



Agenzia nazionale per le nuove tecnologie, l'energia  
e lo sviluppo economico sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

Procedure di prova per la determinazione della capacità residua in termini  
di “second life” degli accumulatori al Li delle auto elettriche

*Massimo Ceraolo, Romano Giglioli*



*Università di Pisa - DESE*

Report RdS/2012/252

PROCEDURE DI PROVA PER LA DETERMINAZIONE DELLA CAPACITÀ RESIDUA IN TERMINI DI “SECOND LIFE”  
DEGLI ACCUMATORI AL LITIO DELLE AUTO ELETTRICHE

Massimo Ceraolo, Romano Giglioli (Università di Pisa, DESE)

Settembre 2012

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo di energia

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA

Esprimiamo un particolare ringraziamento all'Ing. Giovanni Lutzemberger per il contributo apportato nella fase di brainstorming.

## Indice

<b>Sommario .....</b>	<b>4</b>
<i>Introduzione .....</i>	<i>5</i>
<b>Descrizione delle attività svolte e risultati .....</b>	<b>5</b>
1. <i>Il concetto di “second life” .....</i>	<i>5</i>
2. <i>Il ciclo di lavoro .....</i>	<i>8</i>
3. <i>Implementazione del ciclo .....</i>	<i>10</i>
4. <i>Verifica della capacità residua .....</i>	<i>11</i>
5. <i>Implementazione di un controllo dello stato di carica .....</i>	<i>12</i>
6. <i>Caso studio .....</i>	<i>14</i>
<b>Conclusioni .....</b>	<b>15</b>
<b>Riferimenti bibliografici .....</b>	<b>15</b>
<b>Appendice .....</b>	<b>16</b>

## Sommario

Il presente documento descrive le procedure di prova adottate per la determinazione della capacità residua di accumulatori al Litio in termini di “second life”. Tali accumulatori al termine del loro primo utilizzo a bordo delle auto elettriche possono essere reimpiegati in applicazioni stazionarie, dove i requisiti prestazionali appaiono meno stringenti. Dopo una breve introduzione sul tema della “second life” in termini di impatto economico e ambientale, è stata definita una procedura di caratterizzazione composta da un ciclo di riferimento ispirato a un tipico impiego stazionario, un ciclo per la valutazione della capacità residua e un ciclo di bilanciamento dello stato di carica. In conclusione è riportato un caso studio che mostra una procedura di test analoga a quella descritta, volta alla caratterizzazione dell’invecchiamento di accumulatori al Litio utilizzati in ambito automobilistico.

## Introduzione

Obiettivo del presente documento è stato quello di definire una procedura di caratterizzazione per accumulatori al Litio utilizzati in termini di “second life”. L’identificazione dell’effettivo stato di invecchiamento dell’accumulatore avviene prendendo a riferimento i nuovi profili di utilizzo, di tipo stazionario. La ripetizione dei profili tipici di impiego necessita comunque di essere periodicamente affiancata da una valutazione della capacità residua, nonché dal bilanciamento dello stato di carica. I successivi paragrafi descrivono in dettaglio le procedure adottate.

## Descrizione delle attività svolte e risultati

### 1. Il concetto di “second life”

Una possibilità per ridurre l’elevato costo delle batterie dei veicoli elettrici e ibridi è quello di estendere la loro vita utile prevedendone un reimpiego in applicazioni differenti da quella originaria. Applicazioni preferite per il secondo impiego sono quelle stazionarie, anche se un riutilizzo per alcune applicazioni secondarie nel settore trasporti (carrelli, muletti, ...) è comunque possibile. Il ciclo vita della batteria è dunque riassumibile nelle seguenti fasi:

- Costruzione della batteria e installazione a bordo del veicolo.
- Utilizzo a bordo.
- Ritiro, ricondizionamento e installazione su applicazione stazionaria.
- Utilizzo su applicazione stazionaria.
- Riciclaggio.

