche un significato dal punto di vista fisico. In accordo a quanto riferito da uno studio già citato nei paragrafi precedenti [43], normalizzare i dati in questo modo prima della loro clusterizzazione è uno strumento che consente di privilegiare, all'interno della medesima clusterizzazione, la forma assunta dai profili indipendentemente dai valori assoluti. Si possono quindi creare dei cluster all'interno dei quali vi sono profili che, pur avendo nella realtà valori di potenza molto diversi, manifestano comunque lo stesso trend su base giornaliera. Non è un approccio così inusuale in quanto è impiegato in molte pubblicazioni [19,20]. In particolare, quest'ultima mette anche in evidenza che il criterio di normalizzazione non è univoco, bensì vi sono vari approcci: *min-max normalization*, *z-score normalization*. Tuttavia, considerando che l'obiettivo è ottenere dati che appartengono ad un intervallo unitario a meno del segno, si preferisce mantenere la normalizzazione per l'elemento di modulo massimo, che è sicuramente più intuitiva e più semplice da usare. Si lascia come possibile sviluppo futuro la possibile integrazione con diversi criteri di normalizzazione al fine di valutare i cambiamenti del profilo risultante.

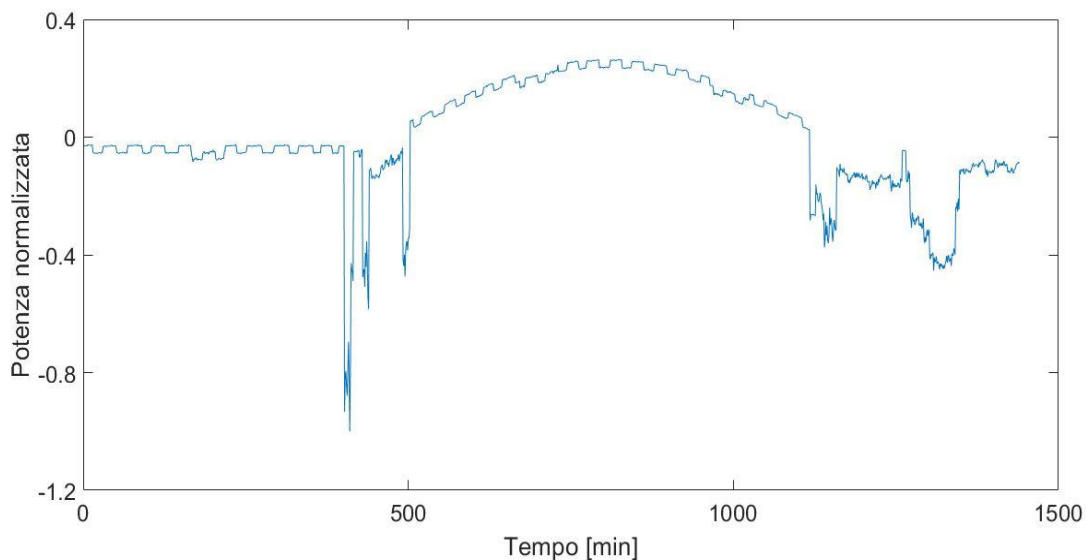


Figura 5.8 Profilo di batteria normalizzato per la famiglia n.1 (energy intensive) il 4 luglio 2016

## 5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard: metodologia proposta

### 5.6.2 Profili non normalizzati

La scelta di normalizzare i profili non è però l'unica. Vi è comunque la possibilità di mandare in input alla clusterizzazione anche i profili in potenza tali e quali, senza alcuna elaborazione. In tal caso vi è ovviamente il rischio che alcune dimensioni abbiano un peso trascurabile durante il calcolo delle distanze, tuttavia l'algoritmo può ora creare dei cluster tenendo in considerazione sia la forma del profilo, sia la sua ampiezza in termini di valori fisici di potenza [43].

### 5.6.3 Profili espressi in termini di risultato dalla FFT

Un approccio completamente diverso dai due appena presentati si basa sull'utilizzo della trasformata di Fourier. In pratica non si utilizza più il profilo definito nel dominio del tempo con 1440 valori di potenza per un giorno, ma si utilizzano 1440 nuovi punti che lo descrivono nel dominio delle frequenze: questi sono modulo e fase delle 720 armoniche individuate per mezzo della funzione Matlab *fft* e aventi rispettivamente un periodo variabile tra i due minuti (massima frequenza campionabile in considerazione del passo di discretizzazione temporale) e le ventiquattro ore. Tale numero di armoniche consegue però dall'aver scartato l'armonica zero: il suo valore è nullo dal momento che, in considerazione delle ipotesi iniziali, al termine di ogni giorno la batteria ritorna al suo stato di carica originale.

Prima di esprimere ulteriori considerazioni su questo criterio, è bene capire come si presenta un profilo espresso nel dominio delle frequenze. Con riferimento alla Fig. 5.9 è possibile osservare il medesimo profilo di batteria che si sta tenendo come esempio in questo capitolo, espresso ora nel dominio discreto delle frequenze e caratterizzato quindi dai moduli delle varie armoniche. Ciascuna armonica individuata dalla FFT è identificata in ascissa dal periodo corrispondente alla propria frequenza, in modo da dare un riscontro pratico sugli ordini di grandezza coinvolti.

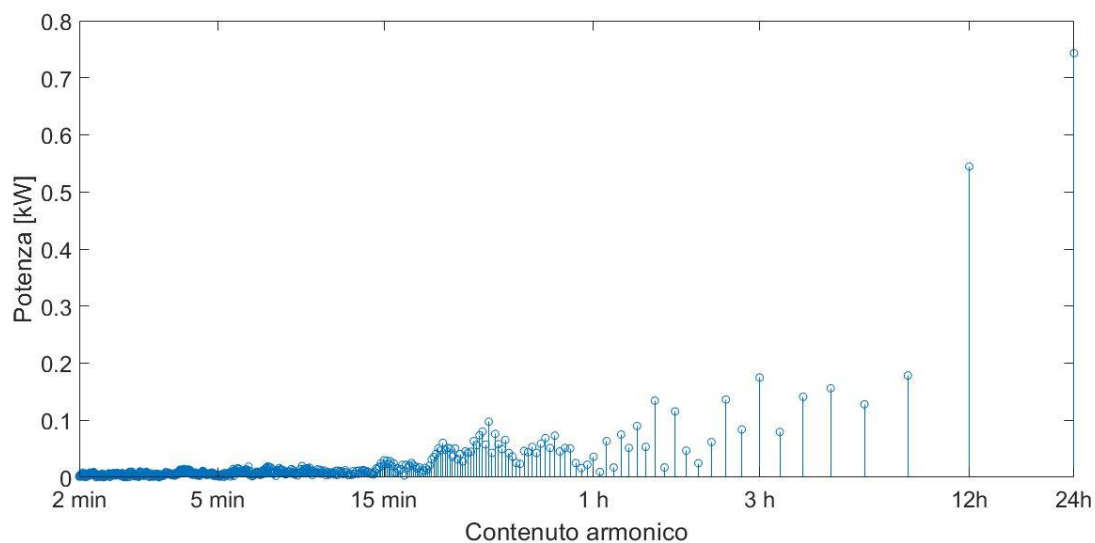


Figura 5.9 Profilo di batteria per la famiglia n.1 (energy intensive) il 4 luglio 2016 espresso nel dominio delle frequenze

5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
metodologia proposta

A differenza dei criteri prima considerati, la clusterizzazione sui risultati ottenuti tramite analisi con FFT non deve prevedere alcuna normalizzazione: se il numero complesso che descrive una data armonica è piccolo (in parte reale e immaginaria), significa che il suo contributo al profilo di potenza è trascurabile, dunque è corretto che abbia poca rilevanza nel calcolo delle distanze euclidee. Pertanto, si sceglie di utilizzare come variabili di input dell'algoritmo proprio i vettori ottenuti ponendo in successione parte reale e immaginaria delle armoniche risultanti dalla trasformata per ciascun profilo.

Rimane comunque il fatto che il risultato della FFT implicitamente sia influenzato dai valori assoluti dei profili di batteria. Pertanto, non volendo scartare a priori alcun criterio che potrebbe condurre a risultati interessanti, si sceglie sì di clusterizzare secondo i risultati della FFT ma secondo due criteri diversi: una volta si utilizzano i risultati della trasformata fatta sui profili tali e quali, e una volta quelli derivanti dai profili normalizzati per il rispettivo valore di potenza massima in modulo.

La FFT, benché nella presente analisi sia utilizzata in qualità di step preliminare alla clusterizzazione, in generale è anche un potente metodo di studio a sé stante in quanto, scomponendo un segnale nelle diverse armoniche che lo costituiscono, si riesce spesso a discriminare quali sono le poche armoniche rilevanti e cosa invece è assimilabile a rumore. Il risultato è una notevole semplificazione del profilo in analisi, che risulterebbe quindi la somma di un numero ristretto di armoniche.

A tal proposito è bene precisare che nel caso in analisi l'utilizzo convenzionale della FFT non avrebbe condotto a risultati significativi. Dal punto di vista dei moduli delle armoniche, nel momento in cui si considerano i profili di più giorni, si ottiene un profilo medio che è progressivamente sempre più livellato rispetto a quella presentato in Fig. 5.9. Fatta eccezione per le armoniche a frequenza più bassa, perdono man mano importanza quelle che a fatica potevano essere considerate armoniche caratteristiche di un singolo profilo. Utilizzando tale approccio si incorrerebbe quindi in un'eccessiva semplificazione del profilo, che rimarrebbe determinato da un numero troppo esiguo di armoniche, perdendo di conseguenza la quasi totalità delle informazioni in esso inizialmente contenute.

Anche dal punto di vista delle fasi è stata condotta una rapida analisi al fine di valutare se una stessa armonica, in giorni diversi, si presentasse con una fase perlomeno confrontabile. Ciò avrebbe garantito il legame tra quella specifica armonica e un avvenimento reale tipico di un determinato momento della giornata (ad esempio l'accensione di un elettrodomestico). Anche in questo caso però l'analisi ha dato esito negativo in quanto le molteplici armoniche si presentano nella quasi totalità dei casi con una fase molto dispersa.

Non è dunque possibile trarre alcuna conclusione rilevante dall'utilizzo della FFT come strumento a sé stante. Bisogna allora esprimere i suoi risultati come parte reale e parte immaginaria dei numeri complessi associati alle diverse armoniche, per utilizzarli come variabili di input per una cluster analysis.



#### 5.6.4 Legame tra centroidi e profili caratteristici

Definiti i criteri adottati e le motivazioni che vi stanno alla base, l'ultimo aspetto da evidenziare per avere un quadro completo su tutte le decisioni prese riguarda l'identificazione dei profili assimilabili ai centroidi. L'algoritmo *k-means* individua dei centroidi per ciascun cluster ma, come già precisato, tale centroide non è un profilo del dataset bensì la media di tutti i profili appartenenti a quel cluster. Di conseguenza si tratterebbe di un profilo estremamente livellato e regolare, caratteristica ben lontana da un profilo reale e dunque dagli obiettivi di questa analisi. Pertanto, al fine di mantenere sempre uno stretto legame con la realtà pratica, noto un centroide restituito in output dall'algoritmo e in accordo con il *modus operandi* di quest'ultimo, si cerca tra tutti i profili appartenenti a quel cluster quello che ha la minima distanza euclidea dal centroide stesso. Questo profilo sarà considerato come vero centroide nel proseguimento della trattazione. La distanza euclidea qui calcolata deve considerare tutte le dimensioni dello spazio in cui è definito il profilo. Nel caso dei criteri che coinvolgono l'utilizzo della FFT, si è reso necessario però limitare il calcolo della distanza a un numero ristretto di dimensioni, e dunque di armoniche: le componenti ad alta frequenza, elevatissime in numero ma povere in contenuto informativo, avrebbero altrimenti compromesso il risultato, prevalendo su quelle più rilevanti in termini di contenuto informativo. In termini pratici, per capire quante armoniche considerare, si sono considerati i quattro centroidi individuati dall'algoritmo esprimendo ciascuna loro armonica come numero complesso. Per ogni armonica  $i$ , si è poi calcolata la distanza media dei quattro numeri complessi dall'origine in accordo con la formula (5.2). Infine, si è scelto di considerare le sole armoniche per le quali tale distanza fosse almeno superiore a  $\varepsilon$ , con  $\varepsilon$  definito in accordo con la formula (5.3).

$$Distanza\ media\ armonica\ i = \frac{1}{n\ cluster} \cdot \sum_{k=1}^{n\ cluster} distanza(i_k, 0) \quad (5.2)$$

$$\varepsilon = 0,02 \cdot Distanza\ media\ armonica\ 1 \quad (5.3)$$

Per concludere, tutte le scelte e le ipotesi sono state definite, dunque si è ora nelle condizioni di dare spazio all'algoritmo di clusterizzazione sui profili opportunamente elaborati.

#### 5.7 Validazione dei risultati

L'utilizzo dell'algoritmo *k-meas* ha consentito di clusterizzare tutti i profili di batteria sulla base della propria logica di funzionamento, che si ricorda coinvolgere il calcolo di distanze euclidee. Da un punto di vista concettuale non vi è quindi alcun dubbio circa la correttezza del risultato a cui si è pervenuti.

A questo punto però è bene mettere in discussione il legame tra il risultato delle clusterizzazioni e gli obiettivi prefissati: non è detto a priori che a ciascun cluster corrisponda una specifica tipologia di utenti, i cui profili di carico hanno un impatto molto

5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
metodologia proposta

simile sulle prestazioni della batteria. Si ricorda infatti che la necessità di individuare dei profili standard rappresentativi delle varie tipologie di utenti, si basa anche sul voler prevedere l'impatto che un certo profilo può avere sul rendimento della batteria.

Ciò che occorre effettuare è dunque un adeguato processo di validazione dei risultati ottenuti, al fine di dimostrare l'esistenza di un qualche legame tra questi ultimi e il corrispondente rendimento dei profili. Tale processo di validazione prevede l'impiego del modello elettrico di batteria sodio-cloruro di nichel con due rami RC descritto nella sezione 3.3, al fine di simulare il rendimento elettrochimico che la batteria (quella specifica per cui il modello è stato sviluppato) manifesterebbe con ciascuno dei profili giornalieri costituenti il dataset iniziale. È sufficiente poi confrontare tali valori con i risultati della clusterizzazione per capire se i profili di un dato cluster siano caratterizzati da rendimenti di batteria simili tra loro, e soprattutto da rendimenti che siano sufficientemente diversi rispetto a quelli degli altri cluster.

Questo confronto deve essere chiaramente ripetuto per i diversi criteri di clusterizzazione utilizzati, al fine di comprendere quale tra questi conduca effettivamente ad un risultato di utilità pratica. Per confrontare i diversi criteri e contestualmente verificare che la scelta del numero di cluster sia effettivamente quella ottimale si ricorrerà alla definizione di un opportuno indice KPI (Key Performance Index).

5.7.1 L'uso del modello a due rami RC per la validazione dei risultati

La necessità di validare i risultati delle diverse clusterizzazioni impone un raffronto con i rendimenti di una batteria che effettivamente andrebbe a lavorare con tali profili. È chiaramente impossibile testare in laboratorio un numero così elevato di profili, dunque si ricorre ad un modello per la loro simulazione e il conseguente calcolo dei rendimenti. Il modello scelto per questo scopo è quello presentato nella sezione 3.3, dal momento che tra i due proposti è sicuramente il più semplice da implementare in considerazione della disponibilità di dati sul valore degli elementi circuitali.

È bene precisare sin da ora che tale modello non ha validità generale, ma simula il comportamento della sola batteria da 23,5 kWh – 620 V su cui è stato sviluppato. Di conseguenza anche il rendimento risultante non avrà certo una validità generale per tutta la tecnologia sodio-cloruro di nichel, sarà piuttosto indice del comportamento di quello specifico modello. Ciò non rappresenta un problema al proseguo della trattazione in quanto non si vuole giungere a delle conclusioni sul valore di rendimento in sé, quanto piuttosto mostrare come profili appartenenti a cluster diversi manifestano rendimenti differenti nel momento in cui hanno luogo su una batteria reale.

Un'altra considerazione che è opportuno mettere in evidenza è che il modello è stato sviluppato per una batteria presa singolarmente. Il rendimento che sarà calcolato a partire dalle simulazioni sarà allora un rendimento puramente elettrochimico, associato cioè ai meccanismi fisici di funzionamento della batteria stessa. Non vi è un sistema di accumulo che integra la batteria insieme ad altri componenti. Dunque, ci si aspetta che l'efficienza risultante sia un valore piuttosto alto, o comunque ben lontano da quelle che possono essere le prestazioni di un sistema di accumulo reale.

## 5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard: metodologia proposta

A questo punto si entra nel merito dell'**implementazione e dell'utilizzo del modello** in ambiente Matlab. Da questo punto di vista sono due le considerazioni preliminari.

In primo luogo, avendo un numero elevato di profili da simulare, si è scelto di applicare una semplificazione alla procedura proposta in modo da ridurre l'onere computazionale. A partire dalla constatazione che i profili in analisi sono caratterizzati da un passo di discretizzazione temporale di un minuto, si ipotizza che in tale intervallo di tempo i transienti associati alla presenza di elementi capacitivi nel circuito siano trascurabili. Le capacità in stato stazionario si comportano come circuiti aperti, dunque il modello elettrico si semplifica in un circuito con un generatore ideale di tensione collegato in serie a tre resistenze. Per alcuni profili a campione si è scelto di eseguire sia il modello originale, sia quello derivante dalla semplificazione qui proposta: l'errore commesso con l'approccio semplificato si è mantenuto sempre al di sotto dello 0,3%, dunque non vi è alcuna controindicazione nel ricorrere a tale procedura.

In secondo luogo, si è osservato che il valore di stato di carica iniziale influenza il rendimento complessivo. In considerazione dell'andamento dei diversi profili e del campo di validità del modello in termini di stato di carica, si è scelto 60% come SoC iniziale. Il modello infatti ha un'affidabilità garantita a partire da SoC 30% e fino al 90%. Tuttavia, avendo la necessità di simulare profili appartenenti a famiglie diverse e dunque con un fabbisogno energetico differente, si è scelto di accettare anche valori di SoC esterni a questo intervallo. Per fare ciò si è dovuta ammettere una minore precisione del modello stesso, e mantenere costante il valore degli elementi circuitali per stati di carica esterni al loro dominio di definizione. Ad ogni modo però sono stati mantenuti i limiti fisici dello 0% e del 100%, escludendo dall'analisi i profili non compatibili con tale vincolo.

Sulla base di queste considerazioni, il modello così implementato ha consentito di ricostruire il profilo giornaliero di tensione e corrente di batteria oltre che l'andamento del suo stato di carica. Si propone in Fig. 5.10 il risultato restituito in output dal modello per il solito profilo che si sta considerando a titolo di esempio.

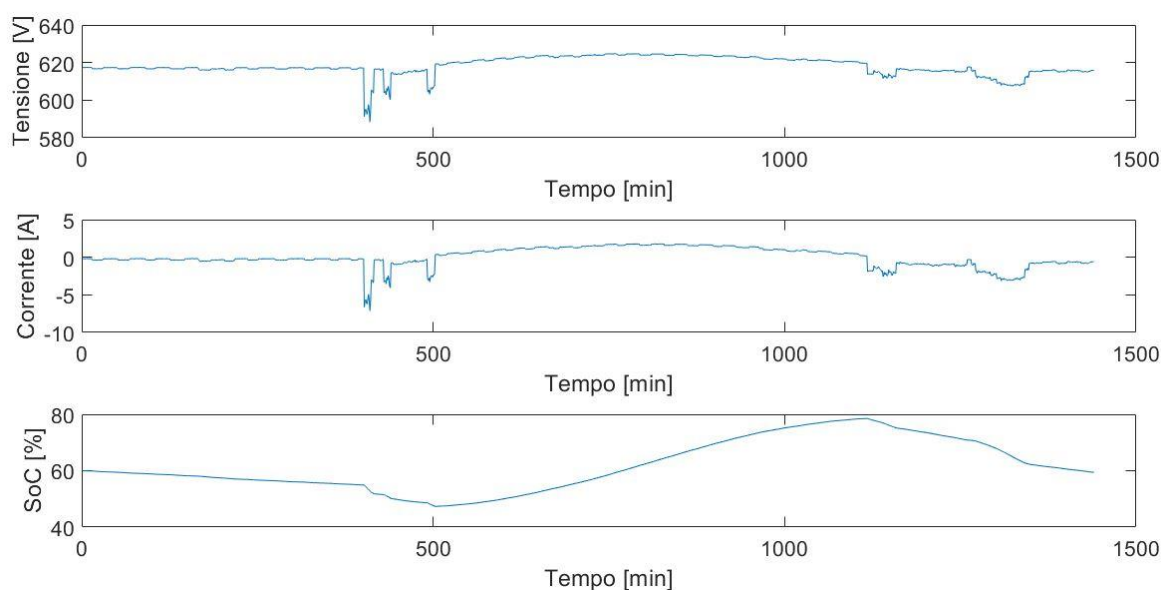


Figura 5.10 Tensione, corrente e stato di carica simulati dal modello per la famiglia n.1 (energy intensive) il 4 luglio 2016

5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
metodologia proposta

A partire da queste informazioni è stato calcolato per ogni profilo il corrispondente rendimento di batteria. Benché i profili ideali siano stati costruiti per avere lo stesso stato di carica all'istante iniziale e a quello finale, su una batteria reale vi sono delle perdite, modellizzate per mezzo di elementi resistivi. Il risultato è che lo stato di carica della batteria al termine del profilo risulterà minore di quello di partenza.

In prima approssimazione, per poter valutare l'efficienza sul singolo profilo senza dover definire opportune procedure per riportare lo stato di carica al valore iniziale, è stata utilizzata la formula (5.4) per il calcolo del **rendimento approssimato**.

$$\eta = \frac{|Energia_{erogata}| + \Delta SoC \cdot C_{nom}}{|Energia_{assorbita}|} \quad (5.4)$$

Si tratta di una formula approssimata in quanto include la variazione dello stato di carica del sistema senza tenere traccia dell'origine del contenuto energetico preesistente. Un rendimento rigoroso dovrebbe invece essere calcolato su un ciclo, ossia tra due istanti in cui la batteria presenta il medesimo stato di carica. A tal proposito è stato calcolato a posteriori un **rendimento rigoroso** per cento profili scelti in modo random. Tale rendimento è calcolato anticipando di poco l'istante finale al momento in cui il SoC ha lo stesso valore iniziale. Questo nuovo rendimento è stato calcolato in accordo con la formula (5.5).

$$\eta = \frac{|Energia_{erogata}|}{|Energia_{assorbita}|} \quad \text{con } \Delta SoC = 0 \quad (5.5)$$

Per i profili selezionati, l'errore introdotto dalla definizione approssimata è sempre stato inferiore allo 0,5%, dunque l'approssimazione è accettabile.

### 5.7.2 La definizione del Key Performance Index (KPI)

Noti i risultati delle clusterizzazioni e simulati i rendimenti, è ora il momento di mettere a confronto i diversi criteri considerati nell'analisi al fine di valutare quali di questi conducono a una suddivisione dei profili coerente con il rispettivo rendimento di batteria. Al tempo stesso è anche necessario mettere in discussione il numero di cluster richiesti in input al *k - means*, in modo da stabilire la correttezza dell'ipotesi iniziale, piuttosto che rimettere in discussione il problema con un nuovo numero di cluster da ricercare.

Prima di tutto è bene esprimere una considerazione in merito alla valutazione del numero di cluster ottimale. Come anticipato nei paragrafi precedenti, in letteratura vi sono diversi criteri e indici che aiutano in tale scelta. A titolo di esempio si considera l'approccio seguito dallo studio [43] e basato sul calcolo dell'indice WSS (Within-cluster Sum of Squares) secondo la formula (5.6), in cui  $N_c$  è il numero di cluster,  $N_p$  il numero di profili e  $d$  la distanza tra l'elemento  $i$  e il centroide  $c_k$  del cluster di appartenenza.

$$WSS = \sum_{K=1}^{N_c} \sum_{i=1}^{N_p \in K} d^2(i, c_k) \quad (5.6)$$

## 5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard: metodologia proposta

Con questo metodo si valuta, al crescere del numero di cluster, come cambia la somma delle distanze al quadrato dei singoli profili rispetto al centroide del cluster di appartenenza. La curva manifesterà chiaramente un andamento decrescente tendendo a zero nel caso limite in cui il numero di cluster ricercati sia proprio pari al numero di elementi costituenti il dataset. La scelta ottimale prevede di utilizzare quel numero di cluster  $k$  tale per cui la funzione presenta un'importante discontinuità nella derivata prima, cioè quando il trend di diminuzione della funzione diviene meno marcato.

Il criterio appena presentato potrebbe essere applicato anche alla presente trattazione, ma non sarebbe adeguato in relazione agli obiettivi prefissati. Quello che si vuole ottenere è una clusterizzazione tale per cui i profili appartenenti ad uno stesso cluster abbiano rendimenti simili tra loro ma diversi rispetto a quelli caratteristici di altri cluster. L'algoritmo nella sua esecuzione non ha alcuna informazione in merito al rendimento dei profili su cui sta lavorando, bensì clusterizza in base alle distanze euclidee. Utilizzare il criterio prima citato sarebbe allora rigoroso dal punto di vista dell'esecuzione dell'algoritmo fine a sé stessa, ma non darebbe alcuna garanzia in merito alla qualità del risultato che si desidera ottenere.

Per mantenere una certa attinenza rispetto agli obiettivi prefissati, si preferisce piuttosto gestire la ricerca del numero di cluster ottimo contestualmente alla valutazione dei diversi criteri di clusterizzazione.

Per fare ciò quindi è indispensabile introdurre un nuovo indicatore che valuti quanto un certo criterio di clusterizzazione, con un dato numero di cluster, riesca effettivamente a creare una suddivisione dei profili di batteria che sia coerente con il loro rendimento. Tale indicatore, denominato KPI (Key Performance Index), deve chiaramente valutare lo scostamento tra i profili di un cluster e il rispettivo centroide non tanto in termini di distanza euclidea, bensì in termini del corrispondente rendimento di batteria. Tra tutti i criteri utilizzati e tra i diversi numeri di cluster, il valore minimo di tale indice dovrebbe indicare quella scelta che conduce ad un risultato significativo. La definizione di tale indice è presentata nella formula (5.7) e deve essere applicata per ogni criterio e per ciascuna scelta del numero di cluster.

$$KPI = \sum_{K=1}^{n \text{ cluster}} \sum_{i=1}^{n \text{ profili} \in K} (\eta_i - \eta_{centroide})^2 \quad (5.7)$$

### 5.8 Analisi di sensitività

L'ultimo step antecedente alla conclusione dell'analisi sui profili di batteria prevede alcune considerazioni in merito alla robustezza del risultato ottenuto, da esprimere per mezzo di un'analisi di sensitività. L'obiettivo è appunto quello di capire se e come cambia il risultato della clusterizzazione, limitatamente al criterio ottimale, in funzione di alcuni cambiamenti al dataset contenente i profili.

5. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
metodologia proposta

Sulla base di questa analisi, il risultato finale sarà considerato robusto nel momento in cui, a fronte di alcune modifiche al dataset, non si osservano sostanziali cambiamenti nel risultato stesso; in altri termini la distribuzione dei profili all'interno dei cluster deve mantenersi circa costante. Se così non fosse, a fronte di una modifica anche di minima entità, il risultato potrebbe subire importanti modifiche, e di conseguenza le conclusioni che si potrebbero trarre non sarebbero di validità generale. È auspicabile allora che il risultato individuato non subisca alcuna modifica, in modo che, in virtù dell'elevato numero di famiglie considerate, possa essere utilizzato in futuro per stimare il rendimento di batteria a partire dai profili caratteristici di una specifica utenza.

Al fine di svolgere correttamente un'analisi di sensitività senza dover considerare nuovi profili, la procedura più semplice prevedrebbe di selezionare in modo random dal dataset un certo numero di profili e provare ad eseguire nuovamente la clusterizzazione secondo il criterio ottimale. Al tempo stesso però bisogna considerare che nel dataset i profili sono ordinati in base alla famiglia di appartenenza, dunque estrarre dati in modo random rischierebbe di eliminare alcune di queste, con inevitabili ripercussioni sul risultato finale. Per evitare tale problematica, una possibile soluzione è suddividere l'intero dataset in due gruppi: il primo conterrà i profili di indice pari e il secondo quelli di indice dispari. In questo modo entrambe le partizioni manterrebbero comunque una buona parte del contenuto informativo iniziale.

Non è opportuno invece coinvolgere nell'analisi di sensitività il KPI dal momento che, in accordo con la sua definizione, il valore numerico è funzione del numero di profili considerati, dunque non consente un confronto tra dataset di diverse dimensioni.

Tutta la metodologia utilizzata nell'analisi dei profili di batteria è stata descritta dettagliatamente a partire dalla costruzione del dataset e fino alla validazione dei risultati ottenuti con l'algoritmo di clusterizzazione. A questo punto è possibile applicare la procedura delineata e dare così spazio ai risultati ottenuti.

## 6 ANALISI DI PROFILI DI BATTERIA PER LA DETERMINAZIONE DI PROFILI STANDARD: APPLICAZIONE DELLA METODOLOGIA PROPOSTA

In questa seconda parte dell'analisi si applica ai profili di batteria oggetto di studio la procedura appena costruita. Si abbandona quindi la descrizione prettamente teorica seguita finora, per concentrarsi sulla presentazione e sull'analisi critica dei risultati ottenuti.

Prima di entrare nel merito dei risultati, è bene ripercorrere in sintesi i principali step. Una volta costruito il dataset con i profili di batteria a partire dai profili di carico e da opportune ipotesi circa la produzione dell'impianto fotovoltaico, si è dimostrata la necessità di algoritmi di clusterizzazione strutturati per creare opportuni raggruppamenti tra questi profili. Si è scelto quindi di utilizzare l'algoritmo *k-menas*, il cui principio di funzionamento è sicuramente il più intuitivo tra tutti gli algoritmi di clusterizzazione, e si è deciso di individuare inizialmente quattro cluster diversi, posticipando una scelta definitiva a riguardo in sede di validazione del risultato ottenuto. In quest'occasione sarà inoltre possibile individuare tra tutti i criteri proposti quello che conduce al miglior risultato in accordo con gli obiettivi iniziali. Si vuole infatti condurre una cluster analysis in modo che all'interno del medesimo cluster i profili di batteria manifestino un valore di rendimento caratteristico molto simile, e comunque sufficientemente diverso da quello tipico di altri cluster.

### 6.1 Analisi preliminare

Lo step preliminare all'esecuzione dell'algoritmo di clusterizzazione scelto prevede di provare a classificare i 44.115 profili di batteria di cui si dispone sulla base di indicatori di immediato riscontro pratico, quali sono ad esempio i componenti del nucleo familiare e la tipologia di giorno (feriale, sabato, festivo).

In Fig. 6.1 è mostrata la classificazione in base al numero di componenti del nucleo familiare. In questo caso si osserva che, come era facile prevedere, il numero di componenti influisce sui valori di potenza ed energia caratterizzanti i profili giornalieri: più persone vivono in un'abitazione, maggiore sarà il fabbisogno energetico e le richieste in potenza. Al tempo stesso però non vi sono distinzioni nette, e di conseguenza le diverse aree colorate tendono a sovrapporsi le une con le altre, rendendo quindi impossibile utilizzare il numero di componenti come criterio identificativo dei profili di batteria.

In Fig. 6.2 si ha la classificazione per i giorni feriali, i sabati e i giorni festivi. Se prima il numero di persone incideva sui valori di potenza ed energia, non si riesce ad individuare ora alcun trend caratteristico. Anche in questo caso tutti i punti rappresentativi dei diversi profili occupano la medesima area del grafico: nemmeno il tipo di giorno può essere un discriminante per la classificazione dei profili.



6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

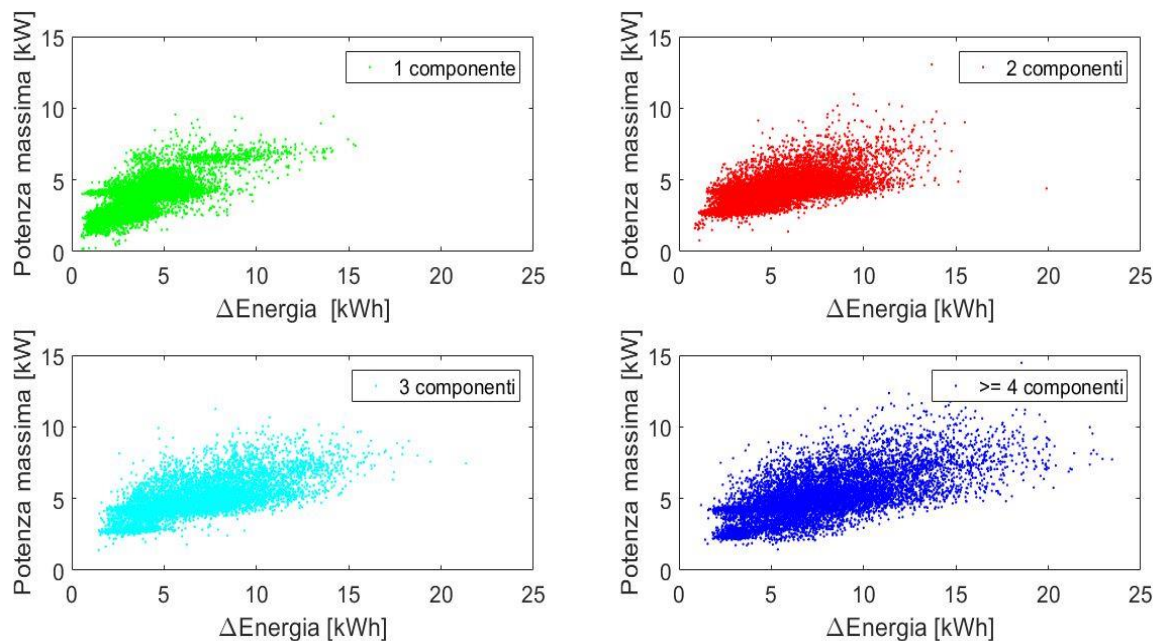


Figura 6.1 Classificazione in potenza massima e variazione di energia secondo il numero di componenti delle famiglie

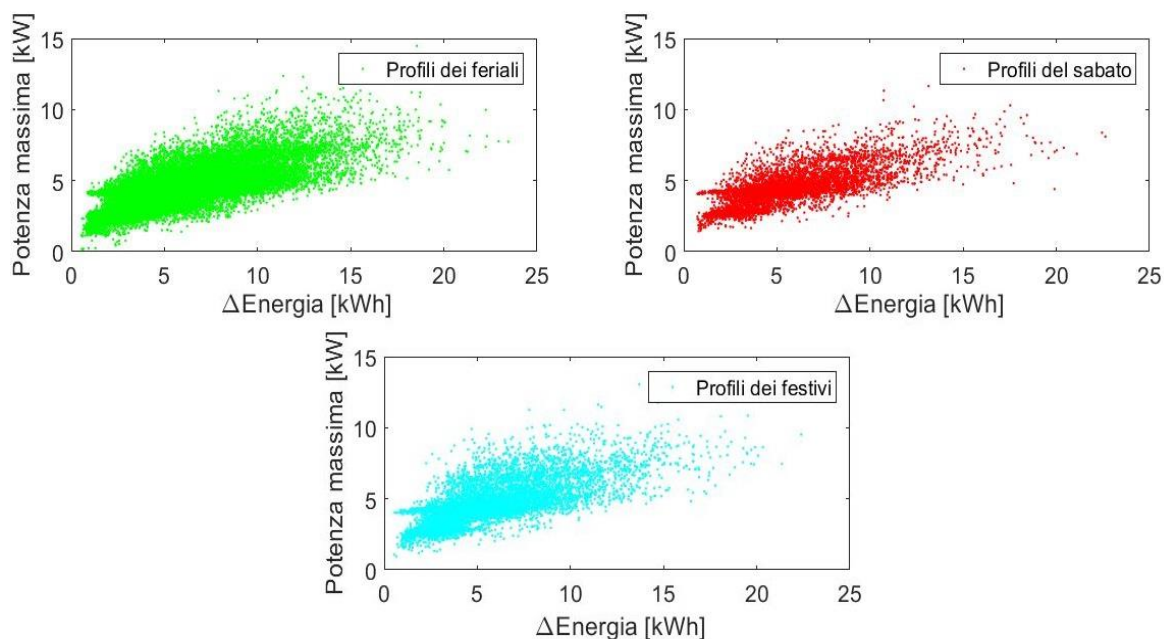


Figura 6.2 Classificazione in potenza massima e variazione di energia secondo la tipologia di giorno

A conclusione di questa preliminare analisi descrittiva, si può notare come tra le grandezze elettriche potenza massima e  $\Delta$ Energia e i principali criteri con immediato riscontro pratico, quali sono il numero di componenti e la tipologia di giorno, non esista una chiara correlazione. Si esclude quindi la possibilità di utilizzare questi criteri pratici per suddividere i profili. L'obiettivo quindi sarà ricercare attraverso tecniche di machine learning altre caratteristiche dei profili alle quali corrispondono clusterizzazioni più nette.