Seppur di un certo interesse, i risultati mostrano alcune limitazioni: l’impossibilità di prevedere la vita residua al momento del riutilizzo, il costo di assemblaggio e reintegrazione in nuovi dispositivi, la mancanza di una regolamentazione all’interno del mercato, l’avversità di alcune fasce di utenti ad impiegare accumulatori usati.

Il punto di partenza in questo tipo di analisi è legato all’individuazione del settore di riutilizzo, unitamente al costo, alla sicurezza e alle performance richieste: si tratta cioè di effettuare una analisi globale del ciclo vita della batteria, comprendente sia la prima che la seconda fase di utilizzo. Tali valutazioni vengono effettuate anche prendendo in esame diversi scenari, alcuni raffigurati nelle figure seguenti [1].

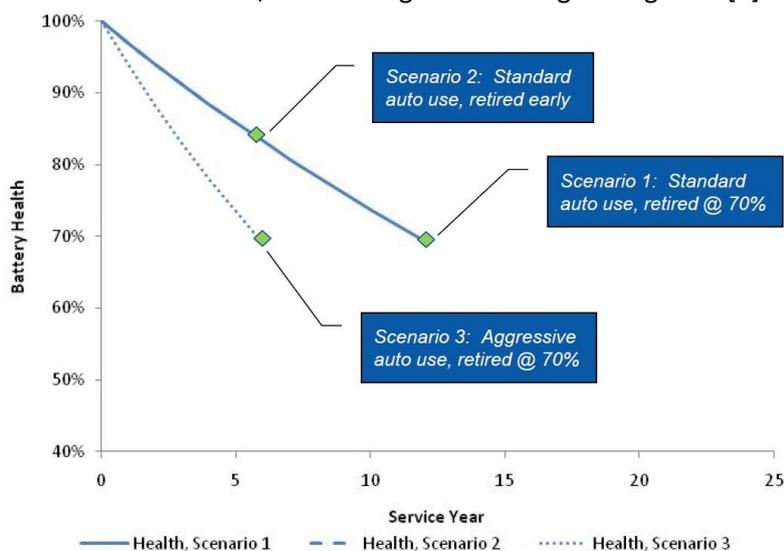


Figura 1: scenari di primo utilizzo di sistemi di accumulo

Come è possibile osservare solitamente la fase di primo utilizzo termina quando la capacità non riesce più a superare il 70-80% del valore nominale, anche se in taluni casi è possibile prevedere il ritiro anticipato dell’accumulo.