## 6.2 Prime clusterizzazioni basate su parametri caratteristici

Assodata la necessità di ricorrere ad algoritmi di clusterizzazione strutturati, avendo scelto il *k-means* e volendo ricercare quattro cluster, si fa nuovamente riferimento ai profili caratterizzati in termini di potenza massima giornaliera e  $\Delta$ Energia su base giornaliera. In questo caso quindi si tratta di una clusterizzazione di profili rappresentati in **due dimensioni**. Poiché l'obiettivo di questo paragrafo è una presentazione grafica qualitativa dei risultati per dare riscontro pratico su cosa l'algoritmo restituisca in output, si lancia più volte la funzione per vedere come evolve il risultato al variare del numero di cluster richiesti in input. Per ottenere i risultati mostrati in Fig. 6.3, si ricorda che è necessario normalizzare entrambi i vettori ( $P_{max}$  e  $\Delta$ Energia) contenenti le informazioni dei profili per il rispettivo valore massimo: in questo modo si evita che, fra le due grandezze, quella con il valore numerico più piccolo in modulo rivesta un'importanza minore durante il calcolo delle distanze euclidee, largamente impiegate nell'algoritmo.

È anche interessante valutare la capacità dell'algoritmo a gestire dati espressi in funzione di tre grandezze caratteristiche, ossia profili descritti in uno spazio a **tre dimensioni**. Per fare ciò è prima indispensabile definire una terza variabile caratteristica. La scelta chiaramente non è univoca; considerando che lo scopo è sempre la presentazione qualitativa dei risultati, si sceglie il rapporto tra il tempo che la batteria passa in fase di carica e quello in fase di scarica. Si può ora ripetere la procedura utilizzata per il caso a due dimensioni, includendo anche la nuova variabile, ottenendo così i grafici presentati in Fig. 6.4.

Sia in Fig. 6.3 che in Fig. 6.4 si vede chiaramente come l'algoritmo tende a collocare all'interno dello stesso cluster quei profili identificati da punti vicini tra loro nel rispettivo piano o spazio di definizione: questo è proprio il modus operandi di un algoritmo che basa il suo funzionamento sul calcolo di distanze euclidee.

Alla fine di questi primi esempi di clusterizzazione, dovrebbe essere chiaro come lavora un algoritmo e come si presenta il risultato restituito in output. Il passo successivo richiede dapprima di clusterizzare i profili descritti in uno spazio a poche dimensioni cercando però quattro cluster. Successivamente è necessario abbandonare la descrizione con un numero ristretto di variabili per tornare a considerare il profilo nella sua evoluzione temporale. Tre dimensioni potrebbero non essere sufficienti per una caratterizzazione completa dei profili, bisogna quindi considerare tutti i 1440 punti (un valore al minuto) che compongono un profilo giornaliero. Inoltre, bisogna fare questo servendosi dei criteri già descritti, in modo da elaborare il profilo prima di passarlo in input all'algoritmo.

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
 applicazione della metodologia proposta

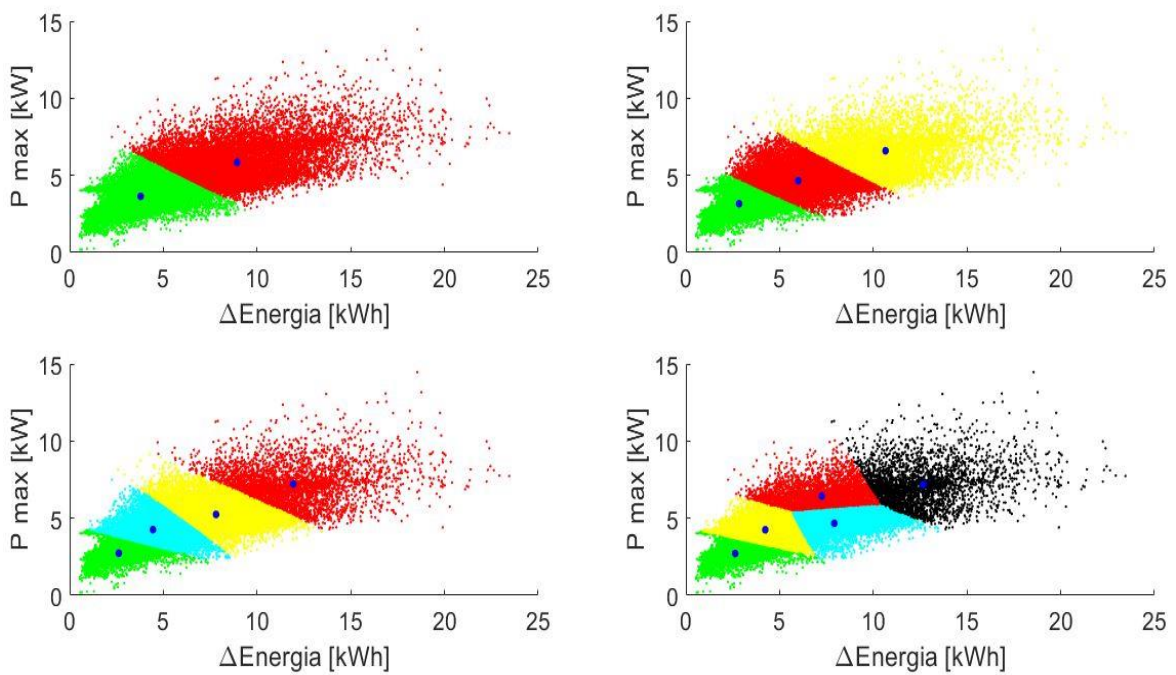


Figura 6.3 Clusterizzazione di profili di batteria in 2D al variare del numero di cluster richiesto. In blu i centroidi

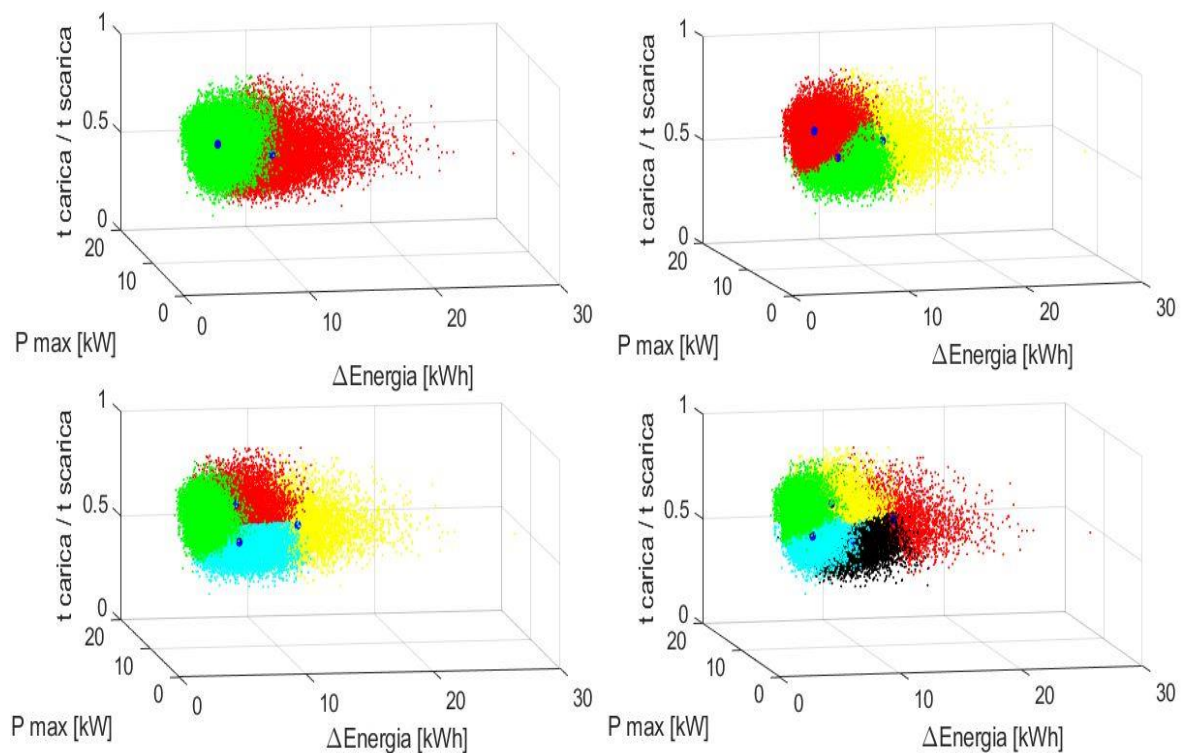


Figura 6.4 Clusterizzazione di profili di batteria in 3D al variare del numero di cluster richiesto. In blu i centroidi

### 6.3 Risultati

Si presentano ora i risultati delle clusterizzazioni effettuate secondo i criteri precedentemente descritti e qui richiamati:

- Clusterizzazione 2D: profili descritti in termini di potenza massima in modulo e  $\Delta$ Energia
- Clusterizzazione 3D: ai precedenti due parametri si aggiunge il rapporto tra il tempo in carica e quello in scarica che caratterizza la batteria
- Clusterizzazione di profili normalizzati ciascuno per la massima potenza in modulo
- Clusterizzazione di profili non normalizzati
- Clusterizzazione dei risultati derivati dalla FFT di profili normalizzati e non normalizzati

Nei primi due casi il problema è definito in uno spazio di dimensione limitata. Negli altri invece coinvolge uno spazio a 1440 dimensioni, dunque non sarà più possibile visualizzare la distribuzione di punti rappresentativa dei diversi cluster. Pertanto, si deve preferire una rappresentazione nel piano potenza – tempo, in cui, a prescindere dal criterio utilizzato, sarà sempre possibile osservare l'evoluzione dei profili risultati essere i centroidi, rispetto a tutti gli altri che l'algoritmo ha inserito nello stesso cluster. In particolare, la rappresentazione nel piano potenza – tempo seguirà una scala cromatica relativa, in cui il colore corrispondente all'unità è assegnato al valore di potenza che all'interno di quel cluster si presenta con frequenza maggiore. A prescindere dal criterio utilizzato, il risultato sarà sempre presentato in termini di valori fisici di potenza.

Si tralasciano per ragioni di sintesi i risultati delle clusterizzazioni 1D e di quella in 3D con il numero di cambi di segno della corrente. Saranno comunque considerate in sede di validazione del risultato ottenuto.

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

6.3.1 Clusterizzazione 2D

Nella presentazione dei risultati si sceglie di partire dal criterio bidimensionale, ossia quello che prevede appunto la descrizione dei profili giornalieri in termini di massima potenza in modulo e massima variazione del contenuto energetico della batteria ( $\Delta$ Energia). Tale caso, insieme a quello tridimensionale che sarà esposto nel paragrafo seguente, consente di osservare il risultato della clusterizzazione direttamente nello spazio di definizione del problema, permettendo quindi un riscontro a livello visivo di come sono stati raggruppati i diversi profili. A tal proposito, in Fig. 6.5 si utilizza una rappresentazione nel piano di definizione del problema, mentre in Fig. 6.6-9 si utilizza il piano potenza-tempo, che sarà poi quello utilizzabile per tutti i criteri, dedicando un grafico ad ogni cluster. Con riferimento a quest'ultima rappresentazione, i tratti distintivi dei diversi cluster sembrano essere da un lato il differente range di potenze occupato dai profili, e dall'altro l'andamento tipico di quelli risultati essere i centroidi: si va dal cluster 1 con uno stretto range di potenze impegnate e un centroide piuttosto regolare, fino al cluster 4 avente profili molto irregolari e che impegnano potenze importanti.

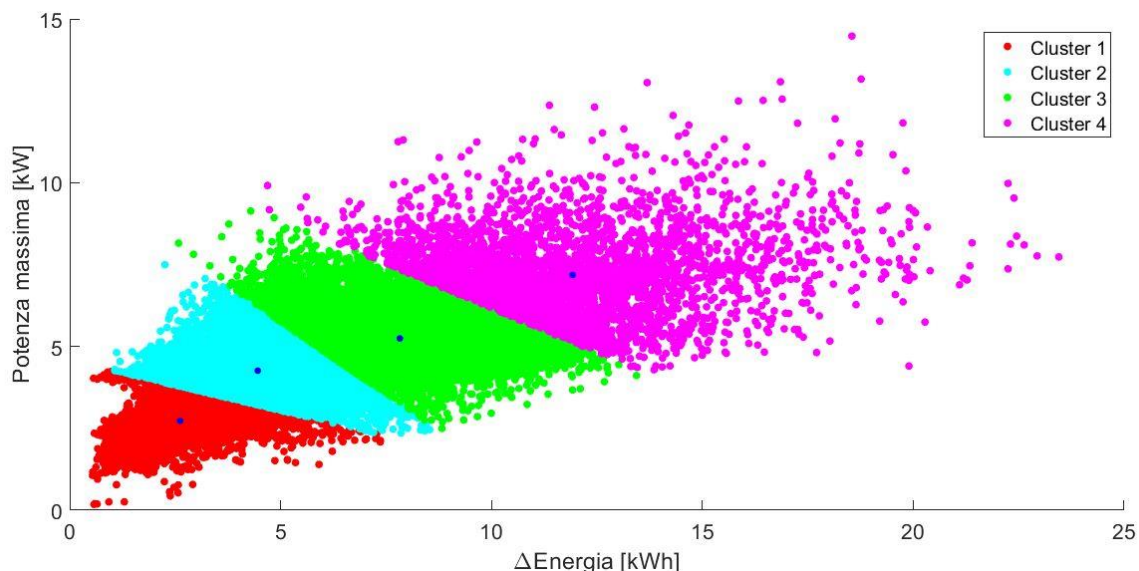


Figura 6.5 Clusterizzazione 2D - potenza massima in modulo e variazione di contenuto energetico della batteria.  
Rappresentazione nel piano di definizione

	N° profili
<i>Cluster 1</i>	12.048
<i>Cluster 2</i>	17.392
<i>Cluster 3</i>	10.922
<i>Cluster 4</i>	3.750

Tabella 6.1 Caratteristiche dei cluster risultati dalla clusterizzazione in Pmax e  $\Delta$ Energia

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

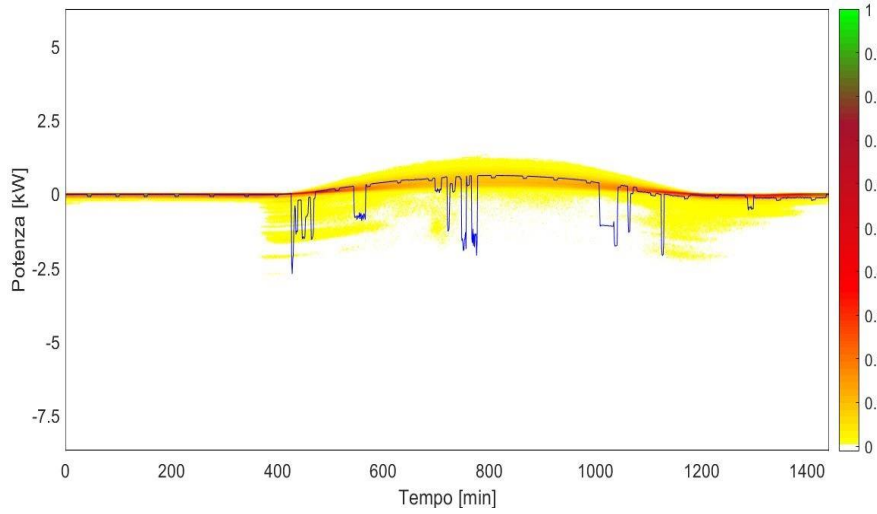


Figura 6.6 Clusterizzazione 2D – Cluster 1

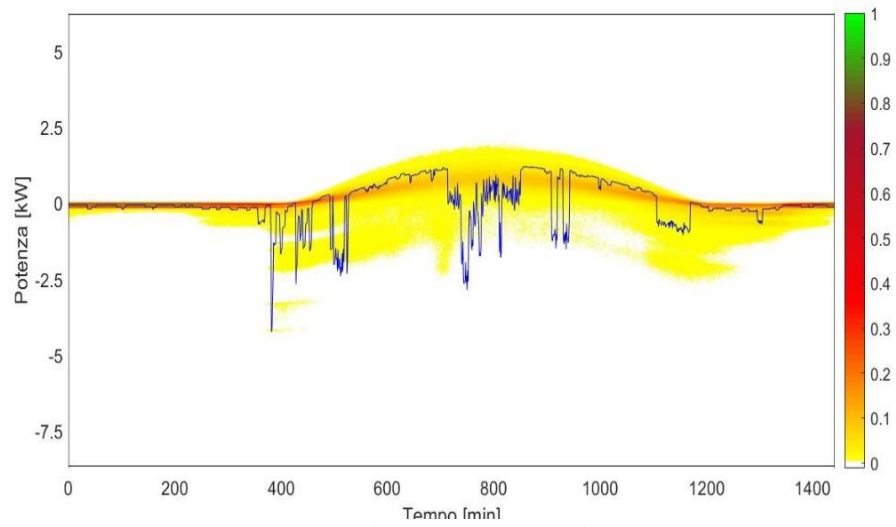


Figura 6.7 Clusterizzazione 2D – Cluster 2

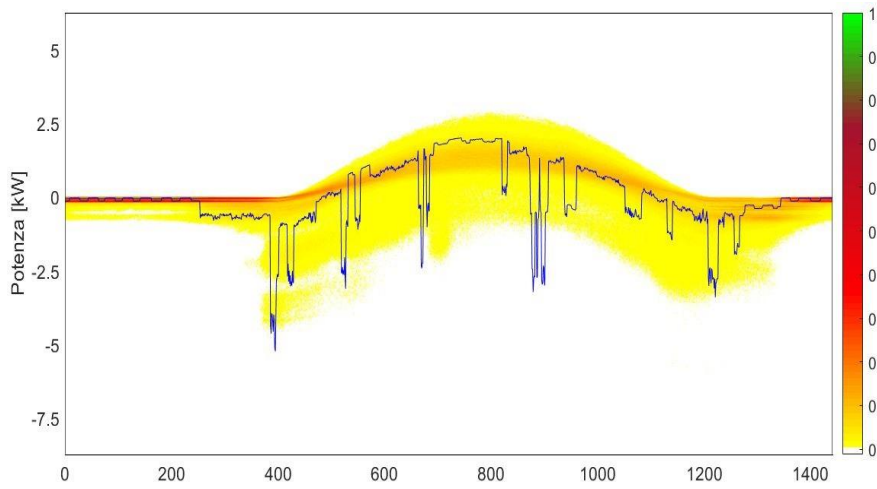


Figura 6.8 Clusterizzazione 2D – Cluster 3

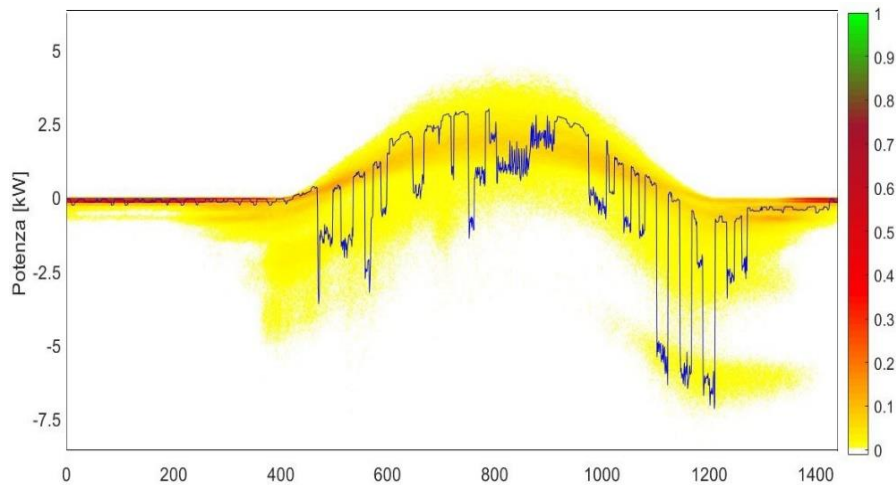


Figura 6.9 Clusterizzazione 2D – Cluster 4



6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

6.3.2 Clusterizzazione 3D

Anche in questo caso per la presentazione dei risultati si segue l'approccio della clusterizzazione in due dimensioni, con la rappresentazione nello spazio di definizione del problema in Fig. 6.10 e quella nel piano potenza – tempo nelle Fig. 6.11-14. Anche in questo caso i diversi cluster si distinguono per range di potenze impegnate e irregolarità dei profili centroidi. Si può notare che il cluster 4 presenta un centroide che nelle ore centrali della giornata non approssima bene l'andamento degli altri profili; tuttavia la corretta esecuzione dell'algoritmo ci assicura che questo sia comunque il più simile al comportamento medio di tutto il gruppo.

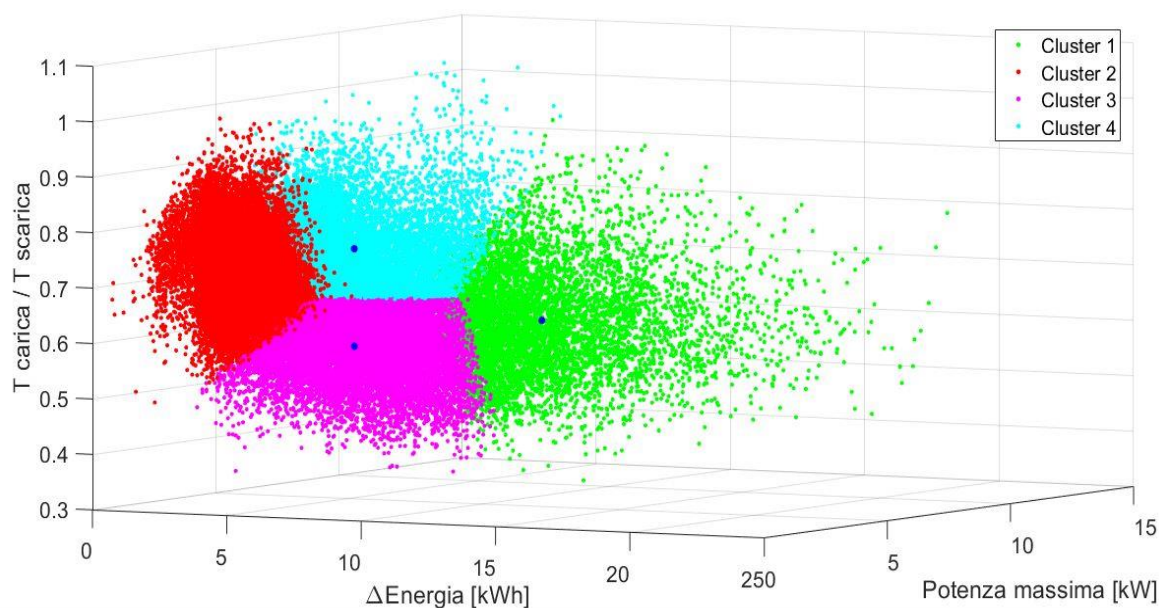


Figura 6.6 Clusterizzazione 3D - potenza massima in modulo, variazione di contenuto energetico della batteria, rapporto tra tempo in carica e tempo in scarica. Rappresentazione nel piano di definizione

	N° profili
<i>Cluster 1</i>	6.339
<i>Cluster 2</i>	14.333
<i>Cluster 3</i>	14.187
<i>Cluster 4</i>	9.256

Tabella 6.2 Caratteristiche dei cluster risultati dalla clusterizzazione in Pmax, ΔEnergia e tempo carica / tempo scarica

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

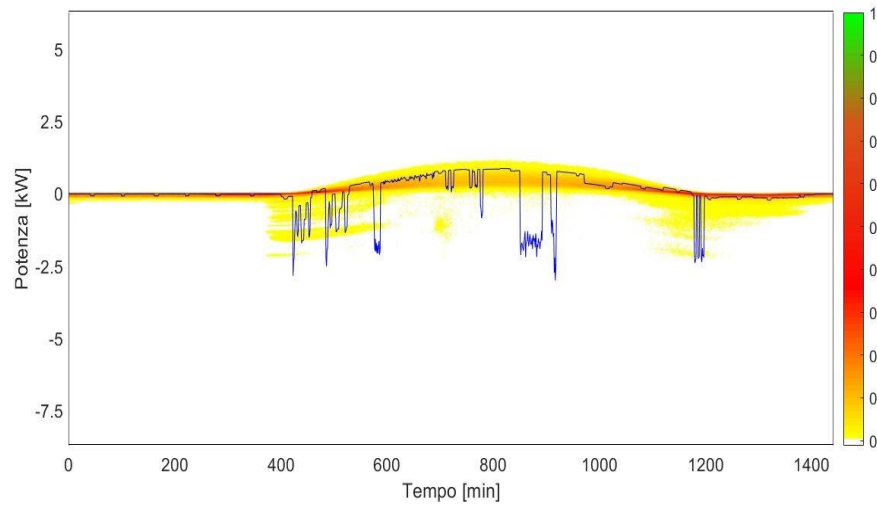


Figura 6.11 Clusterizzazione 3D rapporto tempi – Cluster 1

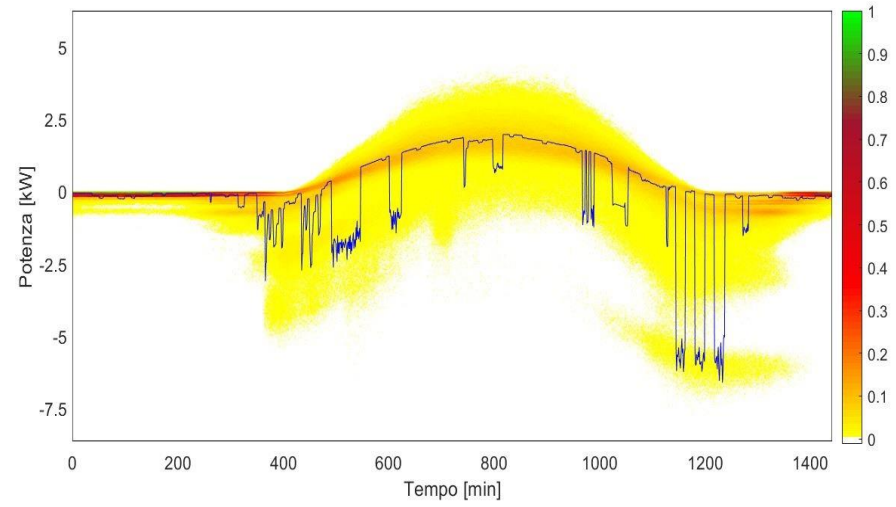


Figura 6.12 Clusterizzazione 3D rapporto tempi – Cluster 2

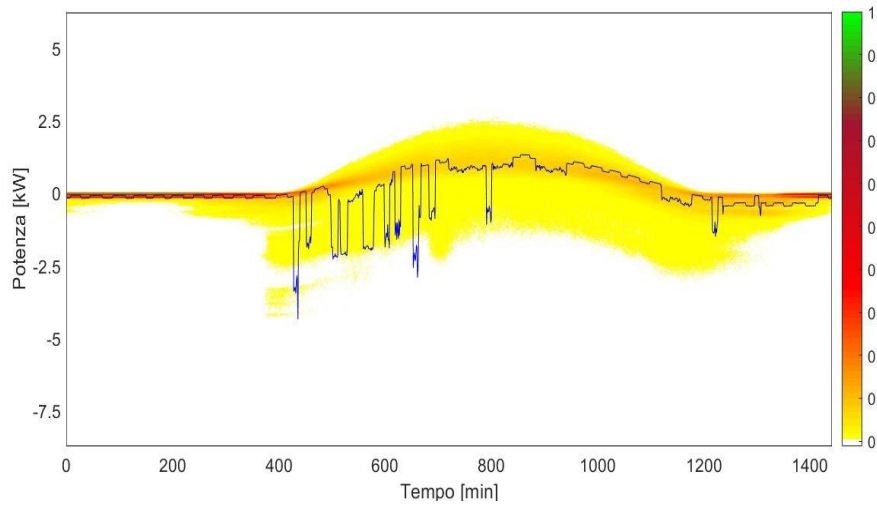


Figura 6.138 Clusterizzazione 3D rapporto tempi – Cluster 3

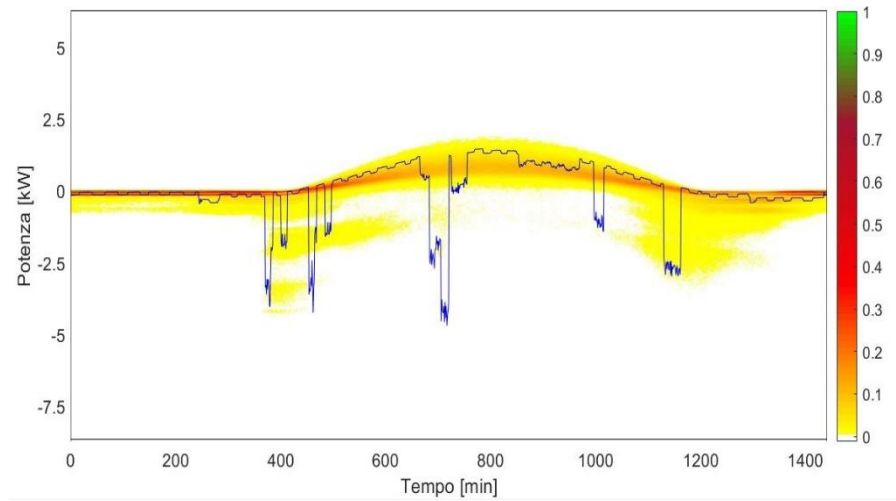


Figura 6.147 Clusterizzazione 3D rapporto tempi – Cluster 4

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

6.3.3 Clusterizzazione profili normalizzati

A partire da questo criterio, ora il problema è definito in uno spazio a 1440 dimensioni, di conseguenza è possibile presentare il risultato solamente nel piano potenza – tempo.

Ciò che emerge osservando i risultati riportati in Fig. 6.15-18 rispetto a quanto emerso dalle precedenti clusterizzazioni, è sicuramente una maggiore regolarità dei profili individuati come centroidi: il cluster 1 in particolare, ma anche il 2 hanno dei centroidi estremamente regolari. Ad ogni modo anche il centroide del quarto cluster, sicuramente il più irregolare tra i quattro, non raggiunge certo le caratteristiche del profilo più irregolare individuato con i precedenti criteri.

Un'altra differenza che vale la pena mettere in evidenza è che ora i cluster non si distinguono più nettamente per il range di potenze impegnate; permangono chiaramente delle differenze ma molto meno marcate. Questo risultato è coerente con quanto dichiarato nella sezione 5.6.1: una normalizzazione elimina la dipendenza dai valori assoluti di potenza. Di conseguenza la clusterizzazione tende a privilegiare gli andamenti che caratterizzano i diversi profili.