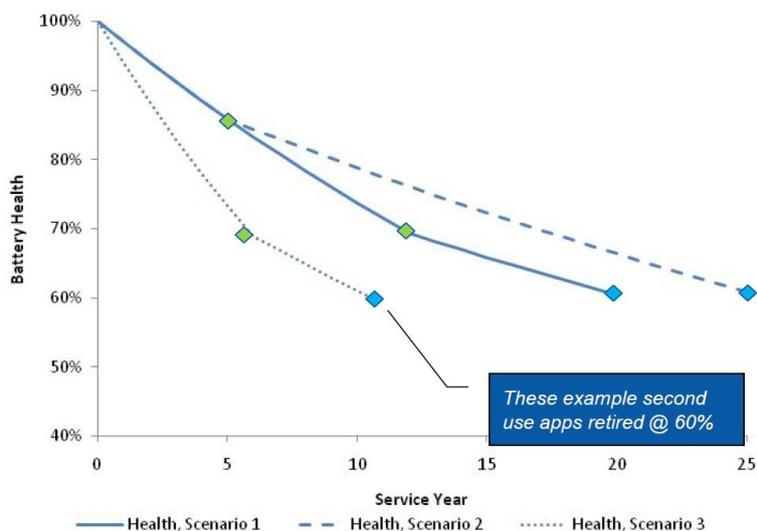


Figura 2: scenari di riutilizzo di sistemi di accumulo

Il riutilizzo consente invece di estendere la vita utile della batteria fino a un valore di capacità residua pari al 60%: a seconda degli scenari considerati ciò può consentire di raddoppiare (scenario 1, 3) o addirittura di quadruplicare nel caso di primo utilizzo ridotto (scenario 2) la vita utile della batteria. I diversi scenari vengono analizzati calcolando il valore residuo della batteria al termine della prima fase di impiego (automotive): il valore viene calcolato in rapporto al costo iniziale, ed è funzione della riduzione di prezzo dovuta all'impiego e dei costi di ricondizionamento e manutenzione. Tale valore viene solitamente attualizzato al presente (NPV). I risultati sono riassunti nel grafico seguente [1].

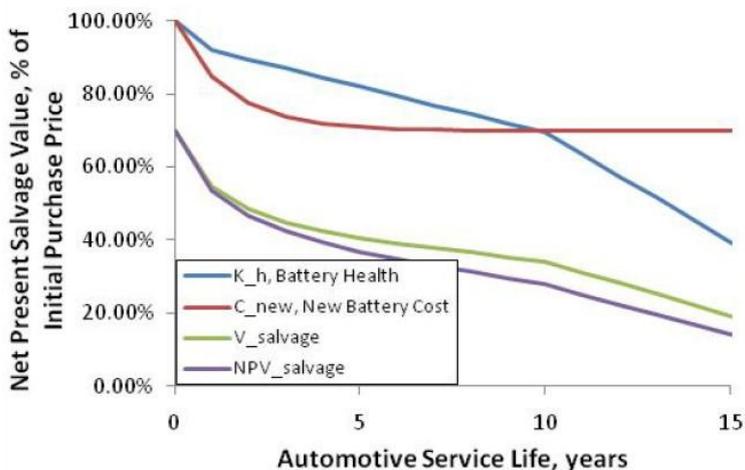


Figura 3: Valore economico residuo della batteria

Come è possibile osservare secondo queste previsioni al termine della prima fase automotive si ha ancora un valore economico residuo prossimo al 30% del prezzo iniziale. Ciò è immediatamente traducibile in uno sconto sul prezzo iniziale della batteria, a tutto vantaggio dell'utente. In questa analisi non è stato però considerato, sempre visibile dal grafico, che il costo delle batterie nuove è destinato a scendere anziché a rimanere costante: i valori residui e i relativi sconti sull'acquisto del nuovo sono pertanto destinati a scendere rispetto a quelli ipotizzati. Al fine di promuovere il riutilizzo degli accumuli appare necessario potenziare una fase di verifica delle performance, solitamente effettuata mediante test periodici in laboratorio e verifiche dirette sul campo dell'applicazione di interesse. Ulteriori più dettagliate valutazioni di costo sono riportate anche in [2].

In aggiunta all'analisi dei costi appare di un certo interesse effettuare anche una valutazione di impatto ambientale: ciò può effettuarsi attraverso una analisi completa del ciclo vita del sistema di accumulo, dalla

costruzione, all'utilizzo fino alla fase di smantellamento. Un esempio di LCA (Life Cycle Analysis) al riguardo è riportato in [3]. Prima parte dell'analisi è legata alla caratterizzazione dei sistemi di accumulo in esame dal punto di vista dell'invecchiamento, i cui risultati sono visibili nella figura seguente [3]: è infatti necessario conoscere il numero di cicli corrispondente a una capacità residua di batteria pari all'80% di quella iniziale, valore oltre il quale ha inizio la "second life" dell'accumulatore. Come è possibile osservare dal grafico la cella di impiego automotive può poi estendere la propria vita utile di oltre 1000 cicli, prima di raggiungere l'80% di capacità residua di una cella dedicata per applicazioni stazionarie. La caratterizzazione è stata effettuata prendendo a riferimento le procedure definite in [4].