	N° profili
<i>Cluster 1</i>	21.171
<i>Cluster 2</i>	7.131
<i>Cluster 3</i>	10.371
<i>Cluster 4</i>	5.442

Tabella 6.3 Caratteristiche dei cluster risultati dalla clusterizzazione di profili normalizzati



6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

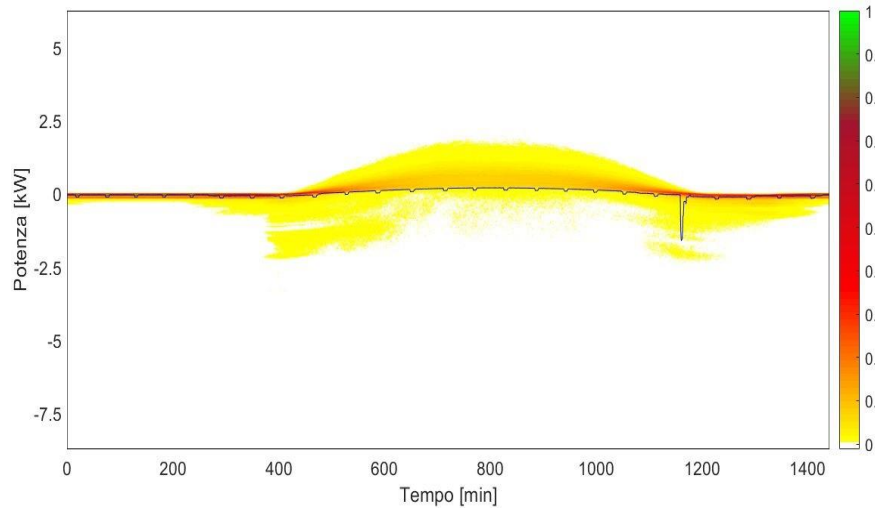


Figura 6.159 Clusterizzazione profili normalizzati – Cluster 1

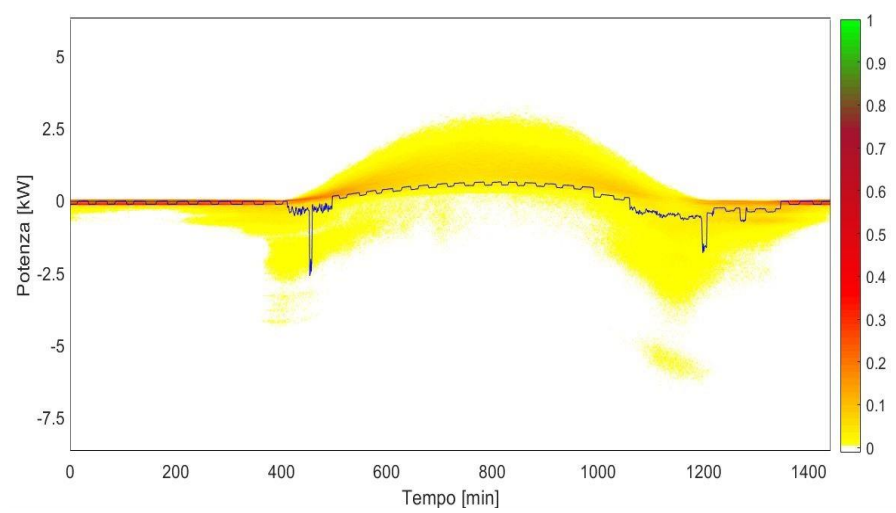


Figura 6.16 Clusterizzazione profili normalizzati – Cluster 2

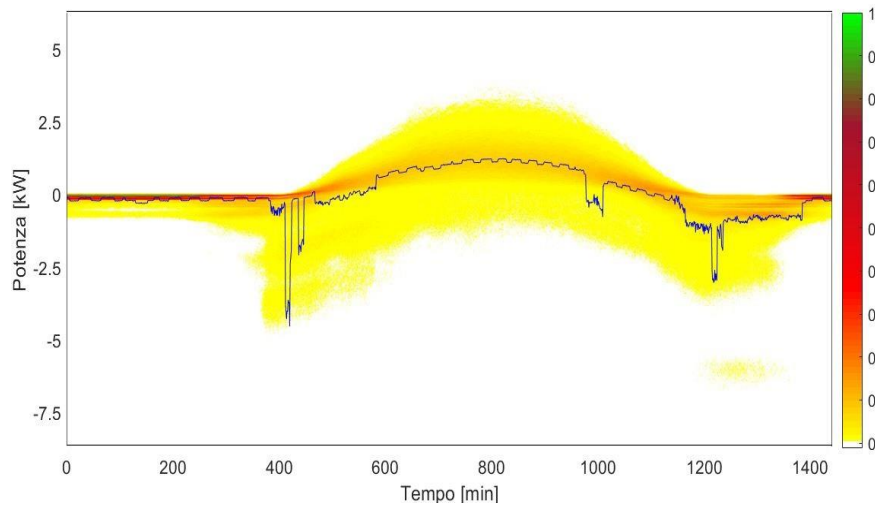


Figura 6.17 Clusterizzazione profili normalizzati – Cluster 3

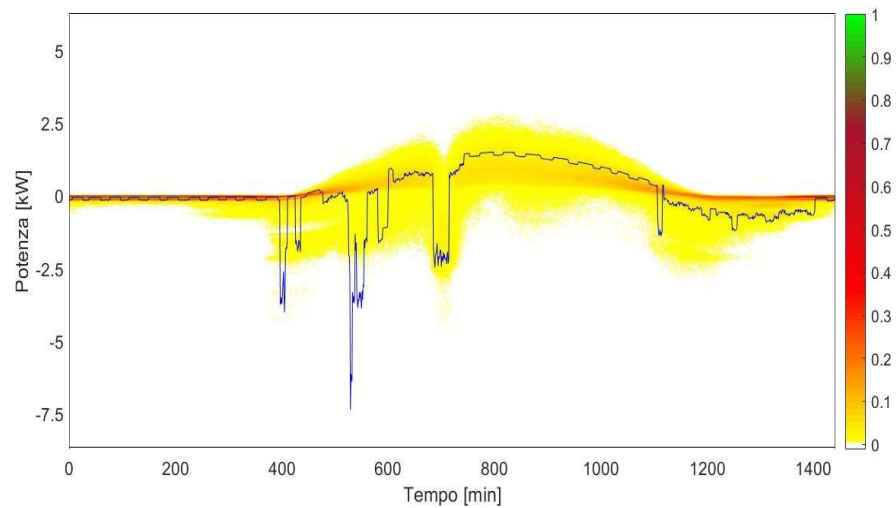


Figura 6.18 Clusterizzazione profili normalizzati – Cluster 4

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

6.3.4 Clusterizzazione profili non normalizzati

Benché anche tale criterio sia basato sui profili descritti nella loro evoluzione temporale, il risultato riportato in Fig. 6.19-22 è completamente differente da quanto ottenuto con il criterio precedente: ora i diversi cluster tornano a distinguersi nettamente sia in termini di range di potenze impegnate, sia per il trend dei profili. Anche ciò è coerente con le aspettative in quanto la clusterizzazione di profili non normalizzati non ne indaga solo il trend caratteristico, bensì ne considera anche i rispettivi valori di potenza.

In generale si parte quindi dal cluster 4, con profili molto regolari e basse escursioni di potenza su base giornaliera, per arrivare poi ai cluster 1 e 3, ben più rilevanti sia in termini di range di potenze sia in merito all'irregolarità del profilo centroe.

	N° profili
<i>Cluster 1</i>	2.929
<i>Cluster 2</i>	14.019
<i>Cluster 3</i>	3.984
<i>Cluster 4</i>	23.183

Tabella 6.4 Caratteristiche dei cluster risultati dalla clusterizzazione di profili non normalizzati

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

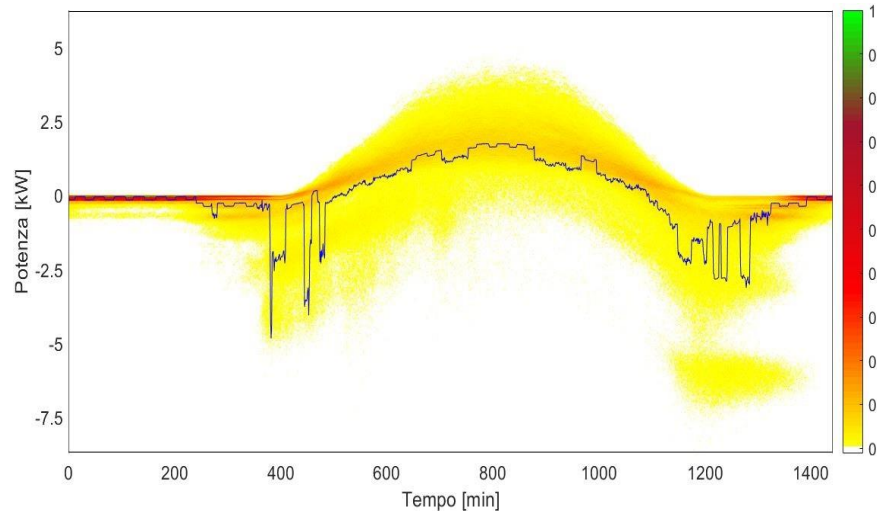


Figura 6.1911 Clusterizzazione profili non normalizzati – Cluster 1

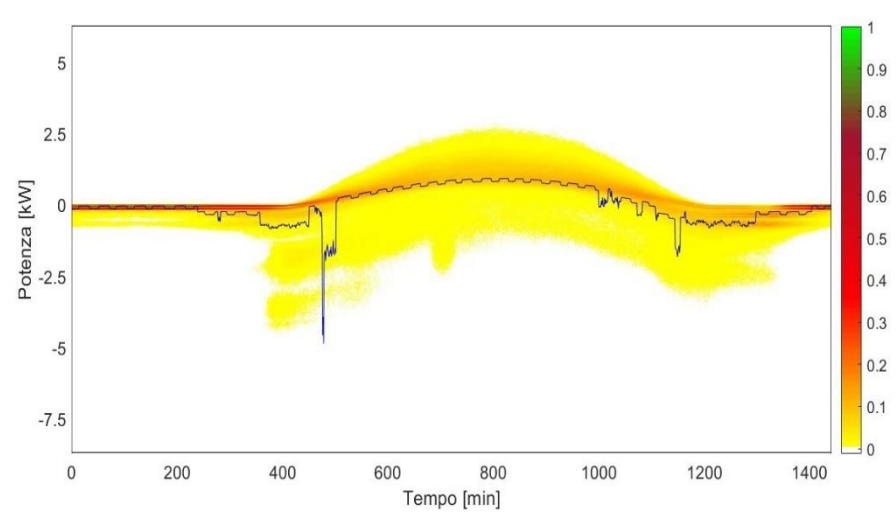


Figura 6.20 Clusterizzazione profili non normalizzati – Cluster 2

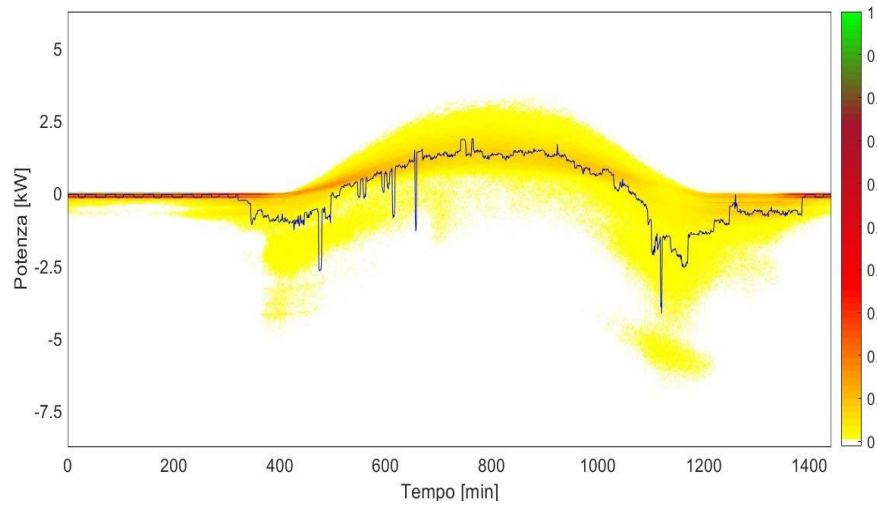


Figura 6.2110 Clusterizzazione profili non normalizzati – Cluster 3

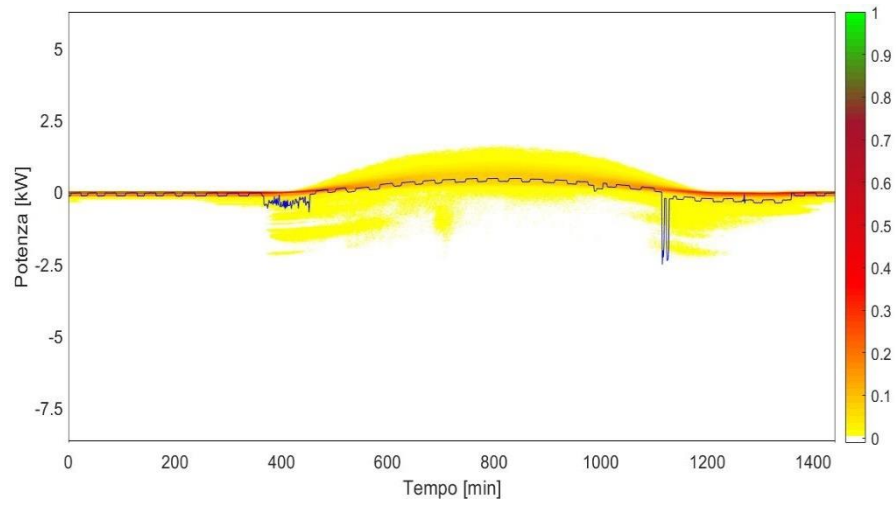


Figura 6.22 Clusterizzazione profili non normalizzati – Cluster 4

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

6.3.5 Clusterizzazione con FFT di profili normalizzati

In Fig. 6.23-26 è mostrato il risultato della clusterizzazione effettuata in base ai risultati della FFT di profili di batteria normalizzati per il rispettivo valore di potenza massima in modulo. Una caratteristica che emerge è, al pari del risultato ottenuto in base ai profili normalizzati, come un criterio che prevede la normalizzazione riesca a prestare maggiore attenzione all'andamento dei profili piuttosto che ai valori assoluti di potenza. A tal proposito si evidenzia un'analogia tra il cluster 1 individuato con questo criterio e quello rappresentato in Fig. 6.18: si osserva come peculiarità comune un caratteristico periodo di scarica che ha luogo verso mezzogiorno.

	N° profili
<i>Cluster 1</i>	10.325
<i>Cluster 2</i>	5.435
<i>Cluster 3</i>	7.125
<i>Cluster 4</i>	21.230

Tabella 6.5 Caratteristiche dei cluster risultati dalla clusterizzazione con FFT di profili normalizzati

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

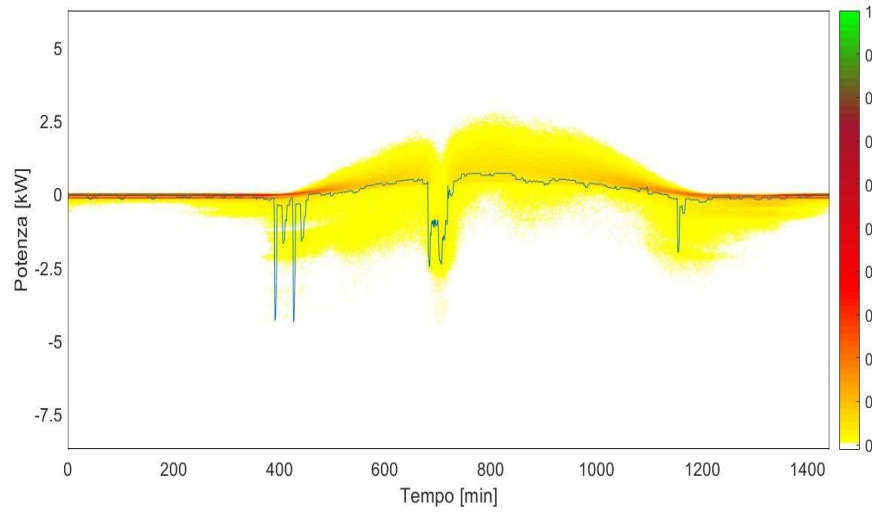


Figura 6.23 Clusterizzazione FFT di profili normalizzati – Cluster 1

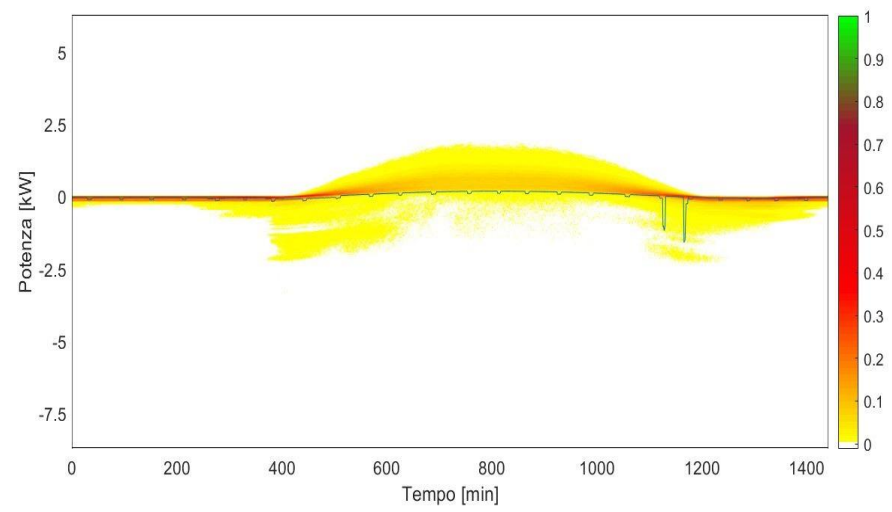


Figura 6.24 Clusterizzazione FFT di profili normalizzati – Cluster 2

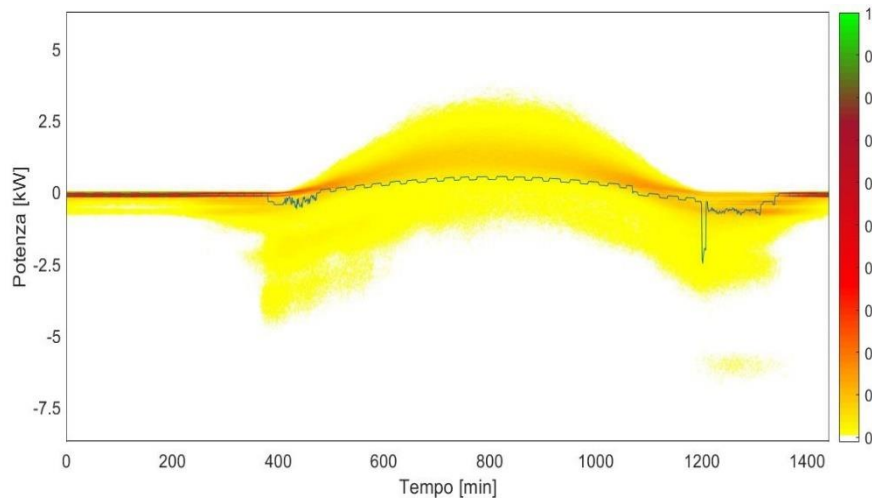


Figura 6.25 Clusterizzazione FFT di profili normalizzati – Cluster 3

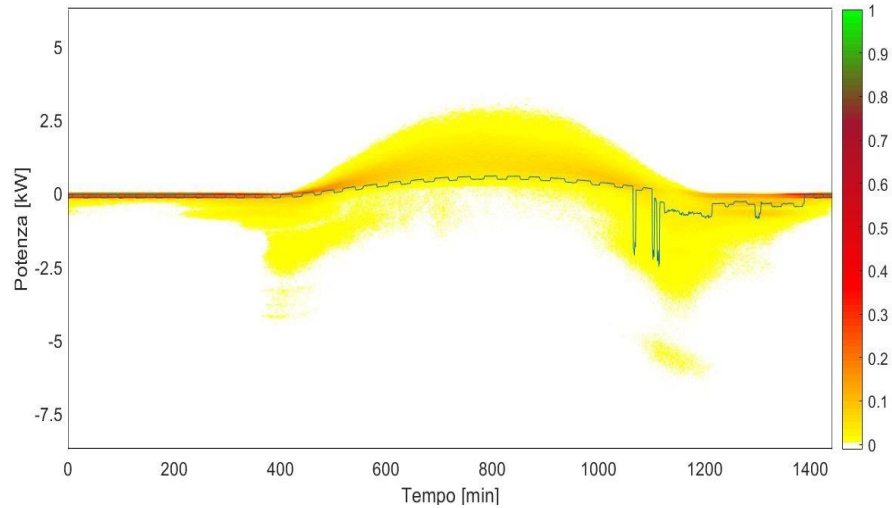


Figura 6.26 Clusterizzazione FFT di profili normalizzati – Cluster 4

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

6.3.6 Clusterizzazione con FFT di profili non normalizzati

In Fig. 6.27-30 è mostrato il risultato della clusterizzazione in base ai risultati della FFT di profili non normalizzati.

Non sembra necessario entrare nel dettaglio dei risultati in quanto essi rispecchiano molto quelli emersi dalla clusterizzazione di profili non normalizzati. In particolare, considerando proprio questi due criteri che clusterizzano a partire dai profili non normalizzati, si può osservare come tre dei quattro cluster abbiano un'affinità molto elevata, tanto che i rispettivi centroidi sono rappresentati dagli stessi profili.

	N° profili
<i>Cluster 1</i>	3.957
<i>Cluster 2</i>	23.153
<i>Cluster 3</i>	14.082
<i>Cluster 4</i>	2.923

Tabella 6.6 Caratteristiche dei cluster risultati dalla clusterizzazione con FFT di profili non normalizzati

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

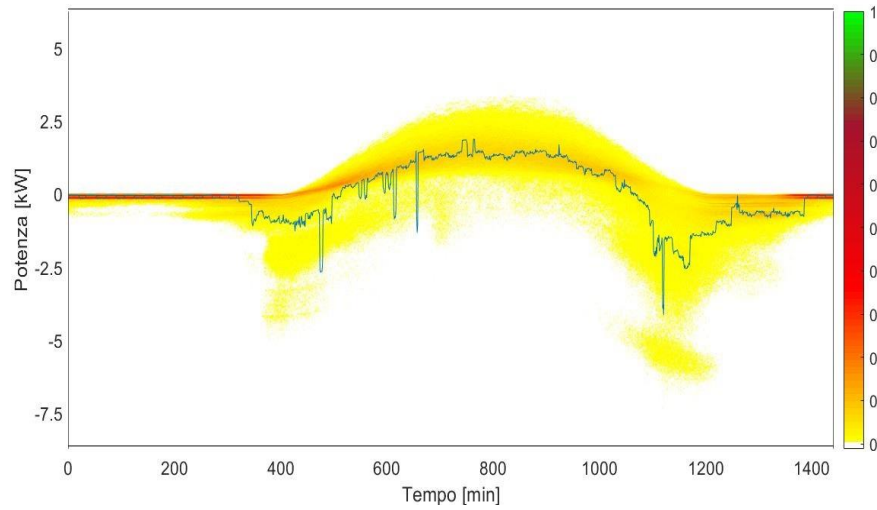


Figura 6.27 Clusterizzazione FFT di profili non normalizzati – Cluster 1

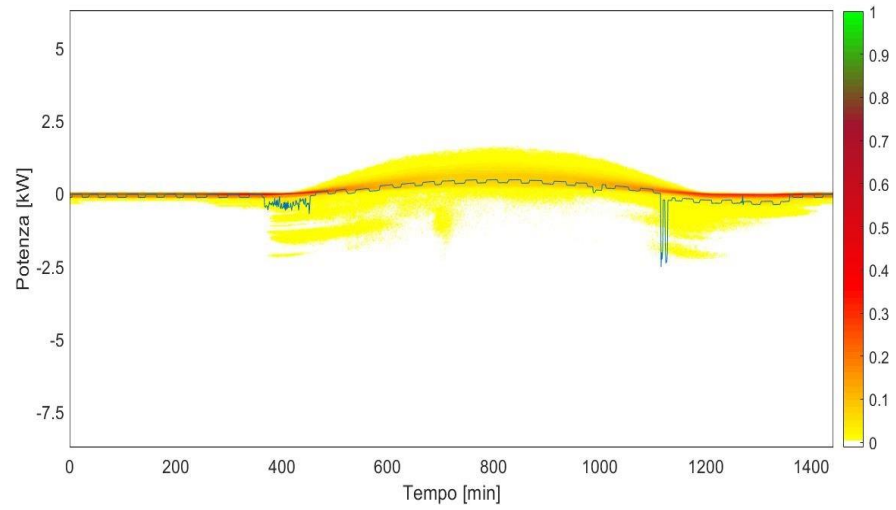


Figura 6.2814 Clusterizzazione FFT di profili non normalizzati – Cluster 2

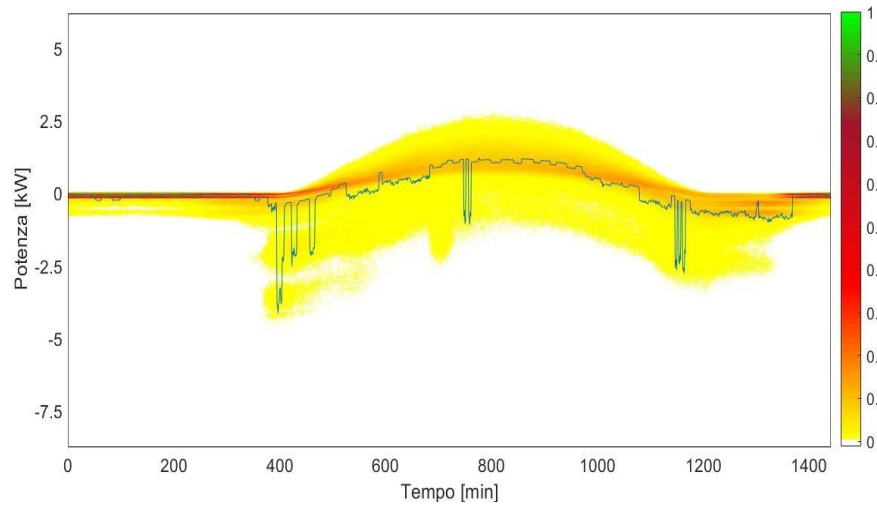


Figura 6.2913 Clusterizzazione FFT di profili non normalizzati – Cluster 3

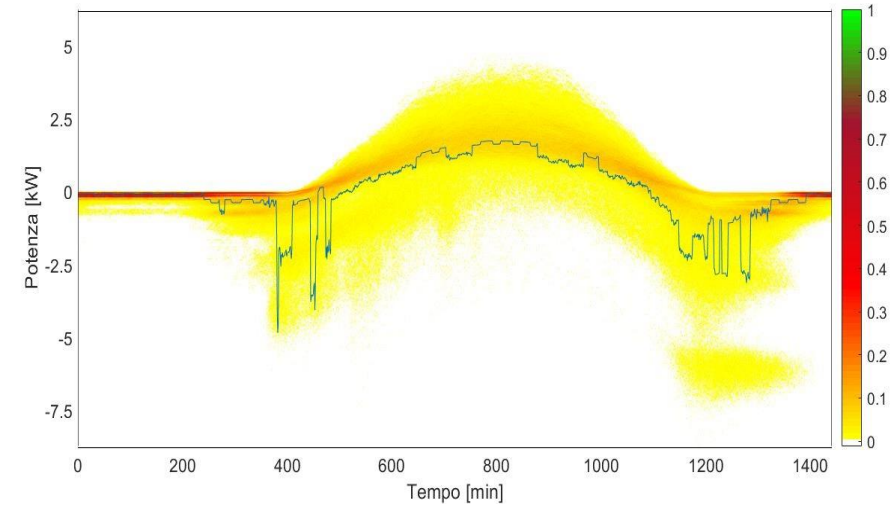


Figura 6.3012 Clusterizzazione FFT di profili non normalizzati – Cluster 4



- Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

## 6.4 Validazione dei risultati ottenuti

Una volta ottenuti i risultati delle diverse clusterizzazioni, è necessario procedere a un'accurata validazione di quanto ottenuto. Solo in questo modo è possibile individuare il numero ottimale di cluster e al tempo stesso scegliere il criterio che produca effettivamente cluster di profili con rendimento di batteria piuttosto simile.

In accordo alla procedura delineata nella prima parte, il processo di validazione dei risultati si compone di due step successivi: dapprima si calcola, tramite simulazioni con il modello a due rami RC, il rendimento elettrochimico che la specifica batteria manifesterebbe dovendo eseguire ciascun profilo del dataset, successivamente si valuta l'andamento del KPI al variare del numero di cluster e del criterio di clusterizzazione. Si ricorda in sintesi che il modello deve simulare i profili a partire dal medesimo stato di carica della batteria, e che il rendimento risultante farà riferimento alla definizione approssimata (5.4) introdotta con la descrizione della metodologia.

In considerazione di quanto appena richiamato dalla procedura generale, è possibile presentare in Fig. 6.31 i rendimenti ottenuti attraverso le simulazioni. Si precisa che è stato necessario scartare circa l'1% dei profili in quanto il profilo di SoC che sarebbe stato da loro richiesto, non era compatibile con il limite fisico associato alla massima e alla minima capacità della batteria.

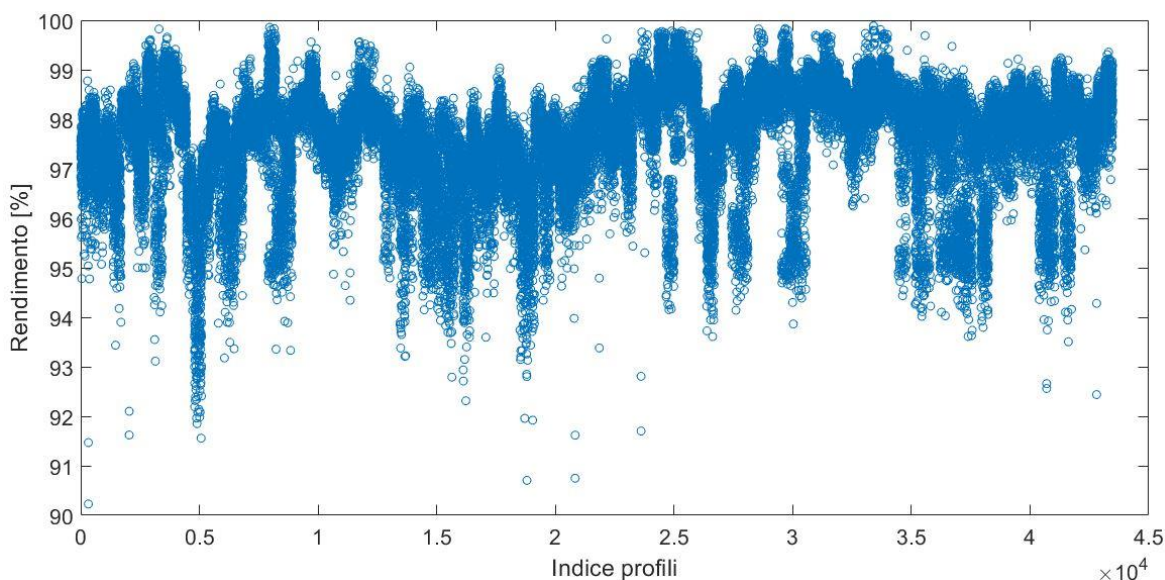


Figura 6.15 Rendimento dei profili in analisi simulato con il modello a due rami RC

Simulato il funzionamento giornaliero e valutati i rendimenti per mezzo del modello elettrico scelto, si può procedere al calcolo del KPI al variare del numero di cluster e del criterio di clusterizzazione utilizzato, in accordo con la formula (5.7). Si riporta in Fig. 6.32 il valore dell'indice calcolato e si ricorda che questo considera nella definizione lo scostamento, in termini di rendimento, di ciascun profilo dal centroide del cluster di appartenenza.



6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

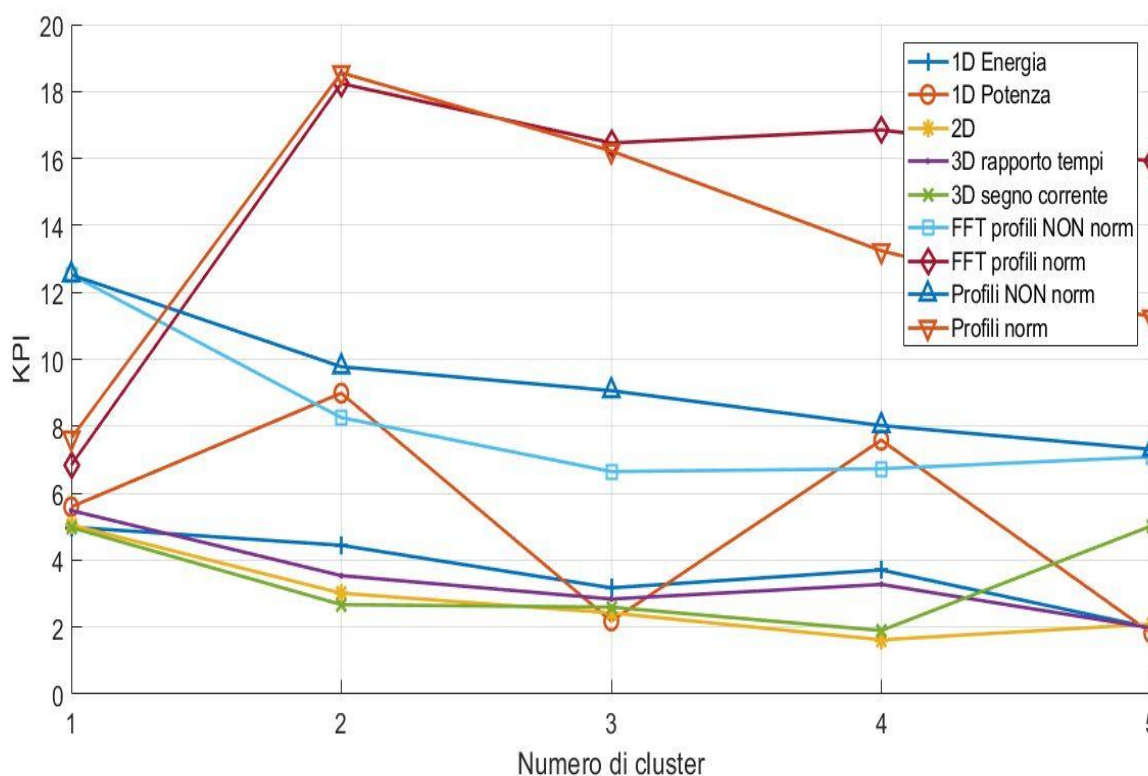


Figura 6.16 Andamento del KPI al variare di criterio di clusterizzazione e numero di cluster

Con riferimento all'andamento del KPI sono possibili due osservazioni, la prima in merito al trend dello stesso KPI e la seconda relativamente al criterio individuato come ottimale.

In primo luogo, si può osservare che, a differenza dell'indice WSS, ora la funzione non è più decrescente, ma presente un andamento variabile. La motivazione è riconducibile al fatto che l'algoritmo nella sua esecuzione non considera i rendimenti. Il raffronto con i rendimenti è una considerazione a valle del risultato, al fine di analizzarlo in considerazione degli obiettivi di questa trattazione. Non si può quindi avere un trend regolare, ma si ha l'obiettivo di trovare il punto in cui tale indice presenta un minimo.

In secondo luogo, il minimo si ha per il criterio di clusterizzazione in due dimensioni (potenza massima in modulo e  $\Delta$ Energia) con quattro cluster. Il risultato conferma dunque la scelta fatta in termini del numero di cluster. Tuttavia, al contrario di quanto ci si potrebbe aspettare, è emerso che l'utilizzo di due indici sintetici per descrivere il profilo di batteria conduce ad un risultato migliore rispetto a criteri più strutturati che considerano l'intera evoluzione temporale. Tale risultato non era così prevedibile; era lecito invece aspettarsi che tutta l'evoluzione temporale del profilo concorresse a determinare il rendimento di batteria. A posteriori è possibile spiegare tale risultato considerando che la potenza massima gestita dalla batteria e la massima variazione del suo contenuto energetico sono di fatto le quantità che più impattano sul funzionamento in campo della batteria stessa, tanto da essere proprio le grandezze considerate in fase di dimensionamento. La massima potenza gestita è associata al massimo C-rate tollerabile dal sistema e dunque alla sua massima sollecitazione, la variazione di contenuto energetico determina invece la taglia.

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

Una considerazione interessante riguarda il perché i criteri che considerano l'intero profilo hanno manifestato un sostanziale fallimento. La ragione potrebbe risiedere nel fatto che considerare l'intera evoluzione temporale del profilo, e dunque dover gestire un problema in uno spazio a 1440 dimensioni, mette in gioco una serie di variabili quali ad esempio i diversi trend orari e il numero di picchi, che evidentemente non hanno alcuna influenza sul rendimento. A tal proposito è possibile fare riferimento alle clusterizzazioni in tre dimensioni considerate nel calcolo del KPI, le quali hanno aggiunto alle due grandezze del caso ottimale rispettivamente altre due variabili: il rapporto tra tempo in carica e tempo in scarica e il numero di cambi di segno della corrente. Queste nuove variabili sono state scelte arbitrariamente, senza tenere in considerazione quanto fossero effettivamente importanti nel caratterizzare il profilo e il suo rendimento; il risultato è che con una clusterizzazione in tre dimensioni il KPI tende a peggiorare lievemente, mantenendo comunque valori bassi. Probabilmente l'aggiunta di una variabile, rispetto alle due del caso ottimale, va a costituire un elemento di disturbo rispetto ai parametri che manifestano realmente un legame con il rendimento, ma trattandosi di una sola variabile l'effetto è limitato. In 1440 dimensioni questa tendenza risulterebbe esasperata, dunque l'algoritmo di clusterizzazione andrebbe a lavorare di fatto su variabili che per la maggior parte non incidono sul rendimento. Si giungerebbe allora ad un risultato discorde dagli obiettivi inizialmente fissati. Probabilmente i criteri che considerano l'intero profilo o la sua FFT, al fine di esprimere le loro potenzialità in un'analisi di questo tipo, necessiterebbero di un algoritmo di diverso tipo che non è stato nemmeno preso in considerazione in questa trattazione. Allo stato attuale, è chiara la preferenza per una clusterizzazione su indicatori aggregati.

#### 6.4.1 Presentazione del risultato validato

Dall'analisi del Key Performance Index è emerso come la clusterizzazione in termini di potenza massima in modulo e variazione di contenuto energetico della batteria, con quattro cluster, sia la procedura ottimale per suddividere i profili sulla base del rendimento elettrochimico di batteria. In Fig. 6.33 vi è lo stesso tipo di grafico riportato in Fig. 6.31, considerando ora il risultato della clusterizzazione, e dunque distinguendo i diversi profili sulla base del rispettivo cluster di appartenenza. A dimostrazione del fatto che ogni cluster contiene profili caratterizzati da uno specifico range di rendimento, in Fig. 6.34 si presentano i quattro boxplot, uno per ogni cluster, per capire la distribuzione dei profili in base al corrispondente rendimento di batteria.

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

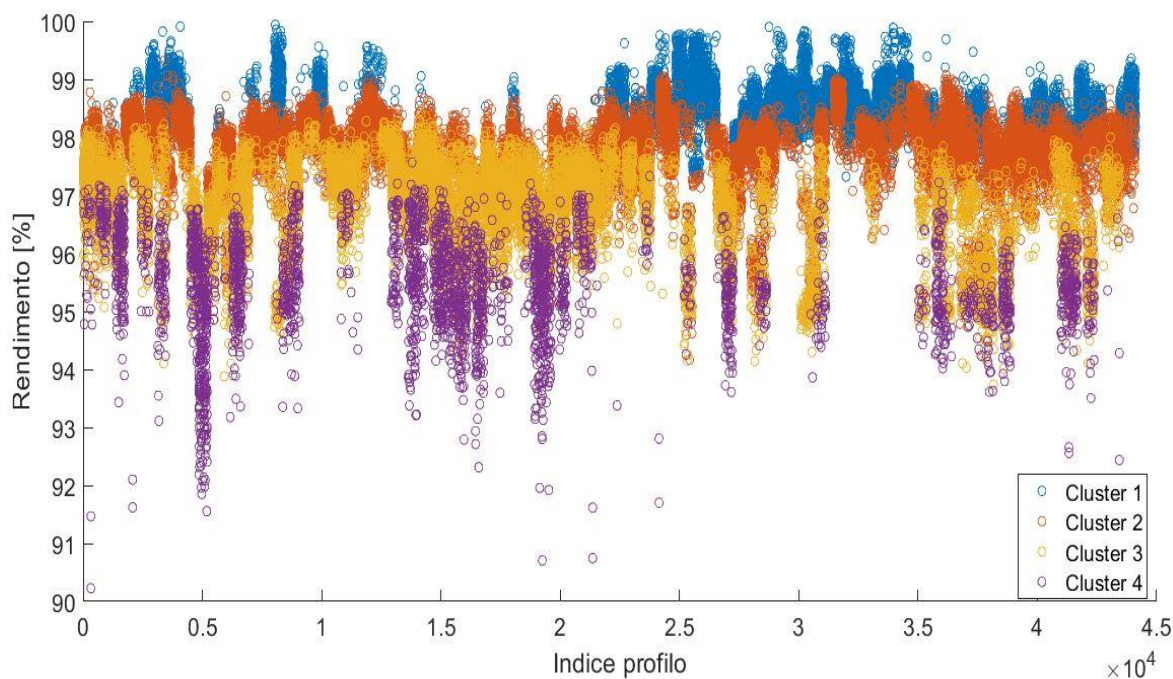


Figura 6.17 Rendimento dei diversi profili in funzione del cluster di appartenenza. Clusterizzazione in  $P_{max}$  e  $\Delta E_{energia}$

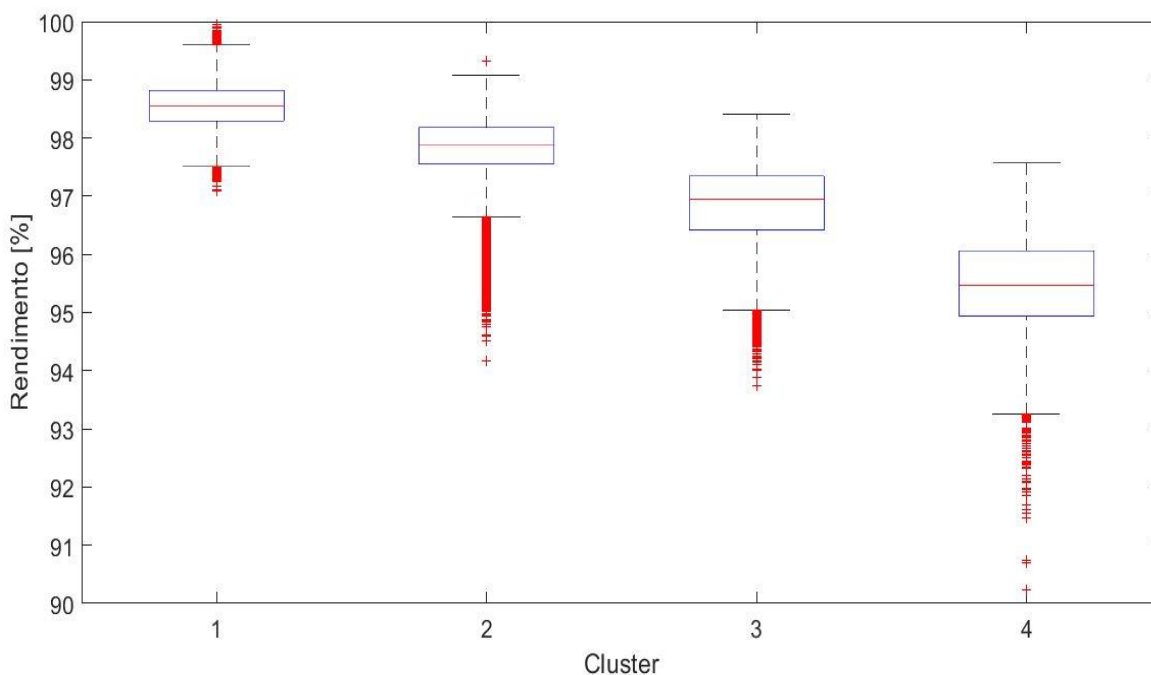


Figura 6.18 Boxplot dei rendimenti simulati per ogni cluster. Clusterizzazione in  $P_{max}$ ,  $\Delta E_{energia}$

Come controprova, allo scopo di dimostrare l'efficacia dell'indice KPI, si riportano in Fig. 6.35 e Fig. 6.36 i risultati di un diverso criterio di clusterizzazione. Si considera ad esempio la clusterizzazione rispetto ai profili normalizzati, che in nessun caso si è rivelata essere quella ottimale.

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard: applicazione della metodologia proposta

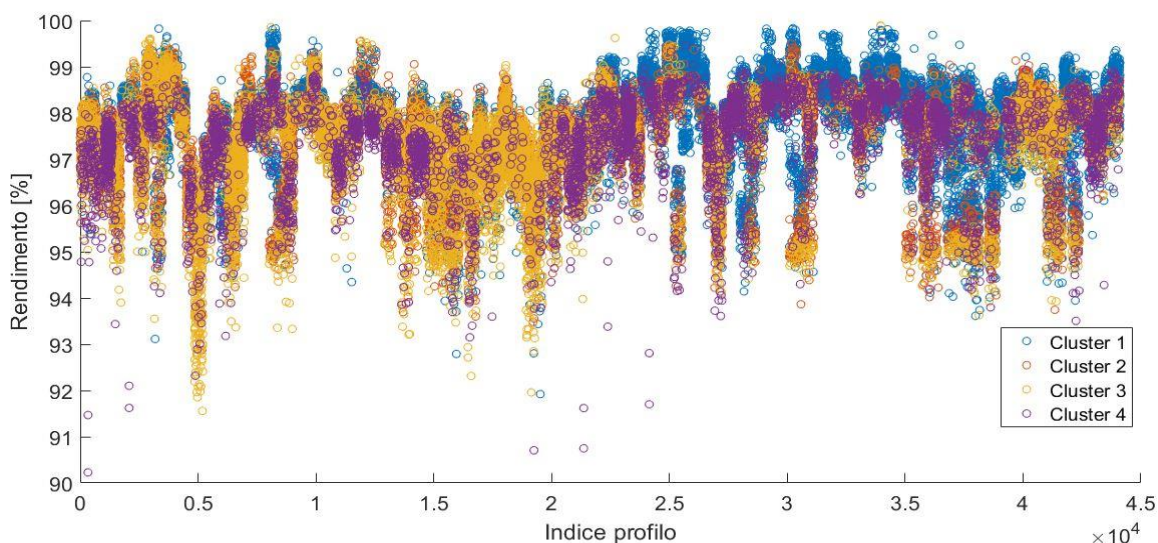


Figura 6.19 Rendimento simulato per i diversi profili in funzione del cluster di appartenenza. Clusterizzazione di profili normalizzati per la rispettiva potenza massima in modulo

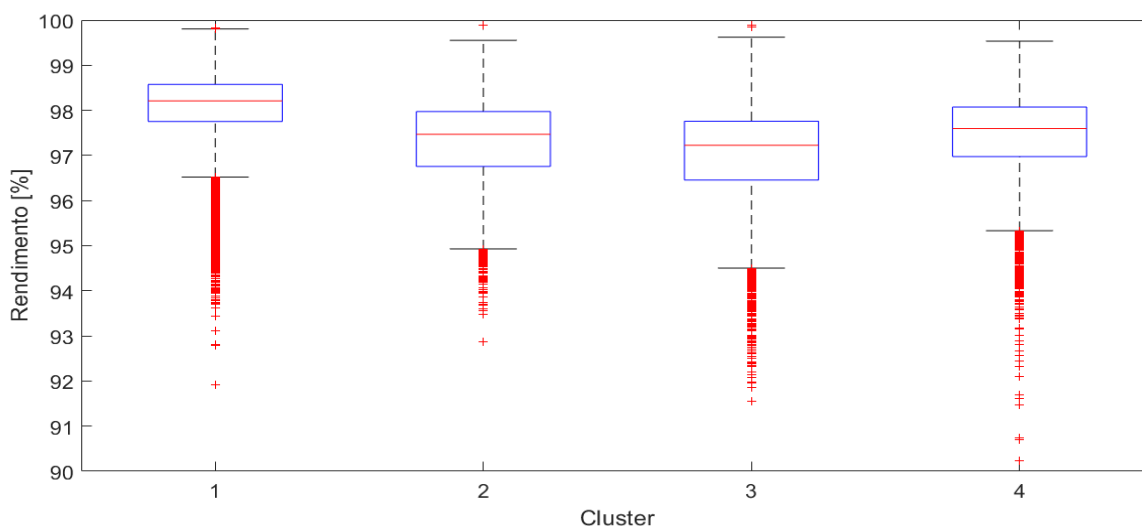


Figura 6.20 Boxplot dei rendimenti simulati per ogni cluster. Clusterizzazione di profili normalizzati per la rispettiva potenza massima in modulo

Considerando questo secondo criterio si vede chiaramente come la clusterizzazione, in questo caso, ha dato un esito incoerente con le aspettative: nei diversi cluster infatti vi sono profili con rendimenti di batteria molto diversi tra loro al punto che, come emerge dai boxplot, non vi sono differenze sostanziali tra i diversi cluster.

Tale risultato è di importanza fondamentale e ha un duplice significato. In primo luogo, mostra che non tutti i criteri consentono di perseguire gli obiettivi inizialmente fissati, cosa che avrebbe reso priva di utilità lo studio qui condotto. Dunque, sviluppare una procedura con l'analisi in parallelo di diversi criteri si è rivelata una scelta vincente.

In secondo luogo, si può affermare che il Key Performance Index qui definito e utilizzato è un criterio robusto ed efficace per discriminare i risultati significativi da quelli privi di interesse pratico.



## 6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard: applicazione della metodologia proposta

### 6.4.2 Analisi di sensitività

In accordo alla procedura delineata nella precedente sezione, prima di trarre delle conclusioni sull'analisi finora svolta, è indispensabile procedere con un'analisi di sensitività per esprimere alcune considerazioni in merito alla robustezza del risultato ottenuto. A tal proposito sono stati costruiti i due dataset a partire da quello di partenza, separando i profili di indice dispari da quelli di indice pari. In Fig. 6.37-6.40 sono mostrati per entrambi i dataset i consueti rendimenti in funzione del cluster di appartenenza e i boxplot.

Da un punto di vista grafico si osserva come in entrambi i casi i diversi cluster tendono a contenere profili caratterizzati da un rendimento piuttosto simile. Dalle caratteristiche dei boxplot inoltre, non si notano sostanziali differenze con il risultato principale. È possibile pertanto concludere che la procedura delineata è valida indipendentemente dal dataset di partenza, e soprattutto che il risultato individuato è stabile al variare del dataset stesso.

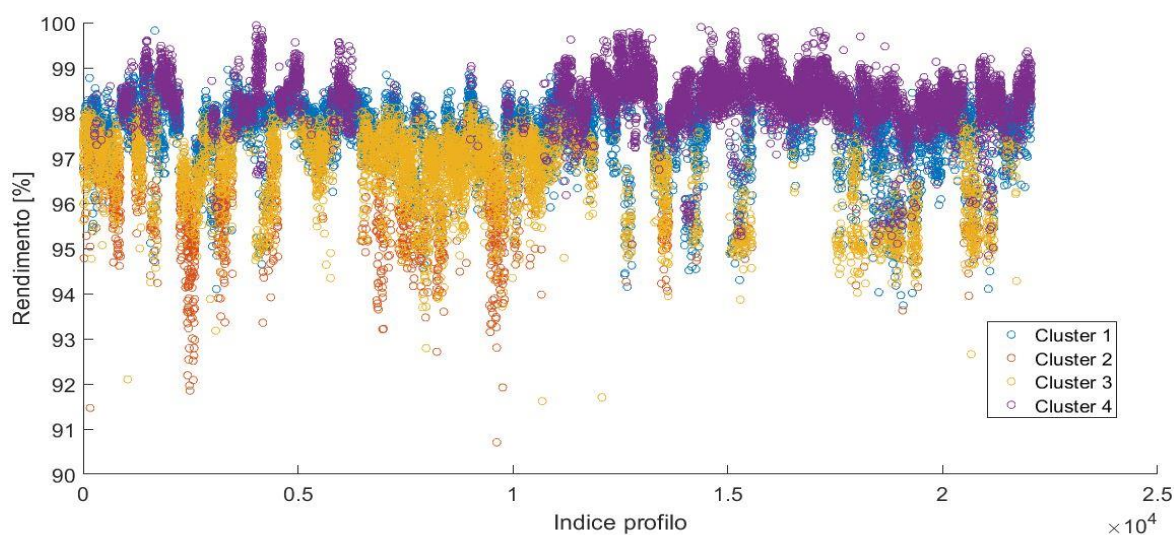


Figura 6.21 Rendimento simulato per i diversi profili in funzione del cluster di appartenenza. Profili di indice pari

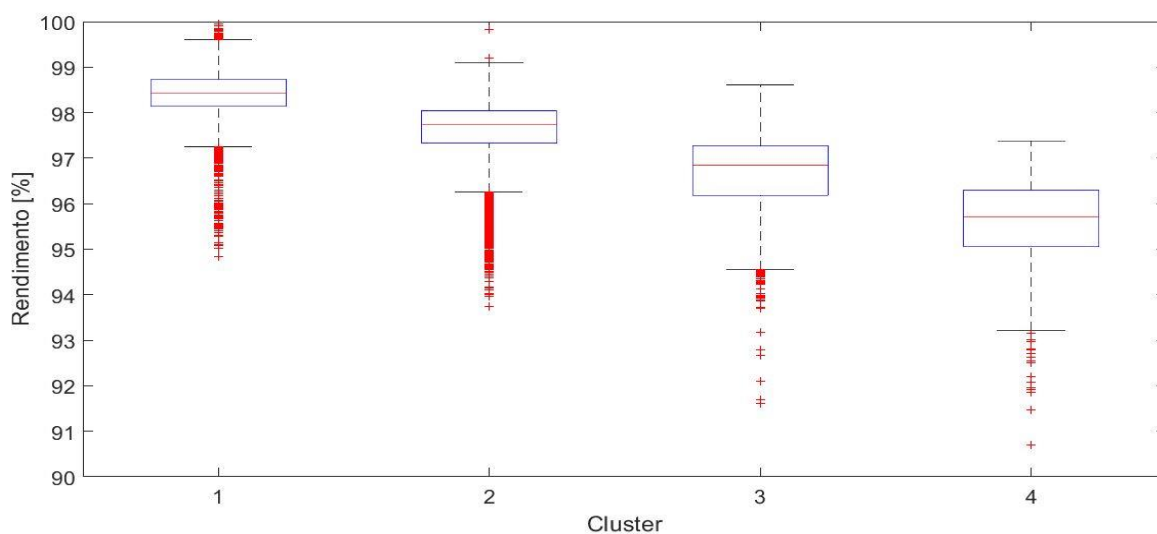


Figura 6.22 Boxplot dei rendimenti simulati per ogni cluster. Profili di indice pari

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard: applicazione della metodologia proposta

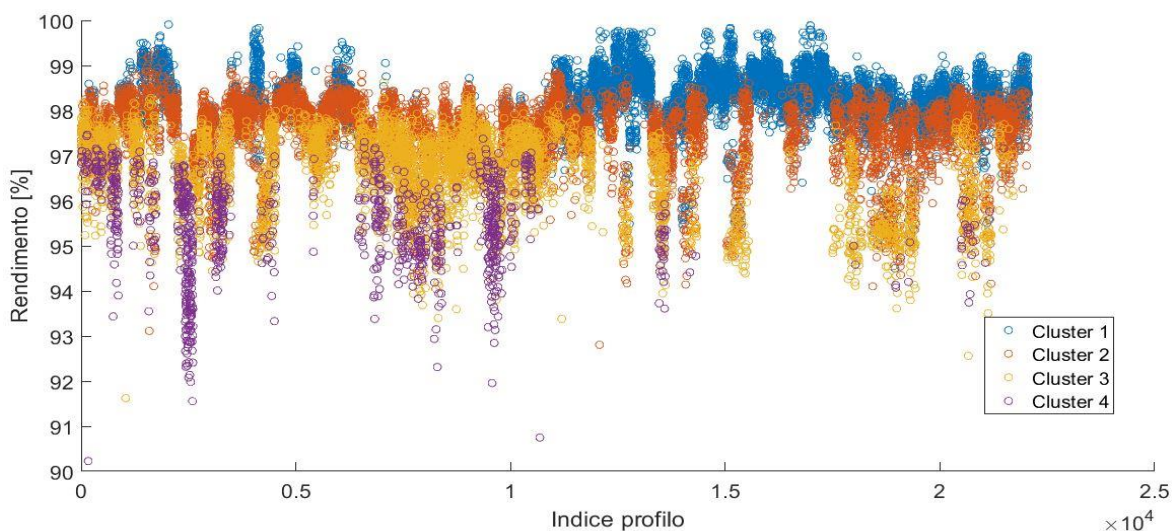


Figura 6.23 Rendimento simulato per i diversi profili in funzione del cluster di appartenenza. Profili di indice dispari

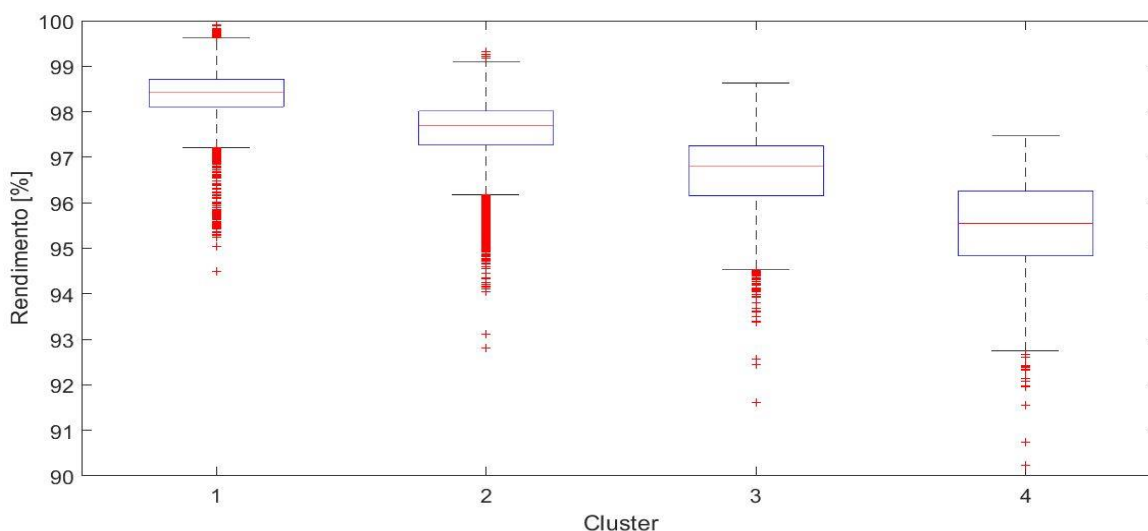


Figura 6.24 Boxplot dei rendimenti simulati per ogni cluster. Profili di indice dispari

## 6.5 Conclusioni e prospettive di sviluppo

In questo capitolo è stata condotta un'accurata analisi sui profili di batteria con lo scopo di identificare un numero ristretto di profili, qualificabili come profili standard, che fossero però rappresentativi di tutti gli utenti domestici che possiedono, presso la propria abitazione, un piccolo impianto fotovoltaico accoppiato a un sistema di accumulo elettrochimico per finalità di autoconsumo.

L'obiettivo generale che giustifica quest'analisi si fonda, oltre che sulla necessità di definire dei profili standard per le applicazioni di autoconsumo, anche sulla necessità di prevedere le prestazioni di una batteria, che dovrà essere installata presso una determinata utenza, a partire dai profili di carico dell'utenza stessa e dai rendimenti che la medesima batteria manifesta con i profili standard. Conoscendo il profilo di carico, con opportune

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard: applicazione della metodologia proposta

considerazioni sul dimensionamento dell'impianto fotovoltaico è possibile ricavare i profili di utilizzo giornaliero della batteria. Esprimendo questi ultimi in termini di potenza massima in modulo e massima variazione di energia contenuta nella batteria, è possibile sfruttare il risultato ottenuto e distribuirli opportunamente nei diversi cluster servendosi della Fig. 6.41, in cui le diverse regioni hanno indicazione del rendimento del rispettivo profilo centroide. Si ricorda che il valore numerico qui fornito è valido per la sola batteria su cui è stato sviluppato il modello, e dovrà essere determinato di volta in volta per ogni dispositivo.

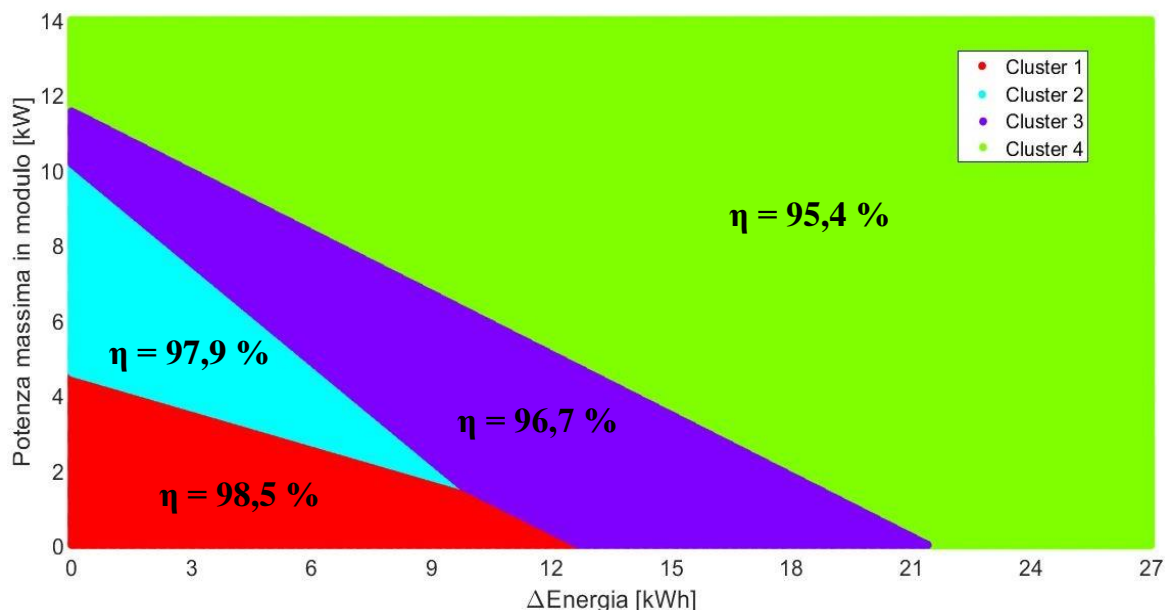


Figura 6.25 Regioni del piano  $P_{max}$  vs.  $\Delta$ Energia di competenza dei quattro cluster e rendimento del rispettivo centroide

Osservando quindi la distribuzione dei profili all'interno dei vari cluster e conoscendo già il rendimento caratteristico dei rispettivi centroidi è possibile dedurre quali saranno le prestazioni medie del sistema di accumulo se installato in una certa utenza. Si tratta comunque di una stima dell'efficienza media, che rappresenta in ogni caso un ragionevole punto di partenza per il dimensionamento tecnico e per l'analisi di fattibilità economica.

Con riferimento alla Fig. 6.42 e Fig. 6.43, si capisce come non sia difficile identificare i cluster più rappresentativi di un dato utente e individuare di conseguenza un rendimento medio: infatti per la quasi totalità dei profili in analisi, ogni famiglia è univocamente identificata da uno o al più da due cluster. Nel primo caso il rendimento è di immediata deduzione, nel secondo è necessario valutare un rendimento medio ponderato in base alla distribuzione dei profili nei due cluster.

Non si vuole ripercorrere ora tutta la procedura, già ampiamente descritta e ripresa diverse volte nel corso del capitolo. Con riferimento alla Fig. 6.44, si preferisce piuttosto darne una rappresentazione schematica per mettere in evidenza i passaggi principali e il legame logico che tra essi intercorre.

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
 applicazione della metodologia proposta

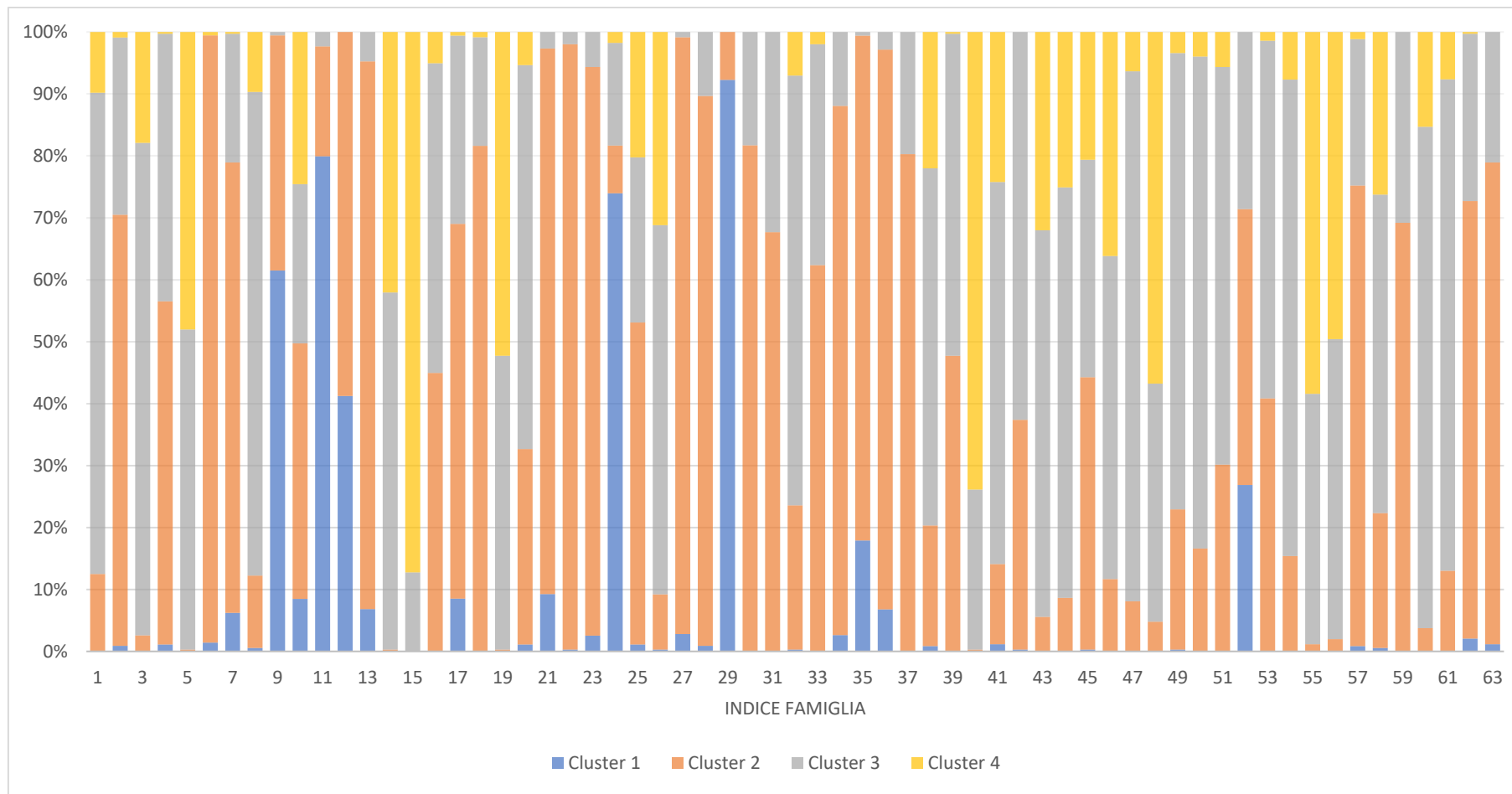


Figura 6.26 Distribuzione dei profili di batteria delle sessantatré famiglie in modalità energy intensive all'interno dei quattro cluster



6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

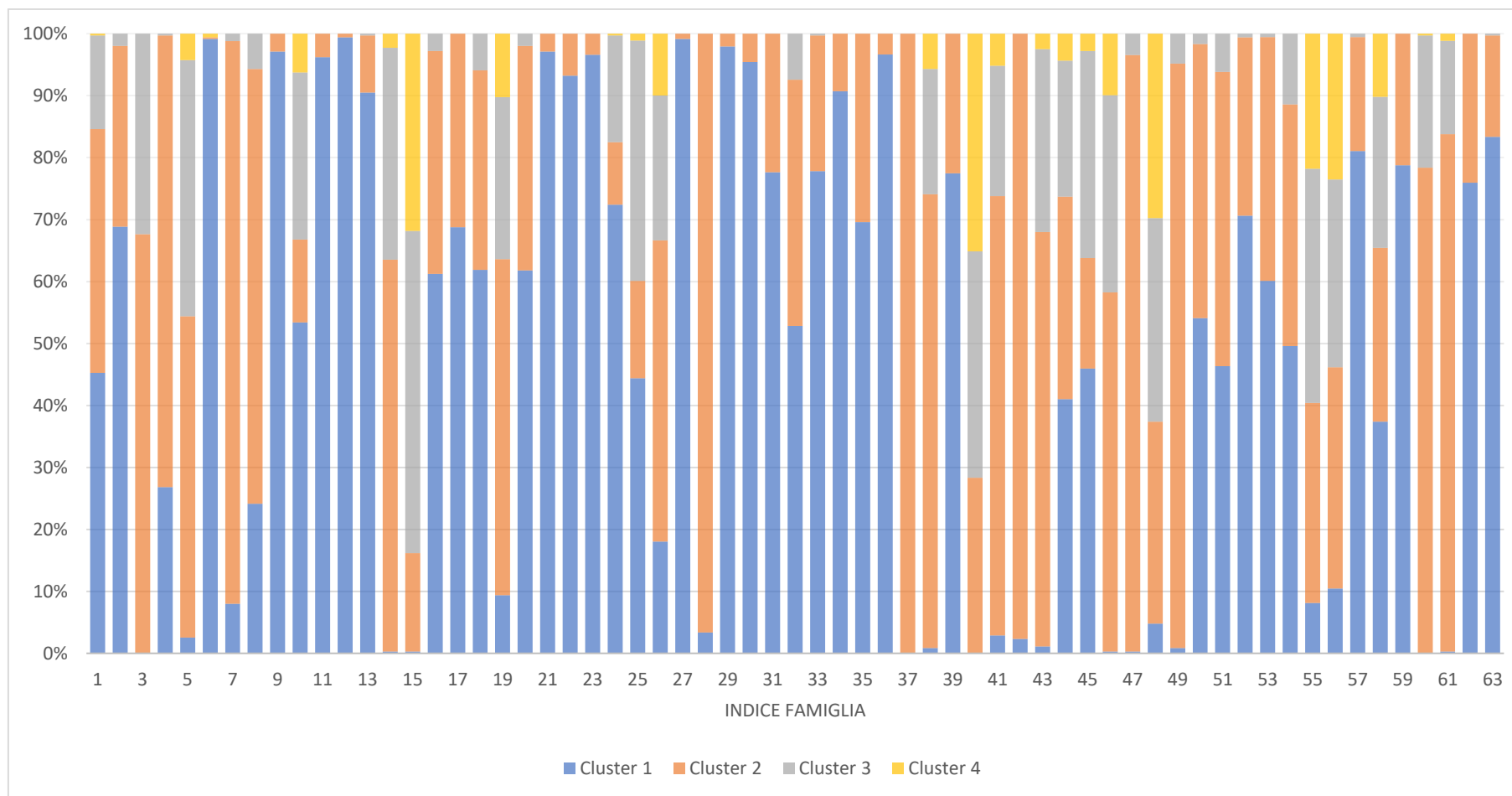


Figura 6.27 Distribuzione dei profili di batteria delle sessantatré famiglie in modalità energy saving all'interno dei quattro cluster

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

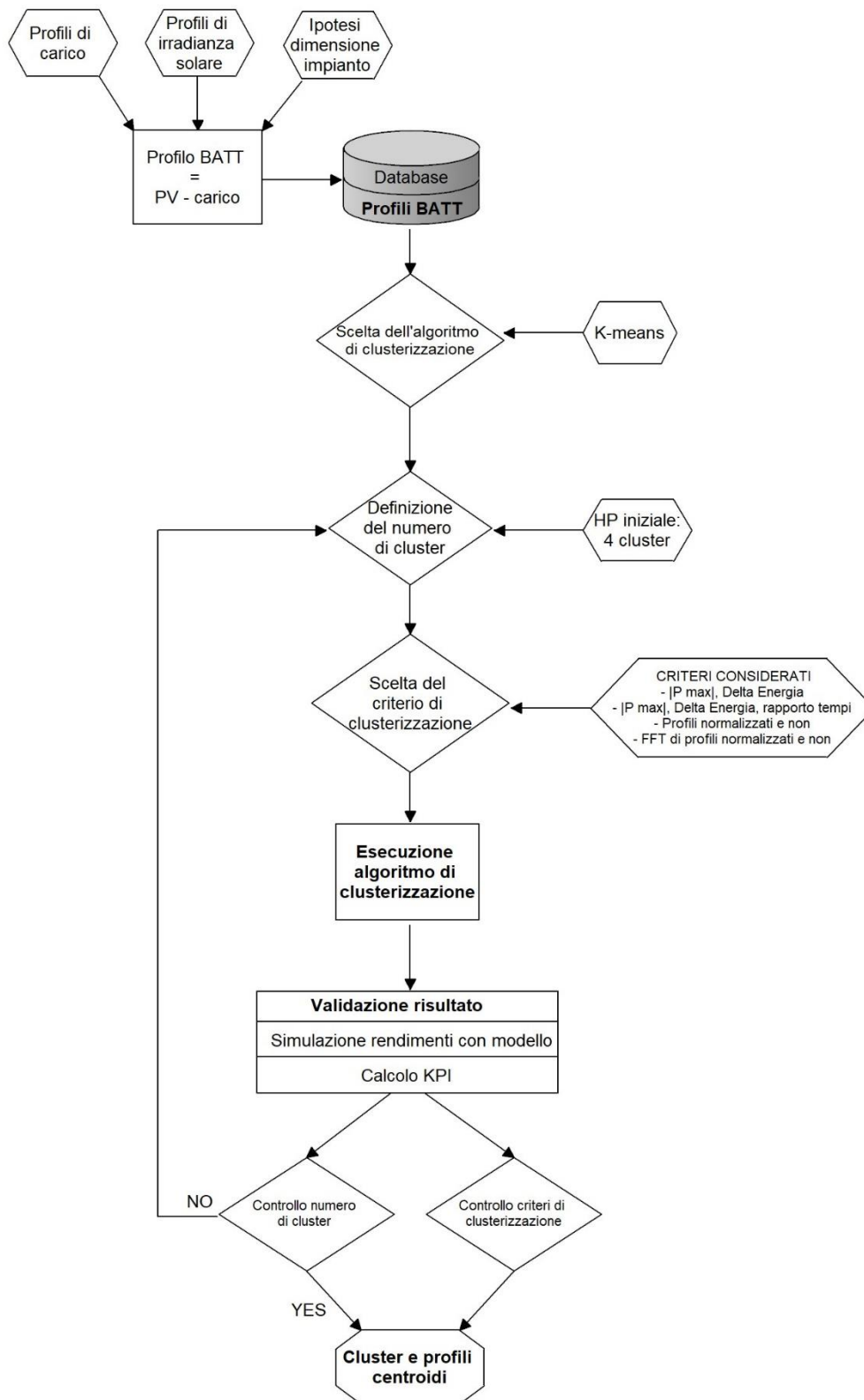


Figura 6.28 Diagramma di flusso – procedura seguita per la clusterizzazione dei profili di batteria e la definizione di profili standard

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

A conclusione di tutta la trattazione si richiamano brevemente le **prospettive di sviluppo** offerte dalla procedura appena costruita. Si ricorda infatti che non sono presenti in letteratura analisi condotte direttamente sui profili di batteria, alle quali sarebbe stato possibile fare riferimento come punto di partenza per poi migliorarne la metodologia delineata. Inevitabilmente sono state allora necessarie da un lato delle ipotesi iniziali molto forti, e dall'altro alcune semplificazioni nel corso della procedura. Si auspica che in futuro la metodologia qui proposta possa essere oggetto di altri studi con lo scopo di limitare l'entità delle ipotesi iniziali e rimuovere le semplificazioni adottate, a vantaggio di una sua maggiore affidabilità. Gli aspetti da sviluppare sono dettagliati qui di seguito. Il primo luogo, è indispensabile rimettere in discussione le ipotesi iniziali sul profilo di produzione fotovoltaica. Nella trattazione è stato scelto uno specifico profilo di irradianza solare e lo si è utilizzato per tutti i giorni dell'anno, variandone poi il contenuto energetico in modo da ottenere dal PV la stessa energia richiesta dal carico su base giornaliera. Se tali ipotesi sono state qui giustificate con la necessità di limitare il numero di variabili aleatorie che influenzano i profili di batteria, ora che una prima procedura è stata sviluppata sarebbe interessante capire come i profili di irradianza e produzione fotovoltaica condizionano i profili di batteria e come possono essere gestiti durante la cluster analysis.