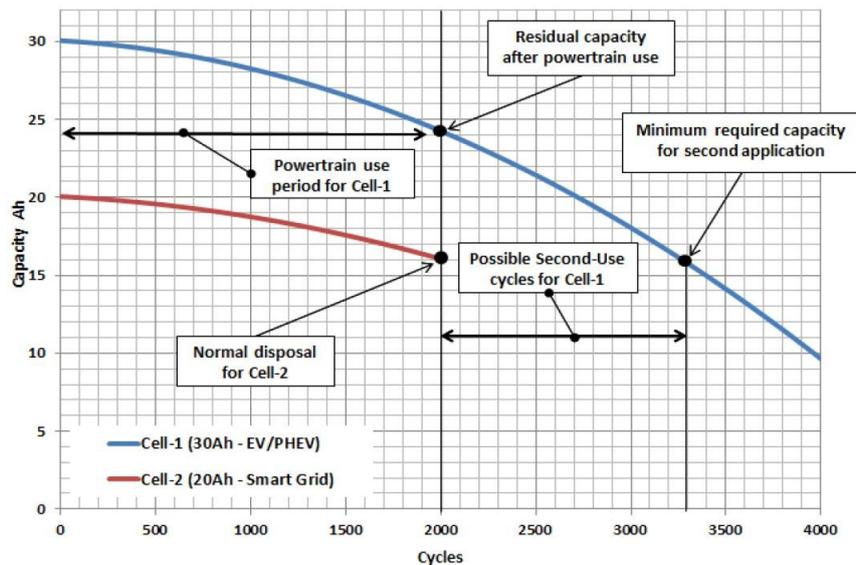


Figura 4: Risultati dei test di invecchiamento

L'impatto ambientale è stato poi valutato prendendo a riferimento l'influenza delle diverse fasi del ciclo vita sui fenomeni di riscaldamento globale, piogge acide ed eutrofizzazione: è stato così definito un punteggio finale complessivo, confrontato poi con quello ottenuto nell'ipotesi di non riutilizzo dell'accumulo. La possibilità di una "second life" per gli accumulatori comporta del resto un significativo risparmio sulla costruzione di nuove celle, in parte controbilanciato dall'utilizzo di accumulatori più scadenti, dal punto di vista dell'efficienza, durante la fase di vita utile. I risultati sono riassunti nella figura seguente [3], e mostrano una riduzione dell'indicatore di impatto ambientale attorno al 25% nel caso di riutilizzo dell'accumulo in un'applicazione stazionaria, al termine della prima fase di impiego automotive.