In secondo luogo, si potrebbe rivedere la scelta dell'algoritmo di clusterizzazione. È stato scelto il *k-means* poiché presentato in letteratura come quello più adatto ai profili di carico e dal modus operandi più intuitivo. Potrebbe però essere interessante utilizzare il criterio suggerito nella sezione 5.4.1 al fine di individuare l'algoritmo migliore per questo tipo di analisi: si potrebbe così valutare in modo rigoroso la scelta qui adottata, ed eventualmente ripetere la procedura con il nuovo algoritmo che risulterà essere il migliore.

Infine, una terza prospettiva di sviluppo potrebbe riguardare i criteri di normalizzazione dei profili. Tale aspetto è sicuramente meno rilevante degli altri; si nutre infatti uno certo scetticismo riguardo a un possibile miglioramento su questo fronte, dal momento che l'utilizzo di tutto il profilo nella sua evoluzione temporale non ha condotto a risultati significativi. Ad ogni modo, in letteratura vi sono diversi metodi per effettuare la normalizzazione dei profili, alcuni citati nella sezione 5.6.1; si potrebbe dunque ripetere la procedura condotta in questa analisi includendo anche un criterio che preveda una diversa normalizzazione dei profili.

6. Analisi di profili di batteria per la determinazione di profili standard:  
applicazione della metodologia proposta

## 7 IL SISEMA ZHERO: VALIDAZIONE E CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE

A questo punto si entra nel merito di una parte della trattazione di natura prettamente sperimentale. In questo capitolo infatti saranno descritte tutte le attività di laboratorio condotte sul sistema Zhero, un sistema di accumulo commerciale che integra una batteria sodio-cloruro di nichel.

Il filo logico di questo capitolo parte necessariamente da un'accurata definizione del set up del laboratorio e di tutta la strumentazione. Dopodiché, ricollegandosi alla clusterizzazione dei profili di batteria, si vorrà provare a validare sperimentalmente il risultato ottenuto, in modo da valutare se un sistema di accumulo reale manifesta effettivamente dei diversi rendimenti in funzione dei diversi profili centroidi. In seguito, si entrerà nel merito della caratterizzazione sperimentale del sistema oggetto di analisi, valutando il suo comportamento sia durante prove di autoconsumo, sia durante l'erogazione di servizi alla rete, per poi concludere il capitolo con un'analisi di fattibilità economica.

### 7.1 Strumentazione utilizzata e predisposizione del banco prova

L'obiettivo di questo capitolo è descrivere la configurazione del banco prova utilizzato per testare il sistema Zhero all'interno del laboratorio IoT (Internet of Things) del Politecnico di Milano, con particolare attenzione agli strumenti in dotazione, alle loro specifiche tecniche, e a come le diverse strumentazioni si interfacciano tra loro.

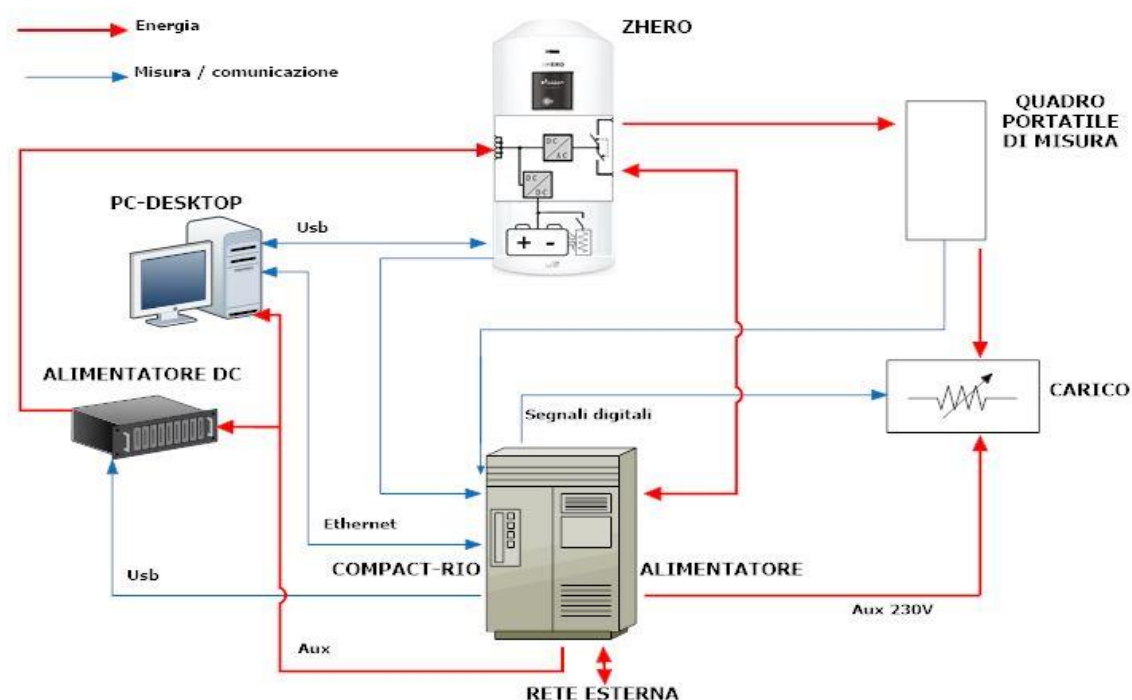


Figura 7.1 Schema concettuale del banco prova

## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

Da una prima osservazione dello schema qui presentato, è possibile constatare come il funzionamento dell'intero banco prova sia basato sull'operatività del CompactRIO controller, un sistema gestito tramite LabView su PC-desktop, che controlla e monitora i componenti acquisendone contestualmente i dati sul funzionamento. In particolare, questo sistema è in grado di modulare la potenza erogata da un alimentatore DC e quella assorbita da un carico resistivo, e monitora tutte le variabili elettriche in uscita dallo Zhero interfacciandosi anche ad un quadro portatile di misura. L'alimentazione è affidata ad un apposito sistema integrato con il CompactRIO nello stesso apparato.

Per quanto concerne invece tutte le grandezze legate allo stato e al funzionamento del sistema Zhero e della batteria FZSONICK, è possibile connettersi via USB direttamente al componente in analisi e salvare i dati acquisiti in tempo reale dal sistema di controllo (per lo Zhero) oppure scaricare i dati salvati in memoria (nel caso della batteria). In entrambi i casi si utilizzano i software forniti dai costruttori, rispettivamente "UNE Zhero Com CPU board 3.12.0.61" e "SMC Monitor 200". Si descrivono ora nel dettaglio tutti i componenti appena introdotti presentandone le specifiche tecniche

### 7.1.1 Alimentatore DC

L'alimentatore in corrente continua EA-PS 8360-30 2U della Elektro-Automatik consente di simulare la produzione di un impianto fotovoltaico ed è collegato quindi allo Zhero tramite l'ingresso dedicato alle stringhe di pannelli fotovoltaici. Può essere controllato direttamente tramite l'interfaccia utente, che consente di impostare manualmente dei valori limite in tensione, corrente e potenza, oppure può essere gestito da remoto tramite il CompactRIO secondo la stessa logica. In quest'ultimo caso il CompactRIO via USB modifica istante per istante il set point di potenza in accordo con il profilo da simulare. L'alimentatore, assorbendo energia dal sistema di alimentazione generale, simulerà così la produzione da fotovoltaico rispettando i tre vincoli imposti. Altri dettagli tecnici sono riportati in Tab. 7.1



Figura 7.2 Alimentatore DC

Input voltage	180 V ÷ 264 V
Frequency	45 Hz ÷ 65 Hz
Power factor correction	> 0,99
Output voltage	0 ÷ 360 V
Stability at 10-90% load	< 0,05 %
Stability at $\pm 10\% \Delta V_{IN}$	< 0,02 %
Ripple	< 100 mV <sub>PP</sub>
Regulation 10-100% load	< 2 ms
OVP adjustment	0 ÷ 396 V
Output current	0 ÷ 30 A
Stability at 0-100% $\Delta V_{OUT}$	< 0,15 %
Stability at $\pm 10\% \Delta V_{IN}$	< 0,05 %
Ripple	< 15 mA <sub>PP</sub>
Output power	0 ÷ 3000 W

Tabella 7.1 Specifiche tecniche alimentatore DC

## 7.1.2 Carico resistivo

Il carico è rappresentato da un sistema di realizzazione IRS – Ingegneria Ricerca Sistemi, costituito da dieci resistori collegati in parallelo e disposti in modo tale che ciascuno di essi abbia un valore di resistenza doppio rispetto a quello che lo precede.

La logica di funzionamento è piuttosto semplice: l’inverter contenuto nello Zhero mantiene la tensione sul carico stabile sui 230 V, dunque considerando l’equazione (7.1) ricavata unendo la definizione di potenza alla legge di Ohm, si deduce che collegando o scollegando opportunamente i resistori è possibile ottenere diversi valori di carico. La tabella 7.2 mostra nel dettaglio i diversi valori di resistenza e, a titolo di esempio, il corrispettivo valore di potenza dissipata nel caso in cui a quel resistore sia applicata una tensione di 230 V.

Il carico è connesso al CompactRIO tramite una linea di comunicazione dedicata (segnali digitali) grazie alla quale istante per istante acquisisce il valore di potenza da dissipare, in accordo con il profilo di carico imposto, e predispone di conseguenza le resistenze interne. Riceve dallo Zhero la potenza da dissipare, dopo che questa è transitata attraverso il quadro portatile di misura, ed è collegato anche all’alimentazione generale per il funzionamento degli ausiliari interni.

$$P = \frac{V^2}{R} \quad (7.1)$$



Figura 7.3 Carico resistivo

N° resistore	Resistenza [Ω]	Potenza [W]
1	21,25	2489,4
2	42,5	1244,7
3	85	622,4
4	174	304,0
5	347	152,4
6	698	75,8
7	1500	35,3
8	3000	17,6
9	6000	8,8
10	11200	4,7

Tabella 7.2 Valori di resistenza e corrispondente potenza dissipata con una tensione di 230 V

## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

### 7.1.3 CompactRio controller

Il National Instruments - CompactRIO 9035 rappresenta lo strumento chiave per lo svolgimento delle prove. Come anticipato in precedenza, questo componente, programmato da un PC-desktop tramite interfaccia LabView e collegamento Ethernet, gestisce la maggior parte dei componenti e acquisisce dati sullo stato degli stessi, sul loro funzionamento, e sulle diverse grandezze scambiate. Complessivamente è dotato di cinque linee di misura per la comunicazione e il controllo dei componenti.

All'inizio di una prova, si caricano da PC gli eventuali profili di carico e di produzione PV e sarà poi il CompactRIO a controllare autonomamente il carico resistivo e il generatore DC per realizzare i profili assegnati. Contemporaneamente acquisirà i dati richiesti (grandezze elettriche scambiate tra la rete e lo Zhero, tra lo Zhero e il carico, tensione alle sbarre dello Zhero) per renderli poi disponibili al termine della prova in formato csv.



Figura 7.4 CompactRio e alimentazione generale

### 7.1.4 Sistema di alimentazione generale

Il quadro generale di alimentazione è fisicamente unito al CompactRIO all'interno dello stesso componente, pur essendo concettualmente ben distinto da quest'ultimo. È costituito da tre uscite trifase e da alcune monofase. Delle trifasi se ne utilizza una sola per consentire gli scambi di energia tra il sistema Zhero e la rete elettrica. Le monofase invece sono utilizzate per alimentare gli ausiliari del carico resistivo e per il funzionamento del PC e dell'alimentatore DC.



## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

### 7.1.5 La batteria FZSoNick

Il sistema Zhero è dotato di una batteria sodio-cloruro di nichel modello 48TL200 di produzione FZSoNick. Essa è chiaramente il componente fondamentale in quanto le sue caratteristiche determinano univocamente la capacità di accumulo di tutto il sistema e le sue prestazioni ne condizionano il comportamento agli effetti esterni. Tuttavia, il modo in cui è realizzato lo Zhero impedisce di condurre prove direttamente su di essa in quanto, dovendo continuamente alimentare i diversi sistemi ausiliari, ha di fatto un carico sempre applicato. Le sue caratteristiche tecniche sono presentate in Tab. 7.3.

Nominal voltage [Vdc]	48
Operating voltage range [Vdc]	42 ÷ 59
Nominal capacity [Ah]	200 at C4 to 42V
Nominal energy [Wh]	9600 at C4 to 42V
Peak discharge current [A]	200
Continuous discharge current [A]	150
DC bus voltage range [Vdc]	53 ÷ 59
Internal low voltage disconnect [Vdc]	40
Power fuse rating [A]	200
Communication port	RS485 / USB / Ethernet / CAN-bus
Alarm dry contact	230 Vac 2A
Length [mm]	496
Width [mm]	558
Height [mm]	320
Weight [kg]	105
Continuous operating Tamb [°C]	-20 ÷ 60
Terminal bolt torque [Nm]	7-8
Terminal bolt size	M8

Tabella 7.3 Specifiche tecniche batteria FZSoNick



Figura 7.5 Batteria FZSoNick installata all'interno del sistema Zhero

## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

### 7.1.6 Il quadro portatile di misura

Il quadro portatile di misura è un sistema di realizzazione IRS – Ingegneria Ricerca Sistemi. La sua funzione è misurare le quantità elettriche scambiate tra il sistema Zhero e il carico sulla linea monofase che li collega. Al suo interno vi sono diversi componenti; tra questi però solo i trasduttori di tensione e corrente sono rilevanti per le prove oggetto della trattazione. Tali prove richiederanno infatti la valutazione della potenza scambiata con la rete di distribuzione. In Tab. 7.4 sono riportate le specifiche tecniche relative al trasduttore di corrente in Fig. 7.6, mentre in Tab. 7.5 vi sono quelle del trasduttore di tensione in Fig. 7.7.



Figura 7.6 Trasduttore di corrente

Model	IT 200-S Ultrastab
Producer	LEM
Primary continuous DC [A]	-200 ÷ 200
Primary nominal rms current [A]	141
Primary current, measuring range [A]	-200 ÷ 200
Measuring resistance [ $\Omega$ ]	0 ÷ 30
Overload capability (pulse of 100ms) [A]	-1000 ÷ 1000
Supply voltage DC [V]	$\pm 14.25 \div \pm 15.75$
Current consumption [mA]	80
Offset stability [ppm/month]	1
Response time to 90% of $I_{nom,RMS}$ [ $\mu s$ ]	1
di/dt accurately followed [A/ $\mu s$ ]	100

Tabella 7.4 Specifiche tecniche trasduttore di corrente



Figura 7.7 Trasduttore di tensione

Model	CV 3-1500
Producer	LEM
Primary nominal RMS voltage [V]	1000
Primary voltage, measuring range [V]	0 ÷ $\pm 1500$
Overall accuracy @ $V_{PRIMARY,NOM}$ , 25°C [%]	$\pm 0,2$
Offset voltage @ $V_{PRIMARY}=0$ , 25°C [mV]	$\pm 5$
Step response time to 90% of $V_{P,Nom}$ [ $\mu s$ ]	0,4
Total primary power loss [W]	2,8
Resistance of primary [ $k\Omega$ ]	360

Tabella 7.5 Specifiche tecniche trasduttore di tensione

### 7.1.7 Il sistema Zhero e il progetto InteGRIDy

Il sistema Zhero è un sistema di accumulo elettrochimico sviluppato e prodotto dalla Une S.r.l. La sua peculiarità sta nell'integrare nello stesso dispositivo una batteria sodio-cloruro di nichel prodotta dalla FZSoNick, insieme a tutti quei componenti che sono necessari per gestire la produzione di impianto fotovoltaico e coordinare contestualmente i flussi di potenza verso l'utente, verso la rete elettrica, oppure verso la batteria stessa.

## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

Il primo aspetto che allora è bene approfondire è quello relativo ai suoi **componenti** [44]. Lo Zhero si compone essenzialmente di tre parti, come si può osservare nella Fig. 7.8-9 tratte dal manuale tecnico. Si completa con alcuni ausiliari di ventilazione, indispensabili per mantenere a una corretta temperatura tutta l'elettronica di potenza installata:

- La parte inferiore è preposta all'alloggiamento di una o due batterie sodio-cloruro di nichel; in particolare il sistema sottoposto a test monta una sola batteria SoNick 48TL200, le cui specifiche tecniche saranno descritte in un apposito paragrafo.
- La parte superiore, nella zona frontale, contiene principalmente i componenti che lavorano in AC. Vi è infatti l'inverter, la morsettiera per realizzare i collegamenti elettrici, la scheda CPU e la centralina di interfaccia con l'utente, in cui sono posti i sezionatori delle diverse linee e il segnale luminoso per gli allarmi.
- Sempre la parte superiore, ma nella zona posteriore, contiene i componenti che afferiscono al mondo DC. Vi sono infatti le schede a cui andranno collegate le stringhe in arrivo dall'impianto fotovoltaico, i sezionatori delle linee DC, il sistema MPPT e le sbarre di potenza a 48V.

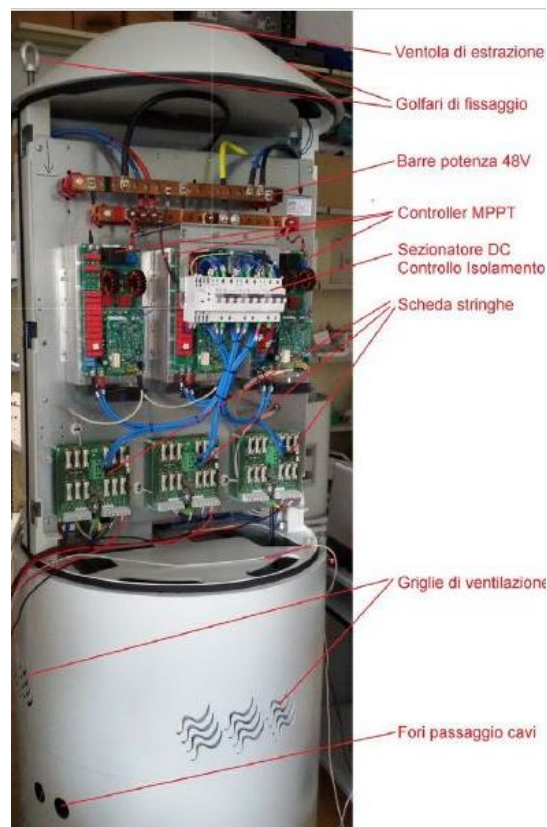


Figura 7.8 Vista lato AC e alloggiamento batterie

Figura 7.9 Vista lato DC



## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

alimentato il carico. Nel secondo caso invece, oltre a quanto appena descritto, è presente anche il collegamento con la rete: lo Zhero potrà allora scambiare energia con la rete a seconda delle necessità proprie e di quelle del carico, e al tempo stesso potrà partecipare ai servizi di rete. In questo caso sarà interessante sia monitorare i flussi di energia sia osservare le possibilità di partecipazione ai servizi di rete, e il conseguente vantaggio che ne deriverebbe in termini economici o di rendimento.



Figura 7.11 Sistema Zhero in laboratorio

Modello	S6230210
T ambiente [°C]	-10 ÷ 40
Conformità	CEI 0-21
Vin DC [V]	80 ÷ 180
Pout mppt [kW]	3,3 ÷ 10
Iin max DC [A]	30 ÷ 90
N° stringhe	< = 18
N° mppt	< = 3
V AC [V]	230
Frequenza [Hz]	50
Pout AC [kW]	6
I max AC [A]	32

Tabella 7.6 Specifiche tecniche sistema Zhero

Considerando ora un **punto di vista commerciale**, lo Zhero si presenta sicuramente come un sistema innovativo nello scenario energetico attuale, caratterizzato da una diffusione sempre crescente di impianti fotovoltaici ma non certo contraddistinto da un egual numero di sistemi di accumulo installati. Qualora le sue prestazioni, la sua affidabilità e il suo costo fossero tali da determinarne un consistente sviluppo sul mercato, rappresenterebbe concettualmente un passo importante nella transizione verso un sistema elettrico dominato da generazione distribuita e produzione da fonti rinnovabili.

Attualmente questo sistema di accumulo è stato sviluppato puntando sostanzialmente su tre punti di forza. In primo luogo, lo Zhero si presenta come un sistema all-in-one, ossia contiene al suo interno tutti i componenti necessari al suo funzionamento senza bisogno di ausiliari esterni, e tutto ciò è integrato con un software appositamente sviluppato per gestire in modo autonomo i flussi energetici. In secondo luogo, contiene al suo interno una batteria sodio-cloruro di nichel, ossia una batteria al sale intrinsecamente sicura e riciclabile così come tutti i componenti del sistema.

In terzo luogo, vi è la logica con cui verrà proposto sul mercato. Attualmente la strategia di gestione dei piccoli impianti fotovoltaici si basa sulla possibilità di fare autoconsumo e immettere in rete quanto prodotto in eccesso, per poi acquistare energia nelle ore notturne o quando la produzione PV non è sufficiente a soddisfare il carico domestico. Con questo criterio però, abbandonata ormai da tempo la logica degli incentivi sull'energia prodotta, la possibilità di coprire il costo di investimento iniziale, e iniziare



## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

quindi a risparmiare, è affidata prevalentemente all'autoconsumo dal momento che vi è un'importante differenza tra il prezzo riconosciuto per l'energia elettrica immessa in rete (variabile in base al meccanismo scelto per la cessione di energia) e quello di acquisto. Con lo Zhero invece, grazie alla sua capacità di immagazzinare e distribuire l'energia prodotta da fotovoltaico (che diviene così dispacciabile), il vantaggio economico si concentra su un taglio radicale della bolletta elettrica: si consuma quanto prodotto dal proprio impianto, riducendo al minimo gli scambi con la rete, che devono comunque essere mantenuti per garantire sempre l'alimentazione dell'utenza a prescindere dalla disponibilità della fonte [7].

Le **prospettive di sviluppo** future sono certamente più ampie e si basano sull'evoluzione verso le smart grid. Nell'ottica di una massiccia diffusione del sistema Zhero, con un certo numero di dispositivi installati all'interno di una stessa area (piccolo comune, quartiere di una città,...) e in presenza di una rete elettrica locale, tutti i dispositivi potrebbero essere messi in comunicazione tra loro sfruttando l'apposito canale dati prima citato, in modo da condividere il surplus energetico prodotto da diversi impianti fotovoltaici e da ridurre ulteriormente (fino ad azzerare) gli scambi di energia con la rete elettrica nazionale: l'area in oggetto diverrebbe così autosufficiente dal punto di vista energetico. Tale scenario di sviluppo è sicuramente complesso, mette in gioco molte variabili, molte problematiche e molti attori, tra cui la legislazione sulle reti elettriche di distribuzione, pertanto non può essere certo perseguito in uno scenario di breve termine. La diffusione del sistema Zhero rappresenterebbe però un passo fondamentale nella strada verso tale prospettiva [7].



*Figura 7.12 Smart grid con condivisione dei surplus energetici accumulati nei sistemi Zhero installati in diverse abitazioni*

Tra le altre attività, in tempi recenti la realizzazione del sistema Zhero e la sua commercializzazione hanno assunto un ruolo preciso all'interno di un progetto strutturato a livello europeo, quale è appunto il **progetto inteGRIDy**. Questo vede infatti coinvolti diversi attori tra università e aziende del settore energia (tra cui Une S.r.l. e Politecnico di Milano), è in parte finanziato dal progetto di ricerca e innovazione "European Union's Horizon 2020" ed è volto al perseguimento di diversi obiettivi, racchiusi all'interno della sua descrizione: "Integrated smart grid cross-functional solutions for optimized

synergetic energy distribution, utilization storage technologies”. Nel dettaglio il progetto si focalizza su quattro ambiti principali:

- *Demand Response*. Include l'efficienza energetica e il controllo della domanda di energia con finalità di time shifting e peak shaving, realizzato sfruttando il nuovo ruolo attivo rivestito dagli utenti finali.
- *Smartering the distribution grid*. Punta all'integrazione degli impianti da fonte rinnovabile, che per caratteristica della fonte hanno una configurazione distribuita, all'interno della rete elettrica tramite una loro aggregazione all'interno di grandi impianti di produzione virtuali.
- *Energy storage*. Tale ambito si occupa chiaramente dell'accumulo di energia, da realizzarsi tramite batterie o tramite conversione in altri vettori energetici, come ad esempio l'idrogeno.
- *Electric vehicle integration*. Si occupa di gestire i flussi di energia tra i veicoli elettrici e la rete, gestendone opportunamente le diverse flotte in modo da avere dei processi di carica intelligenti.



Figura 7.13 Logo inteGRIDy

Il sistema Zhero è stato sviluppato con riferimento ai primi tre ambiti del progetto. La sua prima installazione sul campo è fissata per la fine dell'anno 2018 nella città di San Severino Marche (MC), dove poco meno di una decina di dispositivi saranno installati presso le abitazioni di utenti che già possiedono un impianto fotovoltaico. La scelta della località non è affatto casuale, ma ha preso in considerazione un comune italiano in cui anno dopo anno la produzione fotovoltaica ha visto un significativo incremento, con tutte le problematiche di gestione della rete elettrica che questo può comportare per il distributore locale (ASSEM S.p.A.).

L'installazione dei sistemi Zhero fa parte di un progetto pilota in cui il distributore svolge attività di monitoraggio della rete e di previsione dei flussi di potenza in modo da poter pianificare in anticipo l'ottimale topologia della rete. Nel caso in questione il distributore gestirà direttamente il controllo degli Zhero da remoto, in modo tale da massimizzare l'affidabilità e l'efficienza della propria rete. Contestualmente proverebbe anche a fornire servizi di rete tramite una gestione aggregata di piccoli impianti fotovoltaici. Il vantaggio per l'utente finale, a cui lo Zhero è ceduto gratuitamente, starebbe nella possibilità di incrementare il proprio autoconsumo, riducendo gli scambi con la rete e quindi la spesa per la bolletta elettrica [45].

## 7.2 Metodologia utilizzata per la validazione sperimentale

Nella sezione precedente sono state descritte tutte le specifiche tecniche della strumentazione in dotazione e del sistema di accumulo sottoposto a test. Contestualmente si è cercato di fornire una visione più ampia facendo riferimento al progetto InteGRiDy, che coinvolge lo sviluppo e l'installazione in campo del sistema Zhero.

A questo punto è possibile entrare nel merito della parte sperimentale partendo dalla validazione, per mezzo di prove di laboratorio, del risultato ottenuto nel capitolo 6. Si vuole quindi capire se i profili titolati ad essere i centroidi dei quattro cluster, nel momento in cui sono applicati a un sistema di accumulo reale, siano realmente caratterizzati da un differente rendimento di batteria.

Prima di presentare i risultati, è indispensabile delineare la ipotesi e la metodologia operativa, così da spiegare come sono stati ottenuti i diversi esiti sperimentali.

### 7.2.1 Profili teorici e sistema di accumulo reale: autoconsumi e taglia

Il primo aspetto metodologico da dettagliare in ordine di importanza è sicuramente il passaggio dai profili ideali considerati nel corso della clusterizzazione ai profili reali che dovranno essere realizzati sul sistema Zhero. È bene ricordare che nella costruzione dei profili si era ipotizzato di trascurare dissipazioni ed eventuali autoconsumi della batteria. Inoltre, nella simulazione numerica dei profili necessaria al calcolo del loro rendimento, si è utilizzato un modello sviluppato per una specifica batteria da 23,5 kWh. Il sistema di cui si dispone in laboratorio ha invece una capacità nominale di 9,6 kWh. La taglia è dunque differente e non si può certo pensare che lo stesso profilo di potenza abbia il medesimo impatto su due sistemi così diversi.

In considerazione di ciò, si rendono necessarie due elaborazioni preliminari sui profili finora considerati: la prima considera la differenza tra la capacità dello Zhero e quella della batteria utilizzata per sviluppare il modello, la seconda tiene conto del fatto che un sistema reale manifesta degli autoconsumi, i quali alterano il profilo e possono condizionare il rendimento.

In primo luogo, è stata considerata la **differente taglia** dei due sistemi considerati. Posto che uno stesso profilo di batteria non può manifestare il medesimo rendimento su due apparati molto diversi, la soluzione più ovvia per rendere il suo effetto confrontabile nei due casi, è stata di quella di modificare il profilo stesso in base al fattore di scala  $f$  definito in (7.2). Così facendo si sono alterati i valori assoluti di potenza, ma è stato mantenuto sia l'andamento temporale del profilo sia il rapporto che la caratteristica variazione di contenuto energetico della batteria, una delle variabili chiave della cluster analysis, ha rispetto alla massima capacità del sistema.

$$f = \frac{\text{Capacità}_{\text{batteria modello}}}{\text{Capacità}_{\text{Zhero}}} = 2,45 \quad (7.2)$$

In secondo luogo, è stato necessario considerare che su un sistema reale sono sempre presenti degli **autoconsumi**. Sullo Zhero in particolare tale problematica è più accentuata



dal momento che il dispositivo integra la batteria sodio-cloruro di nichel, i sistemi MPPT, l'inverter e tutti gli apparati ausiliari su cui sono implementate le logiche di controllo. Dunque, gli autoconsumi avranno di per sé una certa entità considerando anche che la batteria lavora ad alta temperatura, inoltre, considerando che la capacità del sistema non è grande, in termini relativi il loro effetto sarà amplificato.

Prima di esprimere altre considerazioni a riguardo, sono stati quantificati gli autoconsumi dello Zhero servendosi di una prova di autoscarica, della quale per ragioni di sintesi non si riportano i risultati. In questa prova, partendo con SoC 80%, si è lasciato evolvere il sistema mantenuto disconnesso dalla rete esterna e dal carico. Dopo ventiquattro ore, il SoC si era portato a 40%, dunque in considerazione della capacità del sistema si sono quantificati 200W di autoconsumi costanti. È bene precisare che tale valore è una stima degli autoconsumi e non una loro misura, dal momento che non sono monitorabili tramite il software fornito dal costruttore.

Sulla base di questa considerazione si è scelto di modificare il profilo già scalato del fattore di taglia nel seguente modo: ricordando che il profilo di batteria è frutto di un bilancio tra carico e produzione PV, i valori di quest'ultima sono stati modificati proporzionalmente per fare in modo che, dal punto di vista teorico, il nuovo PV fornisca su base giornaliera la stessa energia richiesta dal carico e dagli autoconsumi.

Poiché tale modifica può essere ritenuta suscettibile di aver alterato il profilo originale, è bene precisare che senza di essa l'evoluzione effettiva del SoC durante l'esecuzione del profilo sarebbe stata completamente diversa da quella simulata con il modello: l'elevato impatto degli autoconsumi le avrebbe conferito infatti un andamento complessivamente decrescente, con marcati scostamenti tra lo stato di carica di inizio e fine profilo. Si ricorda infatti che i valori di SoC sono proprio quelli da cui dipende univocamente il valore degli elementi circuitali presenti nel modello. In altri termini, un'evoluzione di SoC troppo diversa tra profilo reale e quello simulato avrebbe portato a confrontare due risultati di fatto inconsistenti.

A conclusione di questa prima considerazione metodologica, si riportano in Fig. 7.14 i quattro profili centroidi nel corso delle loro modifiche appena descritte. A partire da questo momento, il termine "profili di batteria", se non diversamente specificato, farà riferimento ai profili risultanti da queste elaborazioni. Il loro numero mantiene chiaramente la corrispondenza con i cluster del capitolo precedente

## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

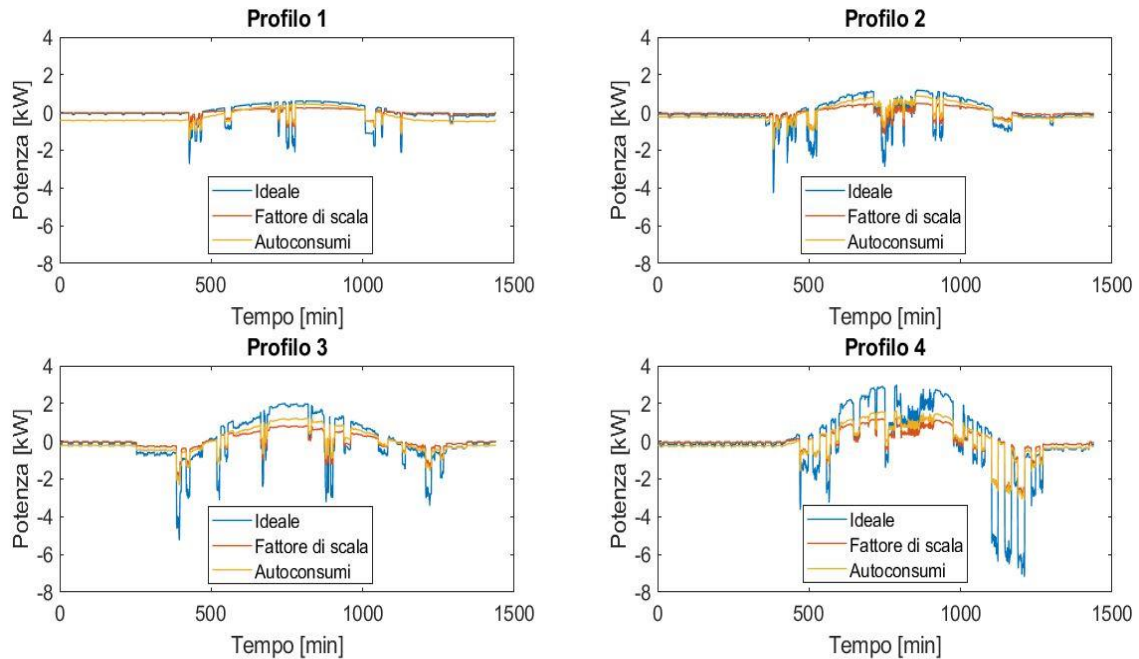


Figura 7.14 Profili di batteria preparati per l'analisi sperimentale

### 7.2.2 Considerazioni sul SoC iniziale

Il secondo aspetto concernente la metodologia utilizzata riguarda la scelta del SoC iniziale, ossia lo stato di carica del sistema Zhero all'inizio dell'esecuzione di ogni profilo. Innanzi tutto è bene ricordare che, sulla base delle considerazioni emerse con l'utilizzo del modello di batteria, il SoC iniziale influenza il rendimento; pertanto è indispensabile identificare uno specifico valore che sarà il medesimo per tutte e quattro le prove in oggetto. Oltre a questo aspetto, bisogna identificare il valore numerico del SoC sulla base dei seguenti accorgimenti:

- Evitare di saturare sui limiti associati alla massima e alla minima capacità dello Zhero. In particolare, per quanto concerne il limite minimo, il costruttore raccomanda di non portare il sistema a SoC inferiore al 10%.
- Considerare che la batteria integrata nello Zhero presenta delle curve caratteristiche che quantificano, al variare del SoC, la massima potenza erogabile in scarica e la massima assorbibile in carica.

Quindi non è sufficiente limitarsi a considerare il vincolo sulla capacità fisica del sistema, ma bisogna anche considerare questi limiti sulla potenza scambiabile: per elevati valori di SoC la batteria non accetta potenze elevate in carica e di conseguenza parzializzerebbe la produzione PV, e analogamente per bassi SoC è vincolata sull'erogazione, dunque dovrebbe parzializzare l'alimentazione del carico.

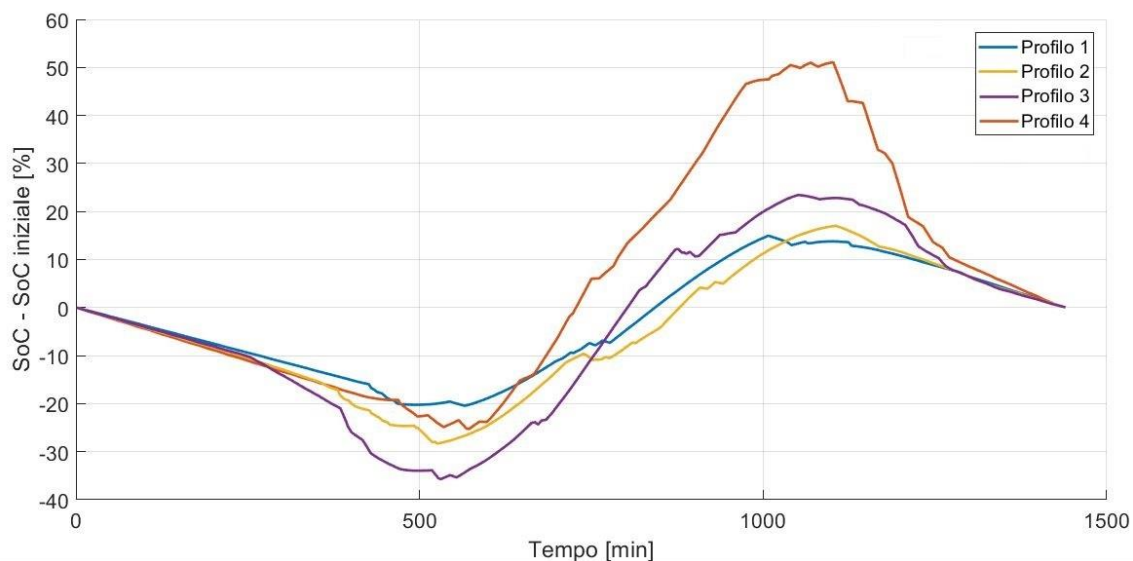


Figura 7.15 Andamento teorico del SoC durante la prova per i quattro profili di batteria

Un'ultima considerazione in merito alla scelta di tale valore suggerirebbe di tenersi prossimi al 60% scelto nelle simulazioni con il modello per rimanere nel campo di maggiore accuratezza, cercando comunque di limitare le eventuali parzializzazioni che si avrebbero sui profili con elevata potenza di fotovoltaico. Ad ogni modo, da una prima osservazione dell'immagine in Fig. 7.15, che mostra l'andamento del SoC teorico ricavato in base ai profili di potenza da testare, si nota che il range impegnato è abbastanza ampio, dunque sarà molto difficile riuscire a rispettare i due vincoli prima descritti mantenendosi al tempo stesso prossimi alle condizioni iniziali utilizzate nel modello. Sulla base di tutte queste considerazioni si sceglie di utilizzare come SoC iniziale un valore pari al 53% circa.

### 7.2.3 Procedura di prova

Prima di descrivere nel dettaglio la procedura di prova, una precisazione deve essere fatta in merito all'esecuzione dei profili di batteria. Disponendo di un sistema integrato e non potendo di conseguenza utilizzare la sola batteria, il singolo profilo da testare dovrà essere realizzato di fatto a partire dal profilo di carico e da quello di produzione PV che si sono utilizzati per la sua costruzione. Il profilo di batteria effettivo si ricava solo a posteriori dalle misure dello Zhero; tutte le considerazioni espresse inizialmente in merito alla metodologia erano infatti mirate a mantenere una certa coerenza tra i profili elaborati nella cluster analysis e quelli misurati sperimentalmente.

Sulla base di tutte le precedenti considerazioni, è ora possibile delineare la procedura che è stata utilizzata per condurre le prove sperimentali.

1. Portare lo Zhero al SoC identificato come valore iniziale nella sezione 7.2.2
2. Collegare gli ausiliari del carico alla linea dedicata nel sistema di alimentazione generale (Aux 230 V) e chiudere il sezionatore del carico sul pannello di controllo frontale dello Zhero

## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

3. Avviare l'alimentatore DC impostando i limiti in tensione e corrente massima compatibilmente con la portata delle stringhe in ingresso al sistema MPPT
4. Avviare l'acquisizione e il salvataggio dei dati dallo Zhero via USB tramite il software fornito dal costruttore
5. Impostare i parametri da acquisire tramite CompactRio (linea carico e linea rete esterna), caricare i profili di carico e di produzione PV
6. Avviare la prova da CompactRio
7. Al termine del profilo eseguire una carica da rete a potenza opportunamente scelta (in accordo a criteri che saranno spiegati nel prossimo paragrafo) fino al raggiungimento del SoC iniziale.

### 7.2.4 Calcolo del rendimento

Definite tutte le considerazioni preliminari allo svolgimento della prova e definita la procedura prevista per la sua esecuzione, una volta ottenuti i risultati è possibile calcolare il rendimento che ha caratterizzato la batteria con i diversi profili.

Prima ancora di definire il rendimento che sarà utilizzato nel seguito della trattazione, è bene considerare fin da subito che i valori che si otterranno non sono direttamente confrontabili con quelli calcolati dal profilo simulato, né dal punto di vista numerico né da quello concettuale. L'obiettivo infatti è solo trovare conferma che tra i quattro rendimenti sia rispettato quell'ordine risultato dalla clusterizzazione, senza alcuna pretesa in merito al loro valore assoluto. Il rendimento calcolato a partire dai profili simulati è un rendimento puramente elettrochimico, e considera esclusivamente una batteria intesa come dispositivo a sé stante, del quale è possibile valutare tensione e corrente ai suoi capi. Il sistema presente in laboratorio invece integra una batteria, ma non è costituito solo da quest'ultima. Sono anche presenti i sistemi MPPT, l'inverter e gli ausiliari che implementano le logiche di controllo e gestione dell'intero sistema e dei vari scambi energetici: ogni singolo componente avrà degli autoconsumi propri e delle perdite a seconda della propria efficienza. Per quanto necessario, sarebbe inutile valutare il rendimento sulle grandezze elettriche scambiate dalla sola batteria dal momento che quest'ultima deve sempre alimentare gli ausiliari. Nella pratica allora si cerca di ricondursi a un ipotetico rendimento di batteria, valutando le quantità scambiate dall'intero sistema di accumulo con l'esterno, in accordo con la definizione (7.3).

$$\eta = \frac{E_{carico} + E_{autoconsumi}}{E_{PV} + E_{rete}} \quad \text{con } \Delta SoC = 0 \quad (7.3)$$

- $E_{carico}$  rappresenta chiaramente l'energia erogata dallo Zhero al carico. Il suo calcolo si basa su dati acquisiti dal CompactRio per mezzo del quadro portatile di misura.
- $E_{PV}$  è concettualmente l'energia in arrivo dall'impianto fotovoltaico, simulato in questo caso con l'alimentatore DC. Per quanto riguarda il suo calcolo, non si è in grado di quantificare effettivamente la potenza erogata dall'alimentatore e quindi in ingresso allo Zhero. Non volendo ricorrere al profilo teorico imposto dal

CompactRio in quanto si imputerebbero allo Zhero eventuali inefficienze non di sua competenza, si preferisce utilizzare le misure acquisite dallo stesso Zhero, benché queste valutino la potenza in ingresso al netto dei consumi del sistema MPPT. Si è consapevoli che questo comporterà una sovrastima del rendimento, tuttavia considerando che tali consumi sono proporzionali alla potenza in arrivo, si assume che su base percentuale tale sovrastima sia di pari entità nei diversi profili: non essendo interessati al valore assoluto ma ad un confronto tra i rendimenti tale approssimazione appare lecita.

- $E_{rete}$  è l'energia scambiata con la rete di distribuzione. Il suo valore è quantificato sulla base delle misure acquisite internamente allo Zhero.
- $E_{autoconsumi}$  è l'energia richiesta per il funzionamento dello Zhero per tutta la durata della prova. Il suo valore è quantificato come descritto nella sezione 7.2.1 in 200 W costanti. Si precisa che l'autoconsumo proprio del sistema in tale definizione è di fatto comparato ad un effetto utile, insieme all'energia erogata al carico, per il fatto che essendo un valore costante avrebbe altrimenti un peso diverso sul rendimento di batteria a seconda delle caratteristiche energetiche del singolo profilo. L'obiettivo dell'analisi sperimentale invece è proprio valutare l'impatto delle sole caratteristiche del profilo, svincolando per quanto possibile il rendimento da aspetti che hanno un peso diverso nei vari casi.

Tale definizione richiede esplicitamente che il SoC di inizio e fine prova sia il medesimo. Considerare nella definizione anche la variazione del SoC avrebbe altrimenti comportato una complicazione aggiuntiva legata al dover quantificare l'efficienza con cui è stato prodotto il contenuto energetico preesistente nel sistema. I profili in analisi solo idealmente riuscirebbero a soddisfare tale richiesta; al termine della prova si ha invece un SoC inferiore a quello di partenza, pertanto è necessario scegliere una procedura per il ripristino del valore iniziale: concluso un profilo si sceglie di eseguire una carica da rete di potenza pari a quel valore che si mantiene per la metà del tempo in cui la batteria si trova in un regime di carica.

### 7.3 Risultati

Descritte dettagliatamente tutte le scelte effettuate a livello metodologico e definita la procedura di prova che è stata utilizzata per l'esecuzione delle prove, è ora possibile presentare i risultati ottenuti per i quattro profili individuati come centroidi di cluster dall'analisi condotta nel capitolo precedente. Si ricorda che, essendo lo Zhero un sistema che integra al suo interno molti apparati tra cui una batteria sodio-cloruro di nichel, si utilizzerà un approccio di presentazione dei risultati prevalentemente basato sulle quantità elettriche scambiate dal sistema con l'esterno.

## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

### 7.3.1 Profilo 1

In Fig. 7.16-17 sono riportati i risultati del primo profilo in termini di potenze scambiate dal sistema, SoC e temperatura della batteria. Questo profilo rientra nella modalità “Energy saving” ed è sicuramente il più regolare tra i quattro sottoposti a test. Il SoC si è infatti sempre mantenuto ben lontano dai limiti descritti in precedenza.

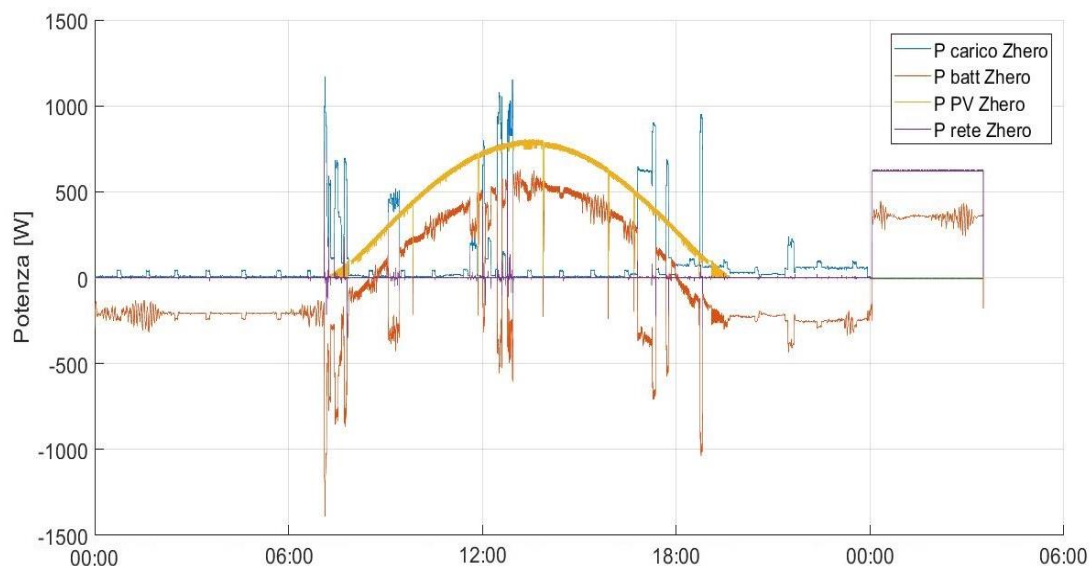


Figura 7.16 Potenze scambiate dal sistema Zhero durante la prova del profilo 2

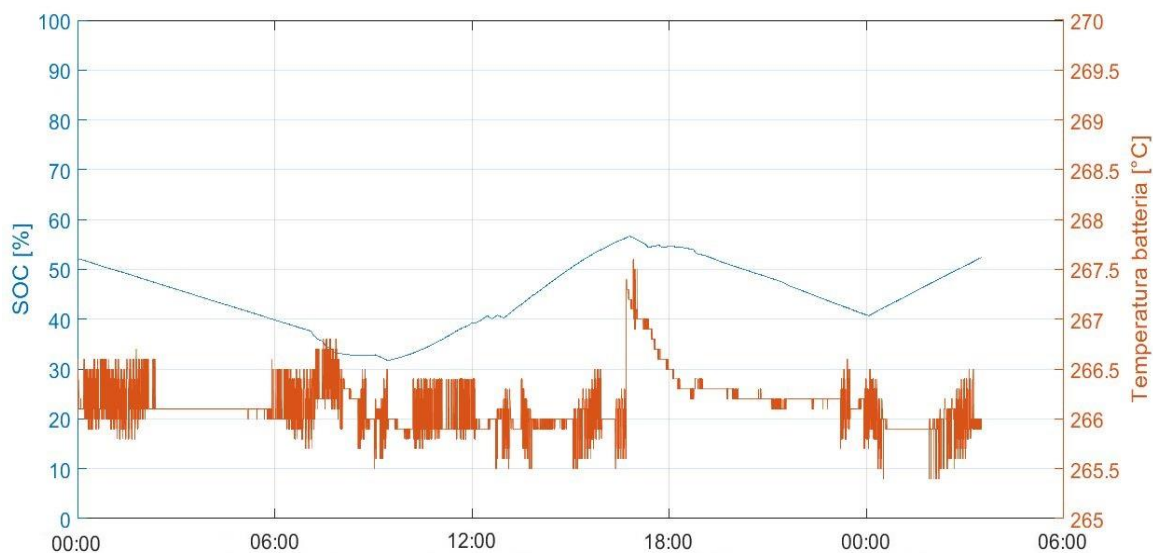


Figura 7.17 Andamento di SoC e temperatura di batteria durante la prova del profilo 2

$P_{\max}$ [W]	$P_{\text{med}}$ [W]	$E_{\text{giornaliera}}$ [kWh]
1200	70	1,94

Tabella 7.7 Valori caratteristici del profilo di carico – Profilo 2

## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

### 7.3.2 Profilo 2

Anche per il secondo profilo in Fig. 7.18-19 si presentano i risultati in termini di potenze scambiate dal sistema, SoC e temperatura della batteria. Analogamente a prima, non è stata effettuata alcuna parzializzazione, in considerazione del fatto che le quantità energetiche in gioco sono contenute e dunque non si è violato nessun vincolo sul funzionamento della batteria. Anche questo profilo infatti appartiene alla modalità “Energy saving”.

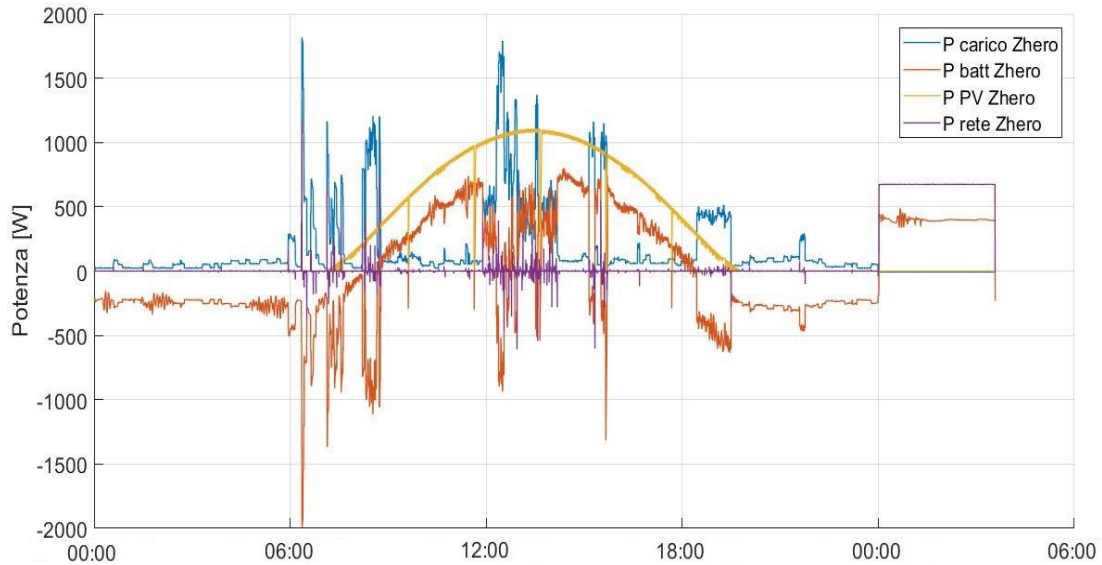


Figura 7.18 Potenze scambiate dal sistema Zhero durante la prova del profilo 4

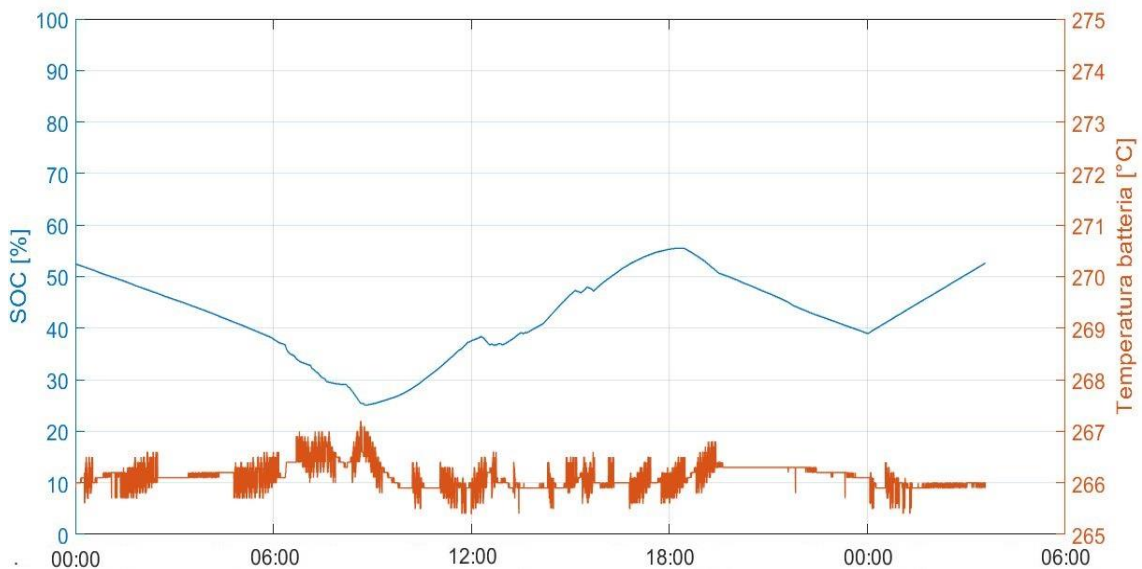


Figura 7.19 Andamento di SoC e temperatura di batteria durante la prova del profilo 4

$P_{\max}$ [W]	$P_{\text{med}}$ [W]	$E_{\text{giornaliera}}$ [kWh]
1800	170	4,55

Tabella 7.8 Valori caratteristici del profilo di carico – Profilo 4



## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

### 7.3.3 Profilo 3

In Fig. 7.20-21 sono presentati i risultati della prova condotta sul terzo profilo seguendo il medesimo approccio di presentazione utilizzato per i profili precedenti. Tale prova ha avuto in oggetto un profilo di carico generato in modalità “Energy intensive”, dunque si è avuto un utilizzo abbastanza sostenuto della batteria, coerentemente con le abitudini di consumo che caratterizzano questa modalità. Si osserva che il SoC raggiunge un valore piuttosto basso, ma lascia tranquillamente un margine di sicurezza rispetto al valore minimo imposto dal costruttore. Non si verificano dunque cariche da rete né tantomeno parzializzazioni del carico.

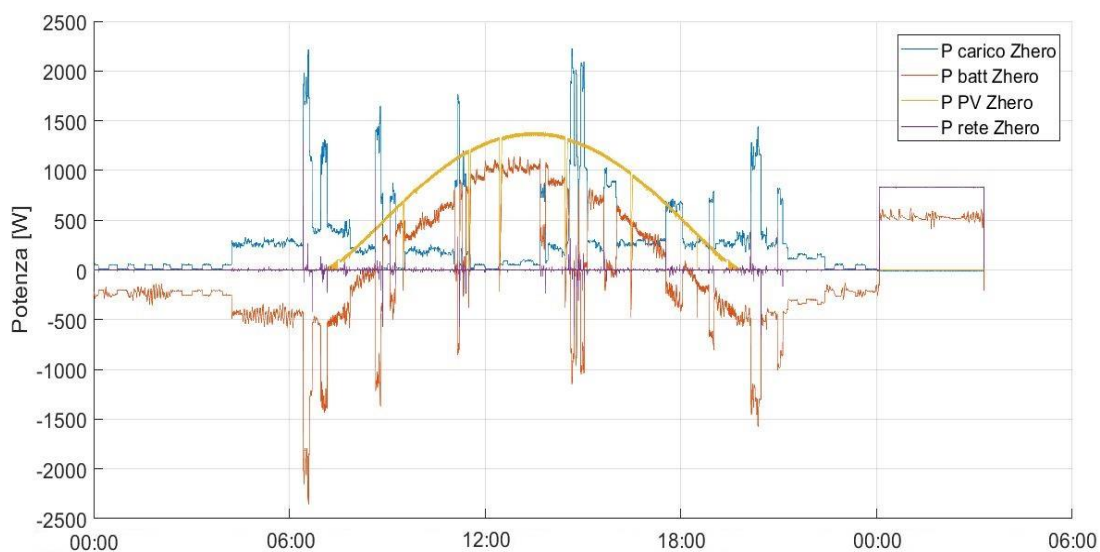


Figura 7.20 Potenze scambiate dal sistema Zhero durante la prova del profilo 1

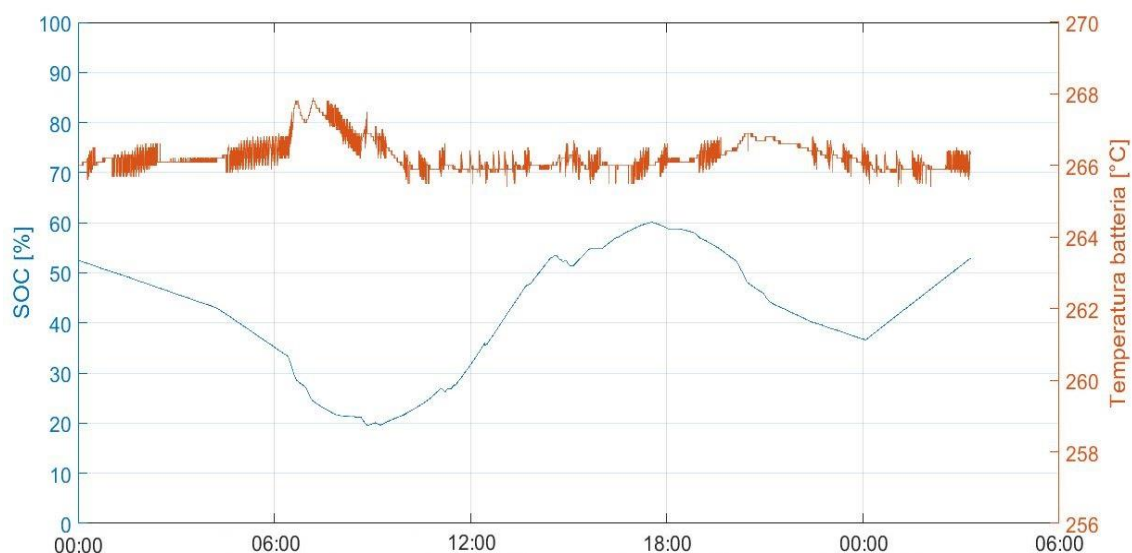


Figura 7.21 Andamento di SoC e temperatura di batteria durante la prova del profilo 1

$P_{\max}$ [W]	$P_{\text{med}}$ [W]	$E_{\text{giornaliera}}$ [kWh]
2200	250	6,85

Tabella 7.9 Valori caratteristici del profilo di carico – Profilo 1



7.3.4 Profilo 4

In Fig. 7.22-23 sono mostrati i risultati della prova condotta sul quarto profilo. Un aspetto che è bene evidenziare è che tale profilo, come si può dedurre dalla Fig. 7.15, era il più complesso in termini di escursioni di SoC. Infatti, dal risultato si osserva come vi sia stata una notevole parzializzazione di produzione fotovoltaica, che in quegli istanti superava la massima potenza in carica ammissibile dalla batteria in considerazione del suo SoC. Tale problema non poteva certo essere evitato in considerazione dei vincoli descritti nella sezione 7.2.2. È bene precisare che ovviamente tale prova ha avuto origine da un profilo di carico generato in modalità “Energy intensive”.

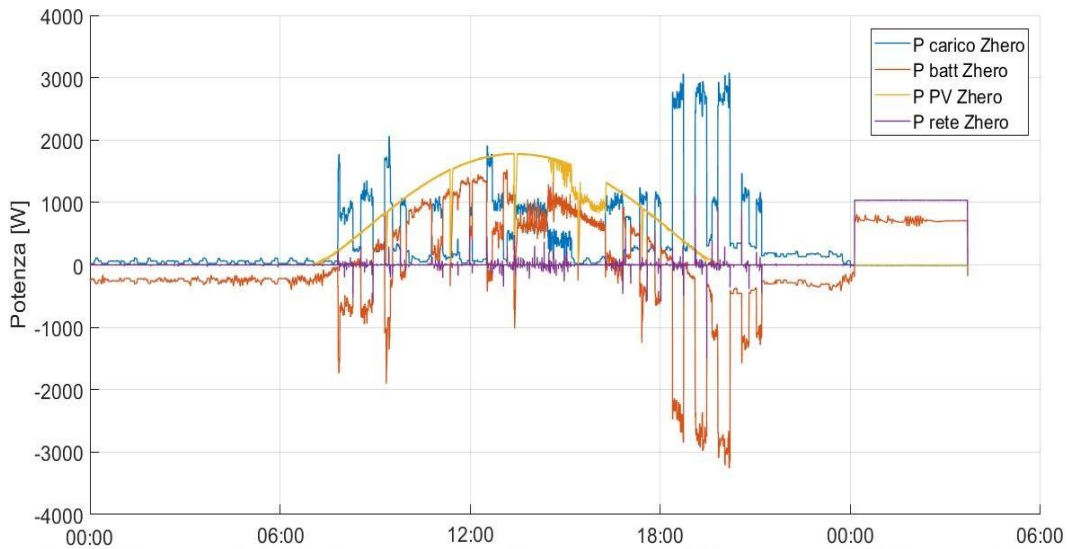


Figura 7.22 Potenze scambiate dal sistema Zhero durante la prova del profilo 3

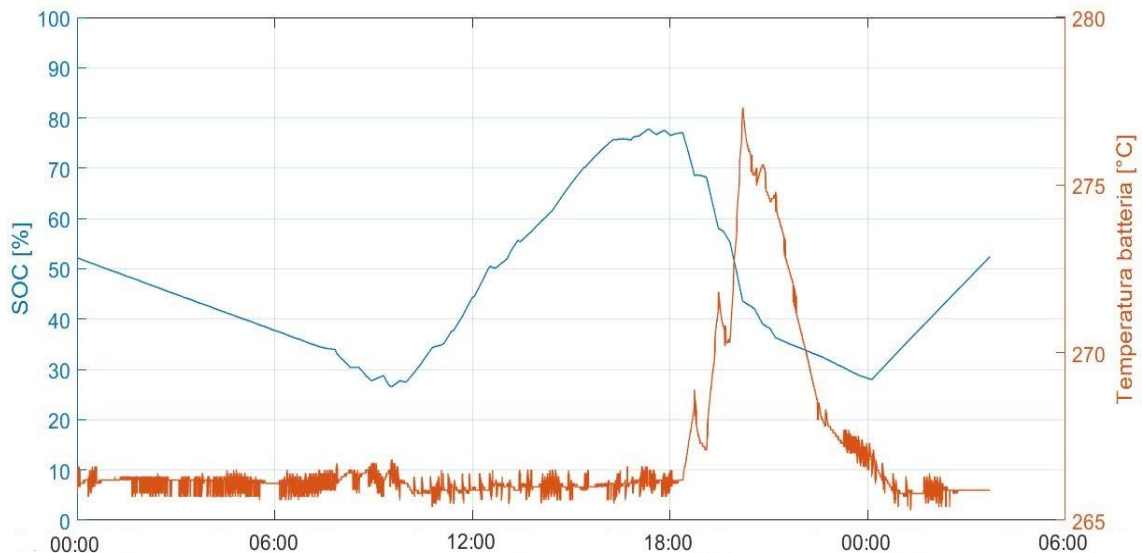


Figura 7.23 Andamento di SoC e temperatura di batteria durante la prova del profilo 3

$P_{max}$ [W]	$P_{med}$ [W]	$E_{giornaliera}$ [kWh]
3100	370	10,36

Tabella 7.10 Valori caratteristici del profilo di carico – Profilo 3

#### 7.4 Validazione sperimentale della cluster analysis

Una volta ottenuti i risultati sperimentali e calcolati i rendimenti in accordo con la definizione (7.3), è possibile procedere a validare sperimentalmente il risultato della cluster analysis. Per fare ciò è necessario mettere a confronto, per ogni singolo profilo identificato come centroide, il rendimento ricavato a partire dai dati sperimentali con quello calcolato sulle simulazioni prodotte dal modello: se è rispettata la relazione che sussiste tra i rendimenti elettrochimici, allora è possibile trarre delle conclusioni in merito alla coerenza tra i risultati teorici e quelli sperimentali. Il raffronto non ha affatto un esito scontato dal momento che in un sistema di accumulo reale sussistono diversi fattori che concorrono a determinare il rendimento, e che quindi potrebbero alterare la dipendenza di quest'ultimo dal profilo effettivo. Proprio per questo si sono rese indispensabili una serie di considerazioni preliminari sul come modificare il profilo ideale per adattarlo ad una prova sperimentale e su come calcolare il rendimento, al fine di escludere o minimizzare tutti questi elementi di disturbo.