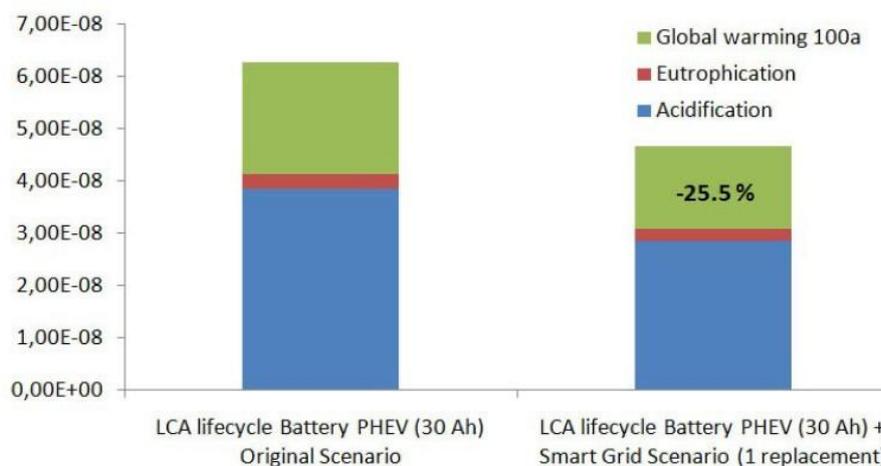


Figura 5: Risultati dell'analisi LCA

## 2. Il ciclo di lavoro

Come ricordato al paragrafo precedente gli accumulatori ritenuti non più idonei per applicazioni automotive vengono solitamente riutilizzati in ambito stazionario. La definizione di un ciclo realistico di prova deve dunque ipotizzare questo tipo di reimpiego. A tal fine sono stati analizzati alcuni diagrammi di carico per due diverse utenze tipo: una utenza domestica e un carico aggregato. In tutti i casi è possibile osservare come i picchi di potenza siano prevalentemente concentrati nella fascia oraria 10-15, oppure in quella 18-20. Una possibile logica di impiego dell'accumulo può dunque prevedere la scelta di un valore di riferimento della potenza erogata dalla rete al di sopra del quale la batteria fornisce il surplus di potenza richiesta, mentre al di sotto della quale viene ricaricata. La batteria viene in questo caso dimensionata in funzione del picco di potenza da fornire in scarica, approssimato ad arco di seno, e dell'energia richiesta nell'intervallo temporale di riferimento. Le condizioni di carica sono invece riferite alle ore notturne, solitamente alla fascia oraria 23-7: noto anche in questo caso l'intervallo temporale, il valore di potenza costante di riferimento viene determinato attraverso un bilancio energetico tra l'energia erogata in scarica e quella assorbita in carica. I valori di potenza sono espressi in p.u. al fine di generalizzare i cicli definiti. Di seguito si riportano i due cicli di riferimento selezionati per il carico aggregato e per l'utenza domestica.

### 2.1. Carico aggregato

Nella figura sottostante è possibile osservare il profilo di potenza assorbita da un carico aggregato. Il valore di potenza di riferimento erogata dalla rete, preso a riferimento per il dimensionamento dell'accumulo, è posizionato attorno a 30 kW.

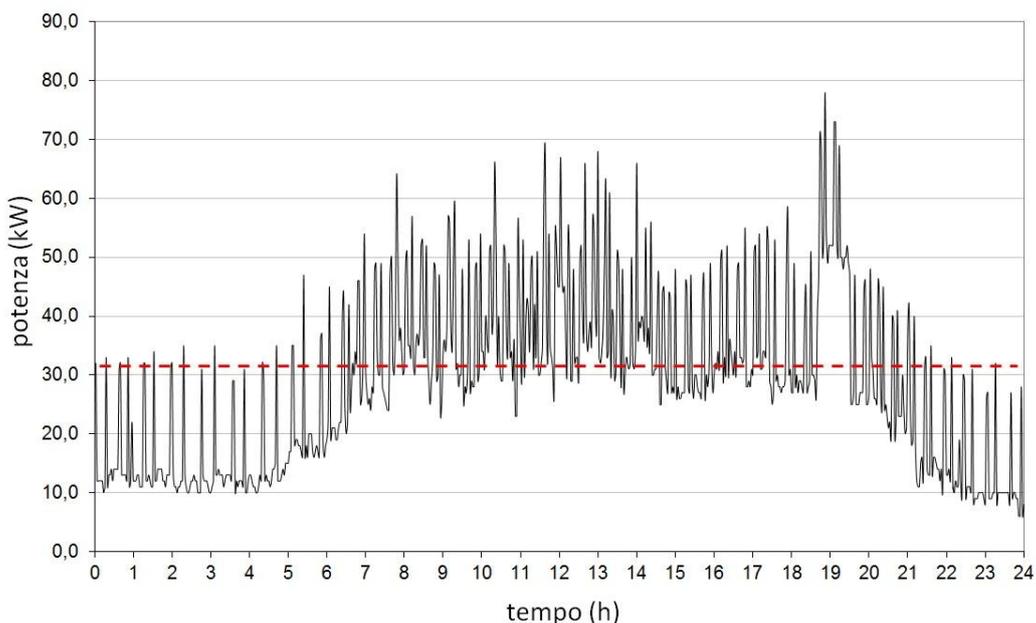


Figura 6: Diagramma di carico di riferimento, aggregato

A partire dal diagramma di carico è stato dunque ricavato un ciclo di prova di riferimento, della durata complessiva di 24 ore, nel quale sono sintetizzati due picchi di scarica approssimati ad arco di seno: il primo nella fascia 10-15 mentre il secondo, di ampiezza ridotta, posizionato nella fascia 18-20. La fase di carica è concentrata nelle ore notturne, e nell'intervallo tra i due archi di seno.