In considerazione di tutto ciò, per ogni profilo si mettono a confronto in Tab. 7.7 e in Fig. 7.24 il rendimento elettrochimico derivato dal modello con quello ricavato dai risultati sperimentali.

	Rendimento elettrochimico	Rendimento sperimentale
Profilo 1	98,5 %	95,4 %
Profilo 2	97,9 %	94,9 %
Profilo 3	96,7 %	94,5 %
Profilo 4	95,4 %	93,7 %

Tabella 7.7 Confronto tra rendimento elettrochimico e rendimento sperimentale dei profili centroidi

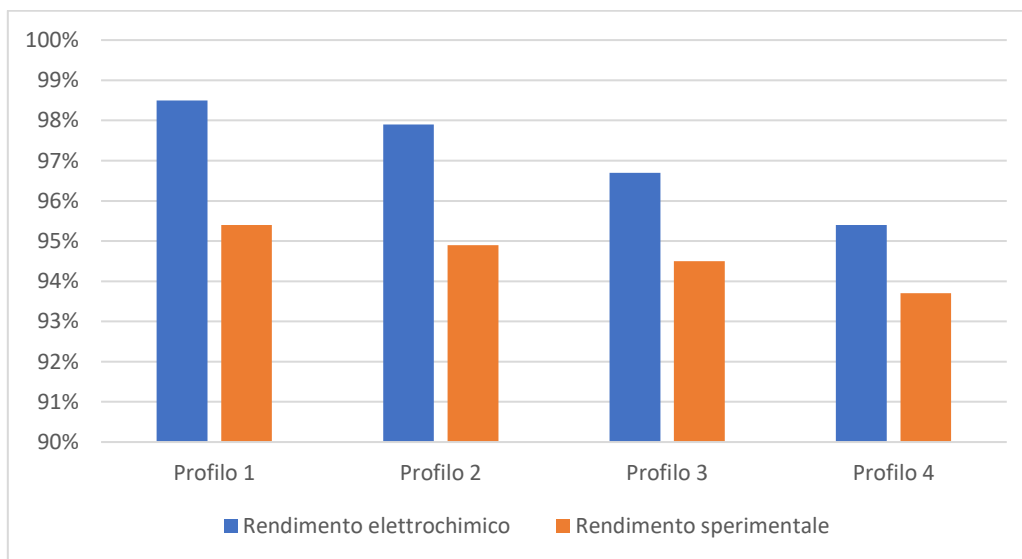


Figura 7.24 Confronto grafico tra rendimento elettrochimico e rendimento sperimentale dei profili centroidi

Da una visione complessiva emerge come il trend definito dalla cluster analysis sia globalmente rispettato, dunque le prove sperimentali hanno dato conferma del risultato teorico ottenuto. Tuttavia, bisogna comunque ammettere che la differenza tra i rendimenti sperimentali non è tale da conferire un notevole margine di sicurezza al processo di validazione. D'altro canto, nemmeno i rendimenti elettrochimici manifestavano tra loro delle distinzioni marcate, dunque a livello sperimentale, con tutti i fattori di incertezza che possono condizionare la prova, è anche ragionevole che la differenza teorica abbia subito una riduzione.

Si è pertanto confidenti dell'esito positivo del processo di validazione, così da dare conferma, anche a livello sperimentale, al risultato individuato dalla cluster analysis: i profili selezionati come centroidi, sono effettivamente caratterizzati da diversi valori del rendimento di batteria.

### 7.5 Caratterizzazione sperimentale del sistema Zhero in autoconsumo

Le prove appositamente condotte nella sezione precedente per validare sperimentalmente il risultato della cluster analysis hanno in pratica utilizzato il sistema Zhero per scopi di massimizzazione dell'autoconsumo, ossia per incrementare la frazione di energia prodotta da un impianto fotovoltaico e autoconsumata in loco dall'utente domestico. Disponendo dei risultati di tali prove, è a questo punto interessante provare a caratterizzare lo stesso Zhero, così da valutare il suo comportamento sia da un punto di vista dell'efficienza sia da un punto di vista economico. Trattandosi infatti di un sistema di introduzione sul mercato relativamente recente, è interessante studiare il suo funzionamento in una reale applicazione sul campo, facilmente simulabile con la strumentazione in dotazione all'interno del laboratorio. Peraltro, in considerazione dell'analisi appena condotta, si dispone dei profili di batteria necessari a simulare i comportamenti più tipici di tutte le famiglie domestiche, dunque vi sono tutti gli strumenti necessari per condurre una buona caratterizzazione sperimentale.

#### 7.5.1 Il rendimento del sistema Zhero

La caratterizzazione sperimentale dello Zhero deve partire analizzando attentamente le sue prestazioni in termini di efficienza.

A tal proposito però non è possibile utilizzare la definizione di rendimento a cui si è fatto riferimento per la validazione della cluster analysis: considerare gli autoconsumi propri del sistema al pari di un effetto utile è errato e porterebbe a risultati ben distinti dalle reali prestazioni del sistema. Pertanto, bisogna modificare la definizione precedentemente adottata al fine di quantificare il rendimento dell'intero sistema di accumulo. Si ottiene così la formula (7.4).

$$\eta = \frac{E_{carico}}{E_{PV} + E_{rete}} \quad \text{con } \Delta SoC = 0 \quad (7.4)$$

## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

Tale definizione di rendimento differisce dalla (7.3) in quanto è priva del termine di autoconsumo, che non è certo un effetto utile bensì un fattore indesiderato che tende a consumare l'energia stoccata all'interno della batteria, mantenendo di fatto sempre attivo un processo di autoscarica del sistema. Gli altri termini invece sono identici al caso precedente e considerano rispettivamente l'energia erogata al carico, quella in arrivo dall'impianto PV al netto degli autoconsumi del sistema MPPT, e quella acquistata dalla rete di distribuzione. Si precisa che considerare l'energia in arrivo dal PV al netto dei consumi del sistema MPPT comporterà una sovrastima del rendimento, tuttavia non avendo modo di misurare quanto effettivamente erogato dall'alimentatore DC si accetta tale approssimazione.

In considerazione di questa nuova definizione, a partire dai medesimi risultati sperimentali di cui si è in possesso, si calcolano i nuovi rendimenti per ciascuno dei quattro profili, così da valutare come variano le prestazioni dello Zhero in relazione al tipo di utente presso cui è installato. Tali nuovi rendimenti, di seguito denominati "rendimenti del sistema" sono mostrati in Tab. 7.8.

	Rendimento del sistema	$\Delta$ SoC
Profilo 1	25,5 %	25 %
Profilo 2	42,9 %	30,4 %
Profilo 3	52,4 %	40,5 %
Profilo 4	60,5 %	51,2%

Tabella 7.8 Rendimento del sistema Zhero e  $\Delta$ SoC con i quattro profili in accordo con la definizione (7.4)

I valori numerici emersi da tale analisi sono radicalmente diversi da quelli ottenuti precedentemente. La differenza sta proprio nella modifica alla definizione di rendimento, ossia negli autoconsumi non più considerati al pari di un effetto utile bensì come un elemento dissipativo.

In primo luogo, bisogna sicuramente evidenziare l'elevata entità degli autoconsumi propri del sistema in termini di rendimento: 200 W di potenza richiesta dagli ausiliari di per sé è già un valore abbastanza elevato, inoltre diviene estremamente grande nel momento in cui lo si rapportata alla piccola taglia della batteria integrata nel sistema in dotazione. Sistemi di taglia piccola e quindi con un impatto degli autoconsumi così elevato di fatto sono utilizzati solo laddove vi siano esigenze specifiche dell'utente domestico. Ad esempio, egli può avere un ritorno economico incrementando la frazione di produzione PV che può autoconsumare in loco, minimizzando quindi gli scambi con la rete e la relativa spesa.

In secondo luogo, è possibile notare una certa correlazione tra il rendimento del sistema e la variazione dello stato di carica ( $\Delta$  SoC) misurato nel corso della prova. In particolare, si osserva che i profili associati a una modalità "Energy intensive", quali sono appunto il numero tre e il quattro, benché essendo intensi dovrebbero essere responsabili di peggiori prestazioni della batteria, in realtà manifestano un rendimento nettamente superiore rispetto agli altri. La motivazione è che la penalizzazione del rendimento associata alle maggiori sollecitazioni sulla batteria è abbondantemente compensata dal fatto che, sfruttando una maggiore capacità del sistema (come il  $\Delta$ SoC in Tab. 7.8 dimostra), il peso

degli autoconsumi sul fabbisogno energetico dell'utenza è nettamente inferiore a quello che si avrebbe in un profilo "Energy saving". A titolo di esempio, nel profilo 1, cioè quello con rendimento minore, l'energia richiesta giornalmente dagli autoconsumi è il doppio di quella richiesta dal carico. Nel profilo 4 invece, a rendimento maggiore, essi sono poco meno del 50% del fabbisogno energetico dell'utenza. Tale esempio numerico dimostra quanto degli autoconsumi costanti rappresentino una penalizzazione molto diversa in funzione del tipo di utente e di conseguenza anche della taglia del sistema.

Il risultato complessivo è piuttosto interessante e singolare: come mostrato in Fig. 7.25, dalla caratterizzazione sperimentale è emerso che il rendimento del sistema al variare dei profili ha un andamento esattamente opposto rispetto a quello indicato dal modello elettrochimico sulla base della clusterizzazione. Questo è dovuto al peso relativo che gli autoconsumi propri dello Zhero rivestono nei quattro profili.

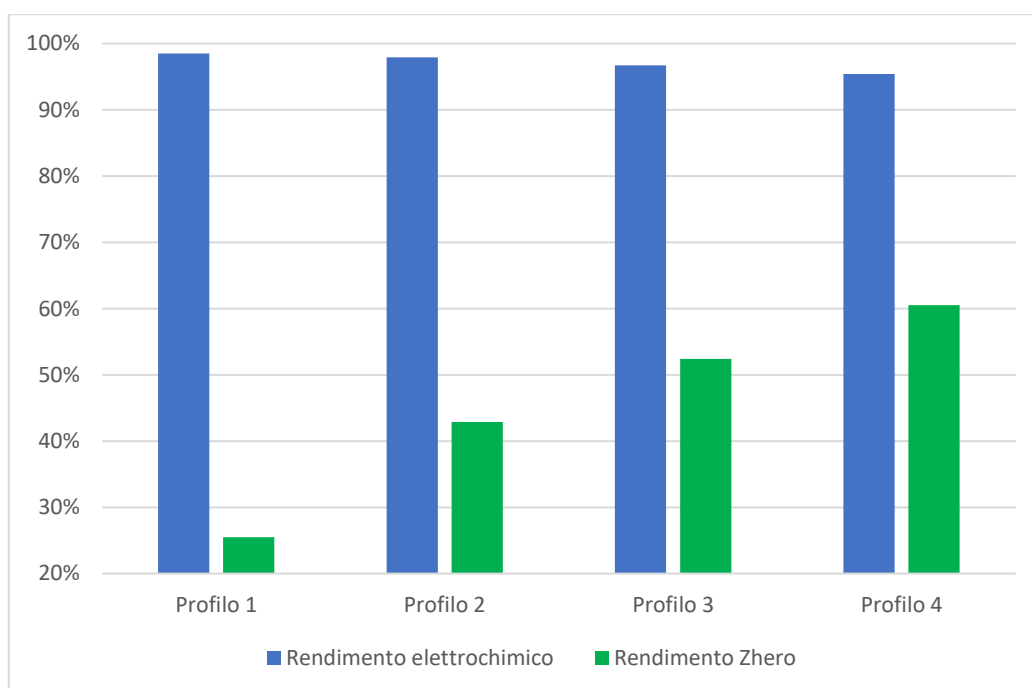


Figura 7.25 Confronto tra rendimento elettrochimico e rendimento del sistema Zhero calcolato sperimentalmente

Considerando invece i soli rendimenti dello Zhero, indipendentemente da quelli elettrochimici, si potrebbe pensare che tali valori non siano affatto promettenti. Tuttavia, è bene provare a mettere a confronto tali risultati con le prestazioni di altri sistemi installati sul campo. A tal proposito, nella sezione 2.7 sono stati presentati alcuni progetti pilota in cui è impiegata la tecnologia sodio-cloruro di nichel. Uno di questi è il progetto "Storage Lab" di Terna, che ha previsto l'installazione di tali batterie nel comune di Codrongianos. In un rapporto che la stessa Terna ha pubblicato in merito a tale progetto [46], si evince come la problematica del differente impatto degli autoconsumi in funzione della modalità di utilizzo del sistema di fatto affligge anche un sistema di taglia più grande e con un ruolo di rilevanza ben superiore rispetto ad un semplice accumulo domestico. Il sistema in questione lavora sulla regolazione secondaria di frequenza, dunque minori saranno le richieste di attivazione del servizio, maggiore sarà il peso che gli autoconsumi

## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

e le perdite di esercizio manifestano nell'efficienza complessiva. Nel caso in questione, per l'anno 2016 si è valutata un'efficienza media di circa il 21 %. Tali valori sono comparabili se non inferiori a quelli individuati dall'analisi sperimentale condotta in questa parte della trattazione.

### 7.5.2 Analisi economica

Per quanto le prestazioni di un sistema possano essere buone, non saranno mai sufficienti a determinare la sua diffusione sul mercato se non vi sia la certezza che esso rappresenti un buon investimento sul piano finanziario. Dunque, è indispensabile condurre un'analisi economica per valutare l'investimento rappresentato dal sistema Zhero, ipotizzando al momento un suo utilizzo per la sola funzionalità di autoconsumo. In Tab. 7.9 si riportano i dati considerati in input all'analisi, e in Tab. 10 le informazioni riguardanti il numero di cicli equivalenti a livello giornaliero e la corrispondente vita utile, associati a ciascuno dei quattro profili.

Investimento [€]	10.000
Vita utile [cicli]	3.000
Consumo ausiliari [W]	200
Prezzo energia [€/kWh]	0,16
Tasso di attualizzazione [%]	4

Tabella 7.9 Dati di input all'analisi economica

	Cicli equivalenti	Vita utile [y]
Profilo 1	0,41	20
Profilo 2	0,51	16
Profilo 3	0,66	13
Profilo 4	0,84	10

Tabella 7.10 Cicli equivalenti e corrispondente vita utile considerando 3000 cicli

Sulla base di questi dati e conoscendo la quota di autoconsumi non coperta dalla produzione fotovoltaica, per ogni profilo è possibile determinare gli OPEX e i ricavi derivanti dall'utilizzo in loco della produzione PV, questi ultimi valutati in termini differenziali rispetto a un'utenza che non possiede lo Zhero. Sulla base di queste informazioni è possibile quantificare l'indice NPV, il cui valore nel corso della vita utile è mostrato in Fig. 7.26.

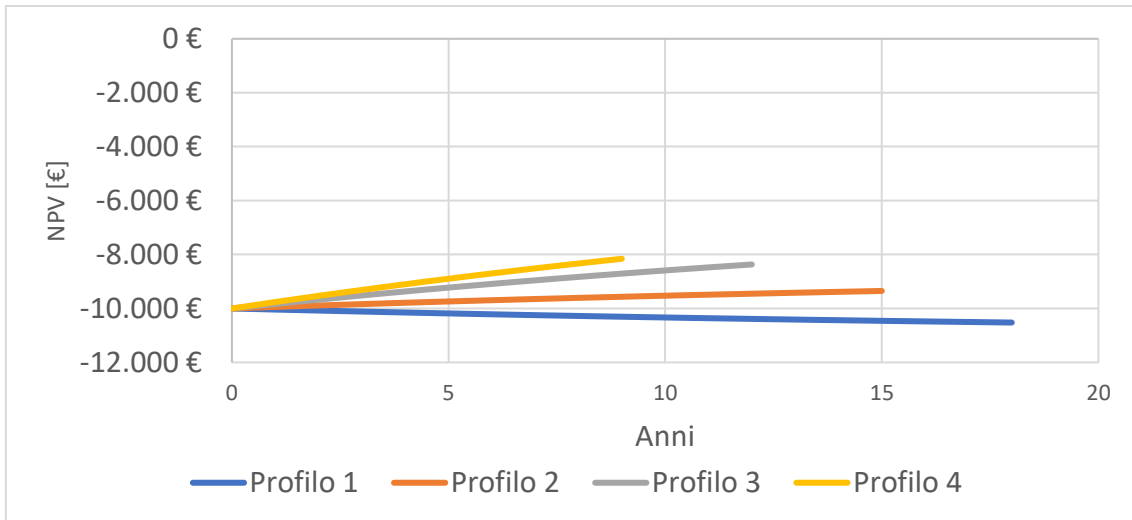


Figura 7.26 Andamento dell'indice NPV nel corso della vita utile dello Zhero per ciascuno dei quattro profili in analisi

Da tale analisi emerge chiaramente come l'investimento non sia affatto sostenibile sul piano finanziario in quanto non si riesce nemmeno a recuperare la spesa iniziale. A tale andamento concorrono sicuramente la vita utile non particolarmente elevata, l'onere associato ad autoconsumi così elevati, e il basso margine di guadagno derivante dall'incremento dell'autoconsumo di produzione PV rispetto al caso in cui non sia presente lo Zhero. Per quanto la differenza tra il prezzo di acquisto dalla rete (0,16 €/kWh) e quello riconosciuto per l'immissione di energia (0,06 €/kWh) sia elevata, sulle piccole tagli domestiche le quantità in gioco non sono tali da creare importanti margini di guadagno.

Posto che il sistema allo stato attuale non può essere competitivo sul mercato, è bene valutare possibili soluzioni che riescano perlomeno a conferire all'indice NPV un trend di crescita più marcato. Tali soluzioni fanno riferimento alla possibilità di fornire servizi alla rete contemporaneamente al funzionamento convenzionale del sistema. Tra questi il più immediato e il più semplice è sicuramente la regolazione primaria di frequenza.

## 7.6 L'utilizzo del sistema Zhero per la regolazione primaria di frequenza

Fornire servizi alla rete a fronte di una remunerazione può essere una valida alternativa per migliorare le prestazioni del sistema sul piano finanziario. Sono molteplici i servizi che un sistema di accumulo può fornire alla rete, ad ogni modo nella presente trattazione si considera la sola regolazione primaria di frequenza, dal momento che ha una legge di intervento precisa e definita e soprattutto perché è possibile quantificare la relativa remunerazione. Sono già presenti infatti a livello europeo degli operatori, quali ad esempio la società Caterna citata nella sezione 4.1.2, che gestiscono a livello aggregato sistemi di accumulo a batteria ad uso domestico per adempiere a tale funzione e trarne beneficio a livello economico.

Il primo aspetto da valutare in merito alla possibile partecipazione alla regolazione primaria riguarda l'effettiva capacità del sistema di adempiere a tale compito. Lo Zhero,



## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

come tutti i sistemi di accumulo del resto, presenta un vincolo fisico legato alla capacità della batteria, in quanto questa può essere saturata a seconda delle richieste della rete. Per valutare tale aspetto, è stata misurata per quindici giorni la frequenza di rete ed è emerso come, in media tra i diversi giorni, il SoC della batteria, nel caso in cui questa sia utilizzata per svolgere regolazione primaria di frequenza, evolve tra  $\pm 15\%$  rispetto al valore iniziale. Da questo punto di vista, volendo svolgere contemporaneamente regolazione di frequenza e autoconsumo, l'unico profilo, tra i quattro presi in considerazione, che potrebbe presentare problemi è il terzo, che raggiunge il 20% di SoC come valore minimo. Al tempo stesso però tale profilo supera a fatica il SoC iniziale fissato nelle prove a circa 52%, dunque il problema potrebbe essere eliminato mantenendo inizialmente un valore più elevato. Da questo punto di vista i profili non presentano particolari criticità nel poter effettuare la regolazione primaria, tuttavia per completezza si presenta in Fig. 7.27 il profilo di SoC misurato nel corso delle prove per ciascun profilo.

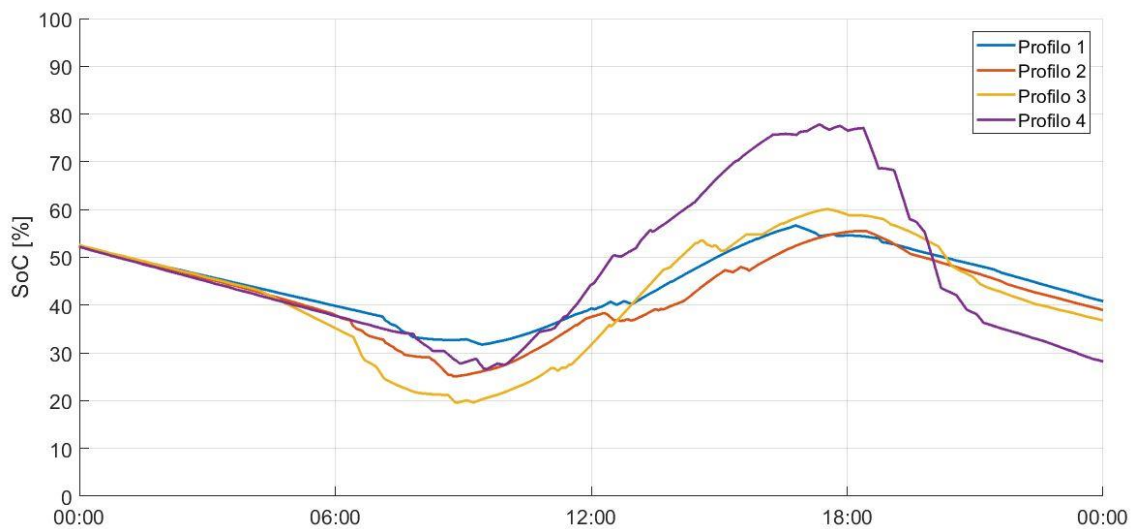


Figura 7.27 Profilo di SoC misurato per i quattro profili di analisi

Il secondo aspetto da valutare è la potenza di regolazione da offrire alla rete. Questa deve tener conto più che altro del massimo C-rate della batteria e del fatto che il sistema deve contemporaneamente alimentare il carico domestico, dunque non tutte le sue risorse possono essere offerte per i servizi di rete. Come prima analisi si suppone di offrire 1 kW, confidando che tale valore non compromette certo l'alimentazione dell'utenza rischiando di saturare il massimo C-rate della batteria.

### 7.6.1 Prova di regolazione primaria

Accertata la possibilità di partecipare alla regolazione primaria, a questo punto è indispensabile fare nuovamente riferimento alle prove sperimentali per valutare il comportamento dello Zhero in tale modalità di funzionamento, ben diversa dalla convenzionale alimentazione di un carico domestico.

Dal punto di vista operativo, si sceglie di testare la sola regolazione primaria, senza la contemporanea presenza del carico domestico, per valutare al meglio lo specifico comportamento del sistema in tale funzionalità. Come potenza di regolazione si è scelto



di offrire 1 kW. Tuttavia, nella curva caratteristica della regolazione si inserisce un offset di 200 W in assorbimento in modo che, non essendoci carico o produzione PV, lo Zhero alimenti dalla rete i suoi ausiliari. Non adottando tale accorgimento, il profilo di regolazione si sovrapporrebbe a quello di un'autoscarica, andando più facilmente a saturare la capacità del sistema.

Il sistema Zhero è già predisposto per gestire in autonomia la regolazione primaria una volta assegnati i parametri della curva caratteristica. Tuttavia, il suo corretto funzionamento è stato il prodotto di un'intensa collaborazione con il produttore, la quale si articolata in alcune settimane di prove sperimentali e periodici aggiornamenti software.

È possibile ora entrare nel merito della prova sperimentale presentando in Fig. 7.28-29 i risultati ottenuti. Si precisa che tutte le grandezze qui di seguito presentate sono state acquisite direttamente tramite gli strumenti interni allo Zhero, dopo però aver verificato tramite confronto con i dati del CompactRio, che le misure della frequenza di rete fossero corrette.

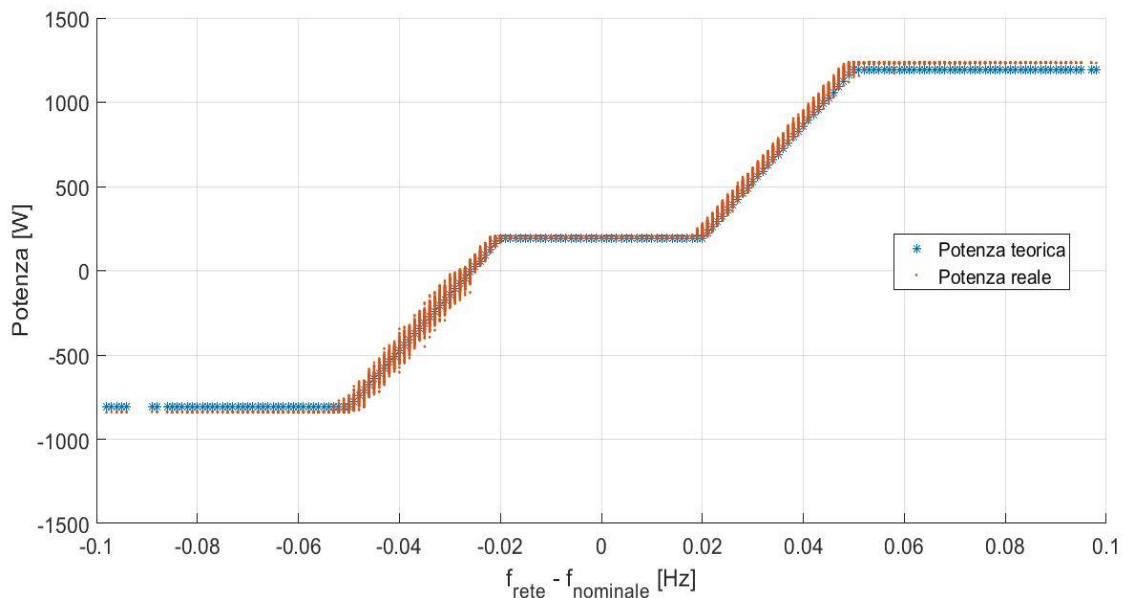


Figura 7.28 Confronto tra curva di regolazione teorica (in blu) e dati misurati (in arancione) nella prova di regolazione primaria

Dall'analisi dei risultati sono possibili due considerazioni. Per quanto riguarda la regolazione in sé si osserva un ottimo comportamento del sistema Zhero, che riesce a seguire sempre la legge di intervento con una notevole precisione. Per quanto riguarda l'andamento del SoC si trova conferma delle considerazioni iniziali secondo cui nel corso della prova (durata in questo caso quasi tre giorni) questo si mantiene confinato entro uno specifico range rispetto al valore iniziale.

## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

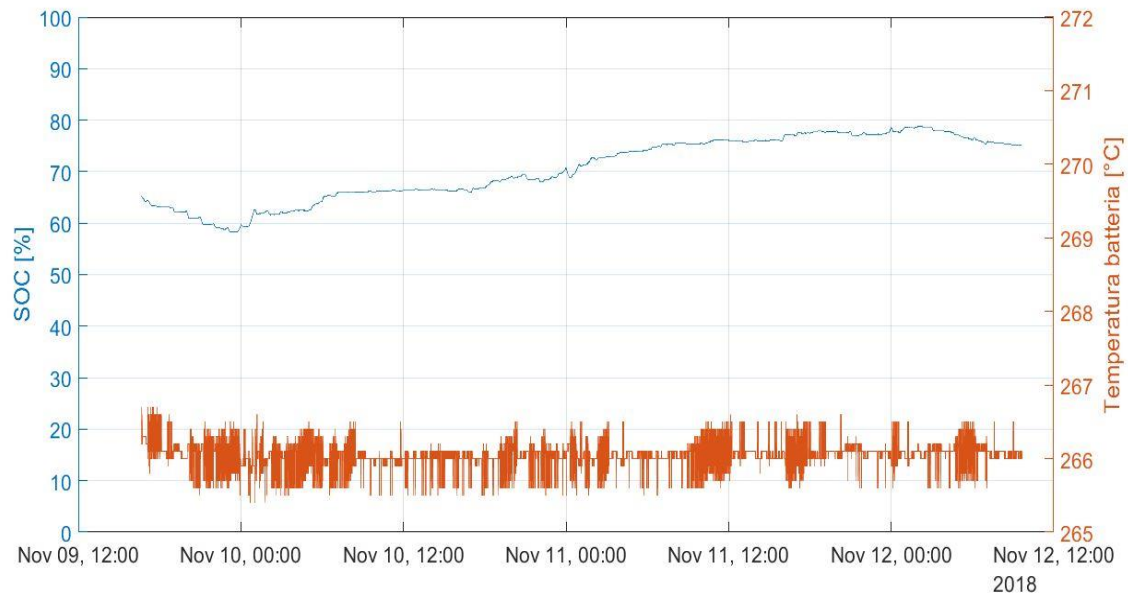


Figura 7.29 Andamento del SoC nel corso della prova di regolazione primaria

### 7.6.2 Analisi economica per regolazione primaria e autoconsumo

Completata la prova e verificata l'effettiva capacità dello Zhero di adempiere a tale funzione, bisogna ripetere l'analisi economica precedentemente sviluppata considerando anche il ricavo associato a questo nuovo servizio erogato alla rete, e contestualmente l'aumento di cicli equivalenti che concorre a una riduzione della vita utile. Benché la prova sia stata condotta sulla sola regolazione primaria, ai fini dell'analisi economica si considerano entrambe le funzionalità.

Per quanto concerne la valorizzazione di tale servizio si fa riferimento al mercato tedesco [48], che offre già la possibilità ai sistemi di accumulo gestiti in modo aggregato di partecipare alla regolazione primaria. Si sceglie in questo modo una remunerazione settimanale di 3 €/kW di banda offerta in regolazione.

I risultati per i quattro profili sono mostrati in Fig. 7.30-33, dove si mette a confronto il nuovo andamento dell'indice NPV rispetto al caso precedentemente analizzato. Ciò che emerge è che la regolazione primaria, limitatamente a caso in cui è stata offerta una banda di 1 kW, consente sì un miglioramento delle prestazioni dello Zhero sul piano economico, tuttavia tale progresso non è tale da garantire un'effettiva competitività sul mercato.

Ad ogni modo si è dimostrato che utilizzare lo Zhero per fornire anche servizi di rete innanzi tutto è possibile dal punto di vista tecnico, e inoltre può costituire un aspetto interessante per migliorare il suo ritorno economico.

## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

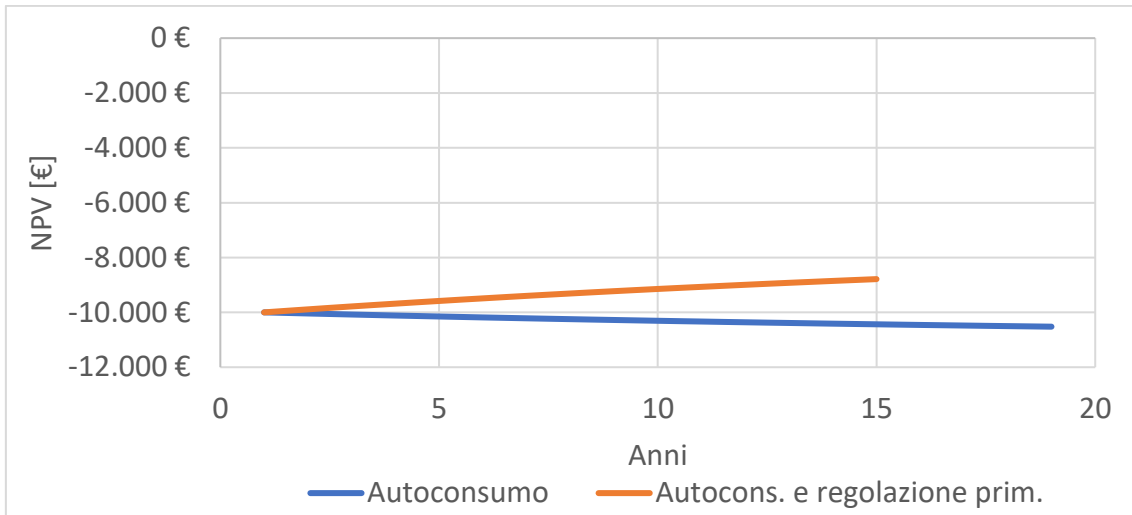


Figura 7.30 Confronto NPV nella vita utile nelle due modalità di esercizio – Profilo 1

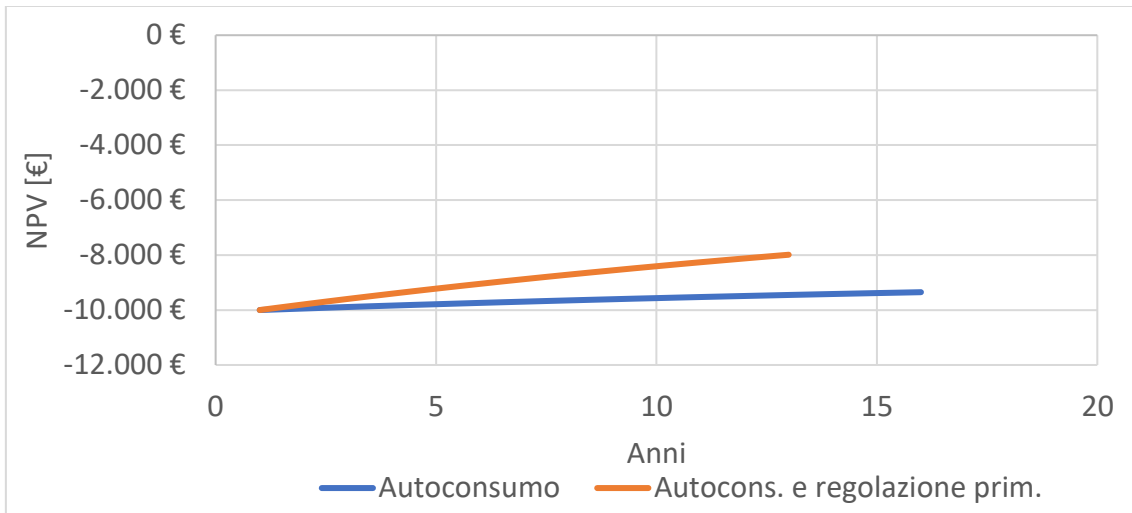


Figura 7.31 Confronto NPV nella vita utile nelle due modalità di esercizio – Profilo 2

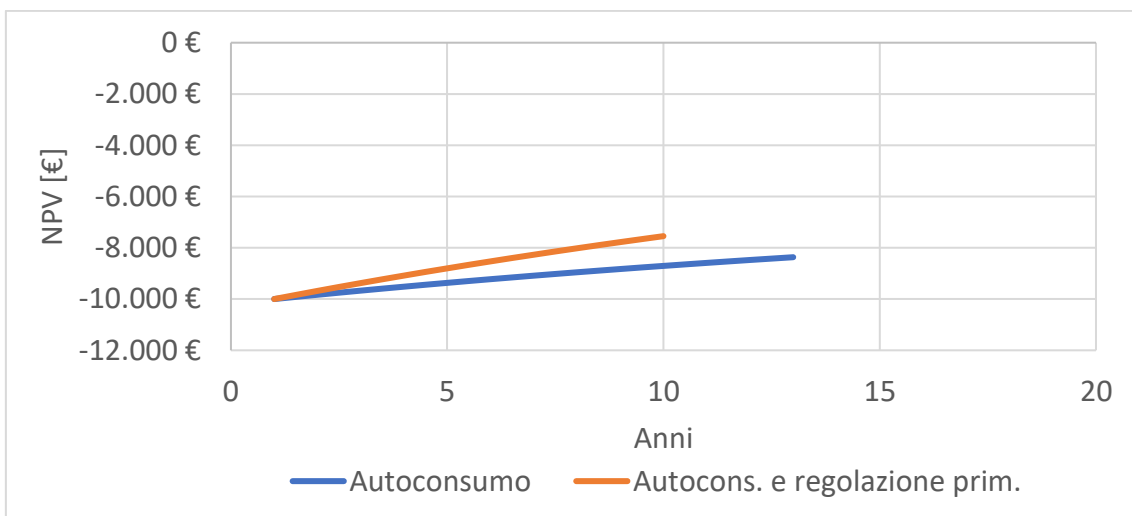


Figura 7.32 Confronto NPV nella vita utile nelle due modalità di esercizio – Profilo 3

## 7. Il sistema Zhero: validazione e caratterizzazione sperimentale

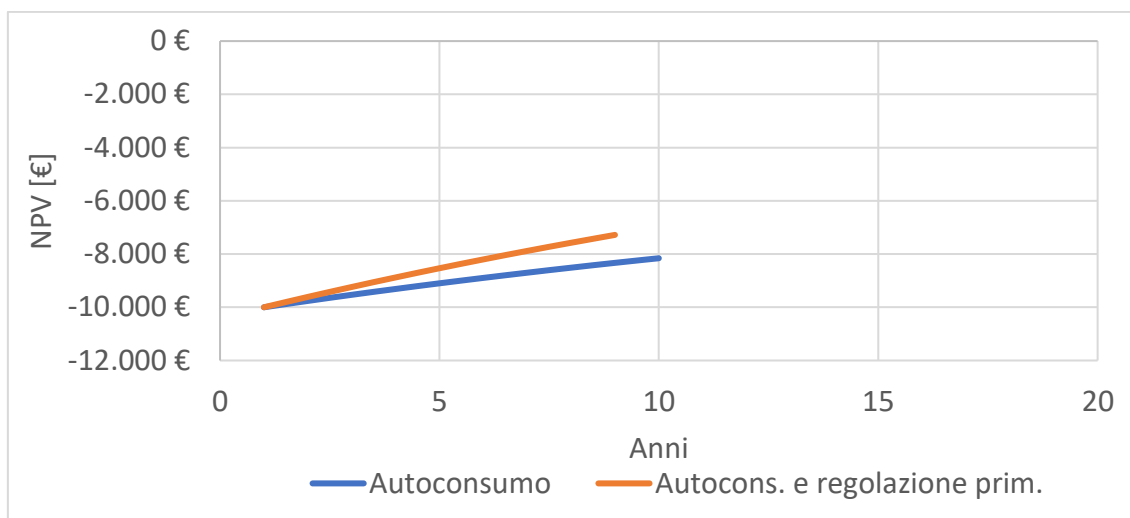


Figura 7.33 Confronto NPV nella vita utile nelle due modalità di esercizio – Profilo 4

### 7.6.3 Conclusioni sull'analisi economica

Le differenti analisi economiche condotte sul sistema Zhero operante solo in autoconsumo oppure anche in regolazione primaria di frequenza, hanno messo in evidenza come l'acquisto di tale sistema di accumulo non rappresenti allo stato attuale un buon investimento.