- $0 < t < t_1 \Rightarrow P_c = C$
- $t_1 < t < t_2 \Rightarrow P = 0$
- $t_2 < t < t_3 \Rightarrow P_{s1} = \sin\left(\pi \frac{t-t_2}{t_3-t_2}\right)$
- $t_3 < t < t_4 \Rightarrow P_c = C$
- $t_4 < t < t_5 \Rightarrow P_{s2} = K \sin\left(\pi \frac{t-t_4}{t_5-t_4}\right)$
- $t_5 < t < t_6 \Rightarrow P = 0$
- $t_6 < t < t_7 \Rightarrow P_c = C$
- $\int_{t_2}^{t_3} P_{s1} dt + \int_{t_4}^{t_5} P_{s2} dt = P_c(t_1 + t_4 - t_3 + t_7 - t_6)$

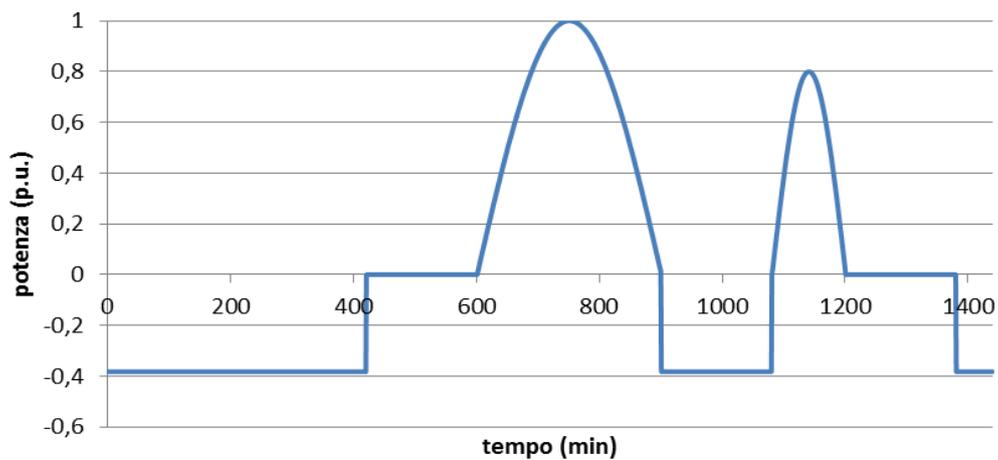


Figura 7: Ciclo a doppio picco

## 2.2. Utenza domestica

Nella figura sottostante è invece possibile osservare il profilo di potenza assorbita da una utenza domestica. Il valore di potenza di riferimento erogata dalla rete, preso a riferimento per il dimensionamento dell'accumulo, è posizionato attorno a 3 kW.

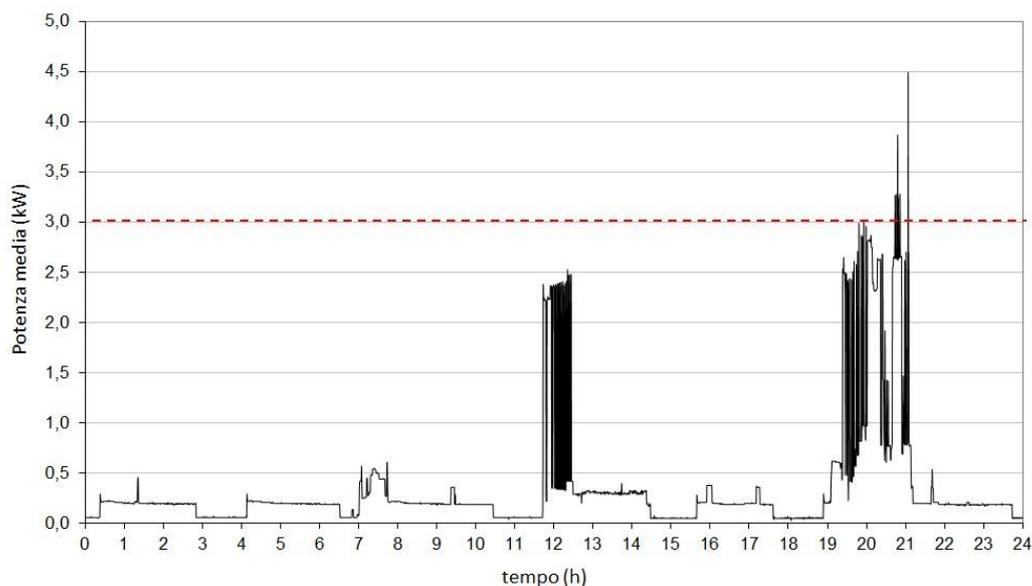


Figura 8: Diagramma di carico di riferimento, utenza domestica

Come è possibile osservare il ciclo presenta un picco di potenza (riportata sempre in p.u.) centrato nell'intervallo serale 20-21, mentre gli intervalli di carica sono stati invece definiti ipotizzando una procedura di carica a potenza costante nelle ore notturne (23-7): l'ampiezza è stata come di consueto ricavata ipotizzando un bilanciamento complessivo nullo tra energia erogata e assorbita.

Si ha cioè:

- $0 < t < t_1 \Rightarrow P_c = C$
- $t_1 < t < t_2 \Rightarrow P = 0$
- $t_2 < t < t_3 \Rightarrow P_s = \sin\left(\pi \frac{t-t_2}{t_3-t_2}\right)$
- $t_3 < t < t_4 \Rightarrow P = 0$
- $t_4 < t < t_5 \Rightarrow P_c = C$
- $\int_{t_2}^{t_3} P_s dt = P_c(t_1 + t_5 - t_4)$

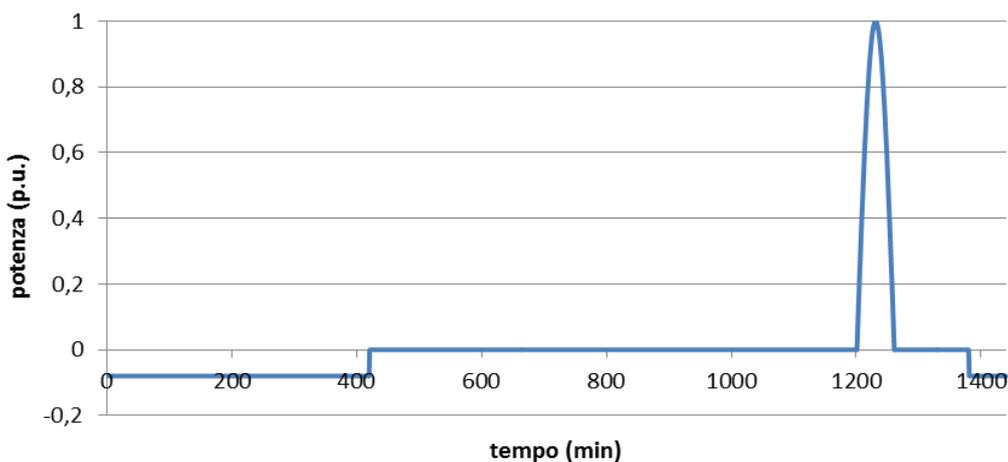


Figura 9: Ciclo a singolo picco

### 3. Implementazione del ciclo

Questa parte del documento descrive come implementare il ciclo di lavoro cui la cella o la batteria devono essere sottoposti. Il ciclo è definito come una sequenza ordinata di diverse fasi, di seguito riportate nel seguente elenco:

- NO (nessuna operazione).
- CI (carica a corrente costante).
- CL (carica a corrente linearmente crescente/decrescente).
- CV (carica a tensione costante).
- SI (scarica a corrente costante).
- SL (scarica a corrente linearmente crescente/decrescente).