L'indice NPV infatti non raggiunge mai valori positivi entro il limite della vita utile, superando a fatica i € - 8.000 rispetto ai € - 10.000 dell'anno zero. Tale risultato indica chiaramente che il problema sta nel CAPEX iniziale: di fatto la somma dei flussi di cassa registrati nella vita utile è poco rilevante rispetto al costo di investimento. In altri termini il costo attuale di tale dispositivo è sproporzionato rispetto alle sue potenzialità di guadagno. Per renderlo competitivo è auspicabile in futuro una forte riduzione (almeno di un fattore quattro) del suo prezzo di vendita sul mercato. Con riferimento alle previsioni di costo della tecnologia sodio-cloruro di nichel al 2030 riportate nella sezione 2.7, si evidenzia come il fattore quattro richiesto nella riduzione del CAPEX non sia un valore del tutto insensato. Tali stime infatti prevedono entro la fine del prossimo decennio una riduzione di costi complessiva del 60 % rispetto al valore attuale. Combinando queste stime con un auspicabile sviluppo tecnologico del sistema Zhero tale da aumentarne i ricavi nel corso della vita utile, la sostenibilità economica di tale investimento non sembra un obiettivo irraggiungibile.

Trascurando invece le pessime prestazioni sul piano economico, un altro risultato significativo di tale analisi è che la partecipazione alla regolazione primaria consente all'utente un'ulteriore fonte di guadagno, che si registra in un miglioramento dell'indice NPV. Peraltro, l'installazione dello Zhero consentirebbe una serie di altri vantaggi importanti e che qui non sono stati quantificati sul piano finanziario: ad esempio l'utente non avrebbe più il consueto limite di 3 kW ai suoi consumi elettrici e inoltre avrebbe garantita l'alimentazione dei carichi in situazioni di guasto o interruzioni sulla rete di distribuzione.

## 8. CONCLUSIONI GENERALI

La presente trattazione si inserisce nel processo di transizione che sta caratterizzando il sistema elettrico nazionale ed europeo per effetto della crescente penetrazione di impianti da fonte rinnovabile non programmabile, la cui non dispacciabilità attualmente ne pregiudica la partecipazione al mercato dei servizi di dispacciamento. In altri termini tali impianti non sono in grado di contribuire al controllo della stabilità della rete. Tale scenario nei prossimi anni è destinato ad accentuarsi, motivo per cui il sistema elettrico necessita di nuove logiche di gestione e regolazione che coinvolgano anche i nuovi soggetti.

Per accompagnare questo processo di transizione preservando la stabilità del sistema elettrico e la sua sicurezza, la soluzione attualmente più utilizzata si basa sull'introduzione di sistemi di accumulo a batteria sia a livello della rete di trasmissione dove tali sistemi sono gestiti direttamente dal TSO, sia a livello della rete di distribuzione in modo integrato con gli impianti da fonte rinnovabile, così da rendere questi ultimi dispacciabili e consentire, quando il quadro normativo sarà correttamente definito, la loro partecipazione al MSD.

In questo contesto, la presente trattazione ha approfondito i sistemi di accumulo a tecnologia sodio-cloruro di nichel, una tecnologia che opera ad alta temperatura (circa 270 °C) e che è attualmente coinvolta a livello mondiale in alcuni progetti pilota che la impiegano in accoppiamento a impianti da FER non programmabile oppure direttamente connessa alla rete elettrica di trasmissione. Tra questi, primo fra tutti nel contesto italiano è il progetto "Storage Lab" sviluppato da Terna.

Per assicurare una buona diffusione di sistemi di accumulo, è indispensabile che i loro produttori siano consapevoli delle reali condizioni di funzionamento che questi incontreranno una volta installati in campo. Solo in questo modo è possibile garantirne un corretto sviluppo e ottimizzazione. A tal proposito in letteratura vi sono importanti lacune in merito alla presenza di adeguati profili di test, ossia profili tipici di funzionamento, appositamente sviluppati per rispecchiare il reale funzionamento di un sistema di accumulo in una data applicazione.

Proprio sulla mancanza di tali profili per applicazioni domestiche, ossia quelle situazioni in cui un utente installa un sistema di accumulo per poter autoconsumare maggiormente la produzione del proprio impianto da FER, si fonda la necessità di questo lavoro di tesi. L'obiettivo è stato quello di individuare un numero ristretto di profili di batteria che siano rappresentativi delle differenti tipologie di utenti domestici e che tengano anche conto di come le abitudini di questi utenti possano condizionare le prestazioni del sistema di accumulo.

A tal proposito, a partire dai profili di carico di numerose famiglie, con opportune ipotesi semplificative in merito alla produzione dell'impianto PV, indispensabili quando un'analisi viene sviluppata per la prima volta, sono stati costruiti i rispettivi profili

giornalieri di batteria. Questi sono poi stati analizzati per mezzo di una cluster analysis, che ha permesso di creare un'opportuna suddivisione tra tutti i profili costituenti il dataset iniziale. Caratterizzando ciascun profilo in termini della sua massima potenza in modulo e della massima variazione di contenuto energetico della batteria su base giornaliera ( $\Delta$ Energia), si è riusciti a identificare quattro cluster all'interno di ciascuno dei quali i singoli profili manifestano un rendimento di batteria piuttosto simile e sufficientemente diverso da quelli di un altro gruppo. Per ciascun cluster è stato poi identificato il profilo reale più simile al centroide restituito in output dall'algoritmo di clusterizzazione, ed è stato qualificato come il profilo più rappresentativo dell'intero cluster.

Dal momento che il dataset iniziale su cui è stata sviluppata l'analisi è costituito da circa 44.000 profili reali di 126 famiglie differenti, si è confidenti nell'affermare che i quattro profili individuati siano rappresentativi di tutte le possibili realtà domestiche. Successivamente, il risultato della clusterizzazione è stato sottoposto con esito positivo sia a validazione numerica che sperimentale.

Tale risultato può essere facilmente utilizzato esprimendo un qualunque profilo di batteria nelle variabili prima indicate e utilizzando la Fig. 6.40, qui di seguito riproposta, per identificare il cluster di appartenenza e il rendimento del rispettivo profilo centroide (quest'ultimo valutato per uno specifico modello di batteria). Dai risultati proposti nel capitolo 6 è possibile individuare il centroide nella sua evoluzione temporale.

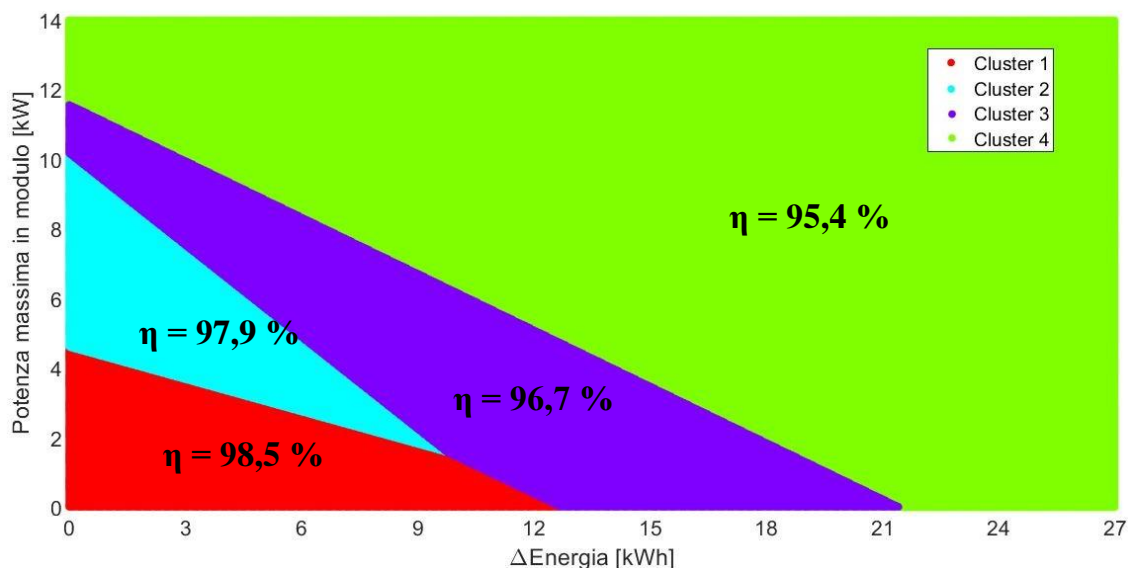


Figura 6.40 Regioni del piano  $P_{max}$  vs  $\Delta$ Energia di competenza dei quattro cluster e rendimento del rispettivo centroide

Per quanto concerne infine possibili prospettive di sviluppo, sono state espresse considerazioni a riguardo nella sezione 6.3. Si ricorda infatti che tale analisi, essendo stata sviluppata per la prima volta, si è fondata su ipotesi semplificative anche di rilevante entità. Sarebbe quindi interessante in futuro migliorare la procedura delineata rimuovendo di volta in volta alcune di queste ipotesi, così da arrivare progressivamente ad un risultato di validità sempre più generale.

## LISTA FIGURE

Figura 1.1 Produzione italiana di energia elettrica diversificata per fonte .....	1
Figura 1.2 Share delle diverse fonti nella produzione italiana di energia elettrica per l'anno 2016 ..	1
Figura 2.1 Componenti della cella visti in sezione longitudinale.....	9
Figura 2.2 Due differenti sezioni trasversali della $\beta$ -allumina .....	9
Figura 2.3 Cella assemblata.....	9
Figura 2.4 Piastre della struttura.....	11
Figura 2.5 Batteria assemblata - dettaglio componenti .....	11
Figura 2.6 Schema di scarica per una cella drogata con ferro .....	12
Figura 2.7 Schema di carica per una generica cella $\text{NaNiCl}_2$ .....	14
Figura 2.8 Misure di OCV in scarica a $260^\circ\text{C}$ .....	14
Figura 2.9 Misure di OCV in carica .....	14
Figura 2.10 Tensione di cella e reazioni in sovra-carica e sovra-scarica .....	16
Figura 2.11 Potenza ed energia specifica delle principali celle elettrochimiche .....	18
Figura 2.12 Andamento di temperatura e resistenza interna per diverse prove di scarica su una batteria FZSONICK .....	21
Figura 2.13 Possibili applicazioni dei sistemi BESS.....	25
Figura 2.14 Installazione di batterie $\text{NaNiCl}_2$ a Codrongianos.....	25
Figura 2.15 Numero di cicli e costo specifico di alcune tecnologie (valori riferimenti anno 2016)	27
Figura 2.16 Costi di installazione delle diverse tecnologie: valori attuali e stima al 2030 .....	28
Figura 2.17 Caratteristiche tecniche delle celle ad alta temperatura e loro stima al 2030.....	28
Figura 3.1 Accuratezza e tempo di simulazione per differenti approcci di modellazione.....	33
Figura 3.2 Rappresentazione grafica e matriciale di OCV, resistenza interna e temperatura nel modello stazionario .....	36
Figura 3.3 Schema a blocchi del modello stazionario in un processo di scarica.....	36
Figura 3.4 Schema a blocchi del modello transitorio in un processo di scarica.....	38
Figura 3.5 Risultati sperimentali VS valori simulati per un aging test (a sinistra) e un capacity test (a destra).....	38
Figura 3.6 Andamento di temperatura durante processi di scarica a diversa potenza .....	39
Figura 3.7 Circuito equivalente del modello con rami RC.....	40
Figura 3.8 In blu: profilo di tensione misurato durante la scarica a gradini a $0,25\text{C}$ . In rosso: OCV delle celle al ferro. In nero tratteggiato: evoluzione del SoC. ....	41
Figura 3.9 Andamento dei parametri al variare del SoC: (a) OCV, (b) $R_0$ , (c) $R_1$ , (d) $R_2$ , (e) $C_1$ , (f) $C_2$ .....	42
Figura 3.10 Rappresentazione del modello tramite schema a blocchi .....	42
Figura 3.11 Validazione del modello con due profili di scarica differenti: in blu la tensione misurata e in rosso quella simulata. In verde l'onda quadra di corrente e in blu tratteggiato il SoC .....	43
Figura 4.1 Curva caratteristica con legge a statismo per la regolazione primaria di frequenza .....	49
Figura 4.2 Profilo di test (sx) e un suo ingrandimento (dx) .....	52
Figura 4.3 Profilo di test per la regolazione di frequenza (convenzione: $P>0$ scarica) .....	53
Figura 4.4 Ciclo base da 160 minuti per la prova di regolazione di frequenza .....	54
Figura 4.5 Profilo di prova complessivo per il test della regolazione di frequenza e della spinning reserve .....	54
Figura 4.6 Profilo di test per la funzionalità di peak shaving.....	55
Figura 4.7 Ciclo di lavoro per la funzionalità di peak shaving.....	56
Figura 5.1 Rappresentazione schematica di un'iterazione dell' algoritmo k-means.....	61

Figura 5.2 Rappresentazione di un segnale in uno spazio 3D con frequenza e tempo. Tratta da <a href="http://radiolawendel.blogspot.com/2012/02/fft-e-soda-ancora-piu-veloce-la.html">http://radiolawendel.blogspot.com/2012/02/fft-e-soda-ancora-piu-veloce-la.html</a> ) .....	62
Figura 5.3 Profilo di carico annuale per la famiglia n.1 in modalità “energy intensive” .....	66
Figura 5.4 Profilo di carico annuale per la famiglia n.1 in modalità “energy intensive” rimossi i periodi di vacanza .....	66
Figura 5.5 Profilo di produzione dell’impianto fotovoltaico (sinistra) e profilo di carico (destra)..	67
Figura 5.6 Profilo di batteria per la famiglia n.1 (energy intensive) il 4 luglio 2016.....	67
Figura 5.7 Andamento dell’energia cumulata della batteria per la famiglia n.1 (energy intensive) il 4 luglio 2016 .....	67
Figura 5.8 Profilo di batteria normalizzato per la famiglia n.1 (energy intensive) il 4 luglio 2016.	72
Figura 5.9 Profilo di batteria per la famiglia n.1 (energy intensive) il 4 luglio 2016 espresso nel dominio delle frequenze .....	73
Figura 5.10 Tensione, corrente e stato di carica simulati dal modello per la famiglia n.1 (energy intensive) il 4 luglio 2016.....	77
Figura 6.1 Classificazione in potenza massima e variazione di energia secondo il numero di componenti delle famiglie.....	82
Figura 6.2 Classificazione in potenza massima e variazione di energia secondo la tipologia di giorno .....	82
Figura 6.3 Clusterizzazione di profili di batteria in 2D al variare del numero di cluster richiesto. In blu i centroidi .....	84
Figura 6.4 Clusterizzazione di profili di batteria in 3D al variare del numero di cluster richiesto. In blu i centroidi .....	84
Figura 6.5 Clusterizzazione 2D - potenza massima in modulo e variazione di contenuto energetico della batteria. Rappresentazione nel piano di definizione.....	86
Figura 6.6 Clusterizzazione 2D – Cluster 1.....	87
Figura 6.7 Clusterizzazione 2D – Cluster 2.....	87
Figura 6.8 Clusterizzazione 2D – Cluster 3.....	87
Figura 6.9 Clusterizzazione 2D – Cluster 4.....	87
Figura 6.10 Clusterizzazione 3D - potenza massima in modulo. variazione di contenuto energetico della batteria, rapporto tra tempo in carica e tempo in scarica. Rappresentazione nel piano di definizione.....	88
Figura 6.11 Clusterizzazione 3D rapporto tempi – Cluster 1 .....	89
Figura 6.12 Clusterizzazione 3D rapporto tempi – Cluster 2.....	89
Figura 6.13 Clusterizzazione 3D rapporto tempi – Cluster 3.....	89
Figura 6.14 Clusterizzazione 3D rapporto tempi – Cluster 4.....	89
Figura 6.15 Clusterizzazione profili normalizzati – Cluster 1.....	91
Figura 6.16 Clusterizzazione profili normalizzati – Cluster 2.....	91
Figura 6.17 Clusterizzazione profili normalizzati – Cluster 3.....	91
Figura 6.18 Clusterizzazione profili normalizzati – Cluster 4.....	91
Figura 6.19 Clusterizzazione profili non normalizzati – Cluster 1.....	93
Figura 6.20 Clusterizzazione profili non normalizzati – Cluster 2.....	93
Figura 6.21 Clusterizzazione profili non normalizzati – Cluster 3.....	93
Figura 6.22 Clusterizzazione profili non normalizzati – Cluster 4.....	93
Figura 6.23 Clusterizzazione FFT di profili normalizzati – Cluster 1.....	95
Figura 6.24 Clusterizzazione FFT di profili normalizzati – Cluster 2.....	95
Figura 6.25 Clusterizzazione FFT di profili normalizzati – Cluster 3.....	95
Figura 6.26 Clusterizzazione FFT di profili normalizzati – Cluster 4.....	95
Figura 6.27 Clusterizzazione FFT di profili non normalizzati – Cluster 1.....	97
Figura 6.28 Clusterizzazione FFT di profili non normalizzati – Cluster 2.....	97
Figura 6.29 Clusterizzazione FFT di profili non normalizzati – Cluster 3.....	97



Figura 6.30 Clusterizzazione FFT di profili non normalizzati – Cluster 4.....	97
Figura 6.31 Rendimento dei profili in analisi simulato con il modello a due rami RC.....	98
Figura 6.32 Andamento del KPI al variare di criterio di clusterizzazione e numero di cluster.....	99
Figura 6.33 Rendimento dei diversi profili in funzione del cluster di appartenenza. Clusterizzazione in Pmax e $\Delta$ Energia.....	101
Figura 6.34 Boxplot dei rendimenti simulati per ogni cluster. Clusterizzazione in Pmax, $\Delta$ Energia .....	101
Figura 6.35 Rendimento simulato per i diversi profili in funzione del cluster di appartenenza. Clusterizzazione di profili normalizzati per la rispettiva potenza massima in modulo.....	102
Figura 6.36 Boxplot dei rendimenti simulati per ogni cluster. Clusterizzazione di profili normalizzati per la rispettiva potenza massima in modulo .....	102
Figura 6.37 Rendimento simulato per i diversi profili in funzione del cluster di appartenenza. Profili di indice pari.....	103
Figura 6.38 Boxplot dei rendimenti simulati per ogni cluster. Profili di indice pari.....	103
Figura 6.39 Rendimento simulato per i diversi profili in funzione del cluster di appartenenza. Profili di indice dispari .....	104
Figura 6.40 Boxplot dei rendimenti simulati per ogni cluster. Profili di indice dispari .....	104
Figura 6.41 Regioni del piano Pmax vs. $\Delta$ Energia di competenza dei quattro cluster e rendimento del rispettivo centroide.....	105
Figura 6.42 Distribuzione dei profili di batteria delle sessantatré famiglie in modalità energy intensive all'interno dei quattro cluster.....	106
Figura 6.43 Distribuzione dei profili di batteria delle sessantatré famiglie in modalità energy saving all'interno dei quattro cluster .....	107
Figura 6.44 Diagramma di flusso – procedura seguita per la clusterizzazione dei profili di batteria e la definizione di profili standard .....	108
Figura 7.1 Schema concettuale del banco prova .....	111
Figura 7.2 Alimentatore DC.....	112
Figura 7.3 Carico resistivo .....	113
Figura 7.4 CompactRio e alimentazione generale.....	114
Figura 7.5 Batteria FZSoNick installata all'interno del sistema Zhero.....	115
Figura 7.6 Trasduttore di corrente.....	116
Figura 7.7 Trasduttore di tensione.....	116
Figura 7.8 Vista lato AC e alloggiamento batterie .....	117
Figura 7.9 Vista lato DC.....	117
Figura 7.10 Schema elettrico della componentistica interna al sistema Zhero.....	118
Figura 7.11 Sistema Zhero in laboratorio.....	119
Figura 7.12 Smart grid con condivisione dei surplus energetici accumulati nei sistemi Zhero installati in diverse abitazioni .....	120
Figura 7.13 Logo inteGRIDy .....	121
Figura 7.14 Profili di batteria preparati per l'analisi sperimentale.....	124
Figura 7.15 Andamento teorico del SoC durante la prova per i quattro profili di batteria.....	125
Figura 7.16 Potenze scambiate dal sistema Zhero durante la prova del profilo 2 .....	128
Figura 7.17 Andamento di SoC e temperatura di batteria durante la prova del profilo 2 .....	128
Figura 7.18 Potenze scambiate dal sistema Zhero durante la prova del profilo 4 .....	129
Figura 7.19 Andamento di SoC e temperatura di batteria durante la prova del profilo 4 .....	129
Figura 7.20 Potenze scambiate dal sistema Zhero durante la prova del profilo 1 .....	130
Figura 7.21 Andamento di SoC e temperatura di batteria durante la prova del profilo 1 .....	130
Figura 7.22 Potenze scambiate dal sistema Zhero durante la prova del profilo 3 .....	131
Figura 7.23 Andamento di SoC e temperatura di batteria durante la prova del profilo 3 .....	131

Figura 7.24 Confronto grafico tra rendimento elettrochimico e rendimento sperimentale dei profili centroidi.....	132
Figura 7.25 Confronto tra rendimento elettrochimico e rendimento del sistema Zhero calcolato sperimentalmente .....	135
Figura 7.26 Andamento dell'indice NPV nel corso della vita utile dello Zhero per ciascuno dei quattro profili in analisi .....	137
Figura 7.27 Profilo di SoC misurato per i quattro profili di analisi.....	138
Figura 7.28 Confronto tra curva di regolazione teorica (in blu) e dati misurati (in arancione) nella prova di regolazione primaria .....	139
Figura 7.29 Andamento del SoC nel corso della prova di regolazione primaria.....	140
Figura 7.30 Confronto NPV nella vita utile nelle due modalità di esercizio – Profilo 1.....	141
Figura 7.31 Confronto NPV nella vita utile nelle due modalità di esercizio – Profilo 2.....	141
Figura 7.32 Confronto NPV nella vita utile nelle due modalità di esercizio – Profilo 3.....	141
Figura 7.33 Confronto NPV nella vita utile nelle due modalità di esercizio – Profilo 4.....	142

## ACRONIMI UTILIZZATI

BESS	Battery Energy Storage Systems
CAPEX	CApital EXpenditure / Costo d'investimento
DC	Direct Current / Corrente continua
FER	Fonti di Energia Rinnovabile
KPI	Key Performance Index
MPPT	Maximum Power Point Tracker
MSD	Mercato dei Servizi di Dispacciamento
NPV	Net Present Value
OCV	Open Circuit Voltage
OPEX	OPerative EXpenditure / Costi operativi
Pmax	Potenza massima in modulo del profilo di batteria
PV	Fotovoltaico
SoC	State of Charge / Stato di carica
TSO	Transmission System Operator
VOC	Tensione di circuito aperto
$\Delta$ SoC	Variazione dello stato di scarica
$\Delta$ Energia	Massima variazione di contenuto energetico della batteria



## BIBLIOGRAFIA

- [1] International Energy Agency (IEA). Electricity information: overview. 2018.
- [2] Sebastian Dambone Sessa. Analisi dell'accumulo elettrochimico ad alta temperatura per l'integrazione delle fonti rinnovabili nella rete di trasmissione nazionale; Università degli studi di Padova.
- [3] Claudio Brivio. Battery Energy Storage Systems: modelling, application and design criteria. Politecnico di Milano; 2017.
- [4] Falabretti D, Lindholm M, Merlo M, Scapecchia G. Energy storage coupling in a high efficiency household scenario: A real life experimental application. Journal of Energy Storage 2018 June 2018; 17:496-506.
- [5] Conover D, Crawford A, Fuller J, Gourisetti S, Viswanathan V, Ferreira S, et al. Protocol for uniformly measuring and expressing the performance of energy storage systems. 2016.
- [6] Butler PC, Cole JF, Taylor PA. Test profiles for stationary energy-storage applications. J Power Sources 1999;78(1):176-181.
- [7] Une S.r.l. Brochure commerciale sistema Zhero. Available at: [http://zherosystem.com/wp-content/uploads/2015/02/UNE\\_brochure\\_IT\\_web-pag-doppie.pdf](http://zherosystem.com/wp-content/uploads/2015/02/UNE_brochure_IT_web-pag-doppie.pdf). Accessed 11/25, 2018.
- [8] Dambone Sessa S, Crugnola G, Todeschini M, Zin S, Benato R. Sodium nickel chloride battery steady-state regime model for stationary electrical energy storage. Journal of Energy Storage 2016;6:105-115.
- [9] Longo S, Antonucci V, Cellura M, Ferraro M. Life cycle assessment of storage systems: The case study of a sodium/nickel chloride battery. J Clean Prod 2014;85:337-346.
- [10] Sudworth JL. The sodium/nickel chloride (ZEBRA) battery. J Power Sources 2001;100 (1 - 2):149-163.
- [11] Advances in ZEBRA batteries. Eight Ulmer Electrochemische Tage, June 20, 2002 - June 21; 2002; Neu-Ulm, Germany: Elsevier; 2004.
- [12] Maura Musio. Management and modelling of battery storage systems in microgrids and virtual power plants; Università degli studi di Cagliari; 2014-2015.
- [13] Bignucolo F, Coppo M, Crugnola G, Savio A. Application of a simplified thermal-electric model of a sodium-nickel chloride battery energy storage system to a real case residential prosumer. Energies 2017;10(10).
- [14] Load Profile Generator 7.2.0. Available at: <https://www.loadprofilegenerator.de/>, 2018.
- [15] Han J. Data mining: concepts and techniques / Jiawei Han, Micheline Kamber, Jian Pei. 3. ed ed. Waltham: Waltham : Morgan Kaufmann, 2012; 2012.

- [16] Identification of typical load profiles using K-means clustering algorithm. 2014 Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering, APWC on CSE 2014, November 4, 2014 - November 5; 2014; Nadi, Fiji: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc; 2014.
- [17] Zufferey T, Ulbig A, Koch S, Hug G. Chapter 6 - Unsupervised Learning Methods for Power System Data Analysis. 2018 2018:107-124.
- [18] Pan S, Wang X, Wei Y, Zhang X, Gal C, Ren G, et al. Cluster analysis for occupant-behavior based electricity load patterns in buildings: A case study in Shanghai residences. *Building Simulation* 2017;10(6):889-898.
- [19] Identifying representative types of residential electricity consumers - A cluster analysis of hourly smart meter data; 2016.
- [20] T. Zhang, G. Zhang, J. Lu, X. Feng, W. Yang. A New Index and Classification Approach for Load Pattern Analysis of Large Electricity Customers. *IEEE Transactions on Power Systems* 2012;27(1):153-160.
- [21] Cleaver B, Cleaver DJ, Littlewood L, Demott DS. Reversible and irreversible heat effects in ZEBRA cells. *J Appl Electrochem* 1995;25(12):1128-1132.
- [22] Benato R, Cosciani N, Crugnola G, Dambone Sessa S, Lodi G, Parmeggiani C, et al. Sodium nickel chloride battery technology for large-scale stationary storage in the high voltage network. *J Power Sources* 2015;293:127-136.
- [23] Lu X, Li G, Kim JY, Lemmon JP, Sprenkle VL, Yang Z. The effects of temperature on the electrochemical performance of sodium-nickel chloride batteries. *J Power Sources* 2012; 215:288-295.
- [24] Dambone Sessa S, Palone F, Necci A, Benato R. Sodium - nickel chloride battery experimental transient modelling for energy stationary storage. *Journal of Energy Storage* 2017;9:40-46.
- [25] Lodi G. Developmente and qualification of large energy storage solutions based on sodium-nickel batteries. 2013.
- [26] Hosseinifar M, Petric A. High temperature versus low temperature Zebra (Na/NiCl<sub>2</sub>) cell performance. *J Power Sources* 2012;206:402-408.
- [27] Li G, Lu X, Kim JY, Lemmon JP, Sprenkle VL. Cell degradation of a Na-NiCl<sub>2</sub>(ZEBRA) battery. *Journal of Materials Chemistry A* 2013;1(47):14935-14942.
- [28] Terna. Progetti pilota di accumulo. Available at: <https://www.terna.it/it-it/sistemaelettrico/progettipilotadiaccumulo.aspx>. Accessed 09/20, 2018.
- [29] Parmeggiani C. Green energy island: la soluzione italiana per lo storage con batteria.
- [30] DOE, Sandia national laboratories. DOE Global energy storage database, Tozzi energy storage system. Available at: <https://www.energystorageexchange.org/projects/1303>. Accessed 09/18, 2018.

- [31] DOE, Sandia national laboratories. Global energy storage database, INES Project. Available at: <https://www.energystorageexchange.org/projects/1105>. Accessed 09/19, 2018.
- [32] Fenimore T, Energy storage at Duke Energy. 2014.
- [33] DOE, Sandia national laboratories. DOE Global energy storage database, EDF EN Guiana Toucan Project. Available at: <https://www.energystorageexchange.org/projects/1104>. Accessed 09/19, 2018.
- [34] FZSONICK. Prodotti. Available at: <https://www.energystorageexchange.org/projects/1303>. Accessed 09/18, 2018.
- [35] Sodium Nickel Chloride batteries in transportation applications. International Conference on Electrical Systems for Aircraft, Railway, Ship Propulsion and Road Vehicles, ESARS 2015, March 3, 2015 - March 5; 2015; Aachen, Germany: IEEE Computer Society; 2015.
- [36] International Renewable Energy Agency (IRENA). Electricity storage and renewables: costs and markets to 2030. 2017.
- [37] Bracco S, Delfino F, Trucco A, Zin S. Electrical storage systems based on Sodium/Nickel chloride batteries: A mathematical model for the cell electrical parameter evaluation validated on a real smart microgrid application. *J Power Sources* 2018;399:372-382.
- [38] Zebra battery technologies for the all electric smart car. SPEEDAM 2006, May 23, 2006 - May 26; 2006; Taormina, Italy: Institute of Electrical and Electronics Engineers Computer Society; 2006.
- [39] Giuliano Rancilio. Battery energy storage systems for ancillary services provision; Politecnico di Milano; 2018.
- [40] Gallanti M, Benini M, Canevese S, Ciapessoni E, Cirio D. Il servizio di regolazione primaria tramite batteria: valutazioni tecnico-economiche. *L'energia elettrica* Settembre 2015.
- [41] Caterva. Sezioni consultate "Caterva-Sun" e "Caterva Energy Management". Available at: <https://www.caterva.de/en/>. Accessed 11/24, 2018.
- [42] Feng X, Li J, Lu L, Hua J, Xu L, Ouyang M. Research on a battery test profile based on road test data from hybrid fuel cell buses. *J Power Sources* 2012;209:30-39.
- [43] Identification of typical load profiles using K-means clustering algorithm. 2014 Asia-Pacific World Congress on Computer Science and Engineering, APWC on CSE 2014, November 4, 2014 - November 5; 2014; Nadi, Fiji: Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc; 2014.
- [44] Une S.r.l. Manuale tecnico Zhero v 0.3 del 18-05-2017.
- [45] INTEGRIDY. Descrizione e progetto pilota a San Severino Marche. Available at: <http://www.integrity.eu/content/san-severino-marche>. Accessed 11/11, 2018.
- [46] Terna. Rapporto pubblico anno 2016 Storage Lab. Sperimentazione di progetti pilota di accumulo energetico di tipo power intensive. 27/04/2017.



[47] De Lia F, Castello S. Individuazione dei modelli matematici più rappresentativi dei sistemi di accumulo da utilizzare per la messa a punto del modello di simulazione degli impianti. ENEA, 2016.

[48] 50hertz, Amprion, T.BW Internet platform for tendering control reserve