Come è possibile osservare oltre alle procedure di carica e scarica a corrente costante sono presenti anche fasi di carica e scarica lineari. La possibilità di implementare cariche e scariche lineari è di un certo interesse specie nell'approssimazione di profili complessi, oppure nella riproduzione di test che simulano i profili di utilizzo dell'accumulo per veicoli elettrici e ibridi. Per ciascuna fase caratteristica si riportano una serie di parametri tipici di utilizzo, esplicitati nella tabella seguente.

- NO = NO ( $D_{Max}$ )
- CI = CI ( $I, V_{Lim}, T_{Lim}, D_{Max}, V_{alim}, T_{Max}$ )
- CV = CV ( $V, I_{Lim}, T_{Lim}, D_{Max}, I_{alim}, T_{Max}$ )
- SI = SI ( $I, V_{Lim}, T_{Lim}, D_{Max}, T_{Max}$ )

Tabella 1: parametri per l'implementazione del ciclo

Parametro	Descrizione
$D_{Max}$	Durata massima della parte attiva di ciascuna fase.
$V$	Tensione richiesta.
$I$	Corrente richiesta.
$V_{Lim}$	Tensione limite oltre la quale, trascorso il relativo tempo $T_{Lim}$ , si passa alla pausa di fine fase.
$I_{Lim}$	Corrente limite al di sotto della quale, trascorso il relativo tempo $T_{Lim}$ , si passa alla pausa di fine carica a tensione costante.
$T_{Lim}$	Tempo che occorre attendere dopo il superamento della $V_{Lim}$ o $I_{Lim}$ , prima della pausa di fine fase.
$V_{alim}$	Tensione limite richiesta all'alimentatore durante le fasi di tipo CI.
$I_{alim}$	Corrente limite richiesta all'alimentatore durante le fasi di tipo CV.
$T_{Max}$	Temperatura massima ammissibile.

In aggiunta ai parametri operativi tipici (durata massima, tensione e corrente richieste) sono presenti anche alcuni controlli di sicurezza: uno sulla tensione limite inferiore (in scarica) o superiore (in carica), l'altro sulla temperatura: al raggiungimento dei valori preimpostati la fase in corso viene interrotta. Gli altri parametri definiscono invece le condizioni operative durante la carica di tipo I-U, formata da una fase a corrente costante seguita da una a tensione costante.

Per quanto riguarda le fasi di carica e scarica lineari, queste ultime si definiscono in maniera analoga alle fasi CI e SI con l'aggiunta di ulteriori tre parametri che definiscono il profilo lineare desiderato: il valore di corrente iniziale, un tempo di attesa durante il quale si mantiene il valore di corrente costante, la pendenza, ovvero l'incremento o il decremento di corrente nell'unità di tempo, e la durata totale della rampa.

#### 4. Verifica della capacità residua

Dopo un certo numero di cicli è importante verificare di quanto il valore di capacità della batteria si sia ridotto rispetto a quello iniziale. Tipicamente la batteria si considera a fine vita quando il valore di capacità estratta è pari all'80% di quello nominale. La procedura implementata prevede dunque, al termine di un certo numero di cicli, una carica completa di tipo I-U (ad una fase di carica a corrente costante segue cioè una fase a tensione costante). Terminata la carica ha inizio, dopo una pausa di alcuni minuti, la fase di scarica fino al valore minimo di tensione ammesso dal costruttore. In questa fase viene misurata la capacità estratta dal sistema di accumulo. Sia la carica che la scarica avvengono a correnti piuttosto basse, pari al valore della capacità nominale (1C). Si riassumono di seguito la sequenza e i parametri impostati durante i test di una cella al litio ad alta potenza.

- Carica I-U: fase a corrente costante pari a 1C (nel caso in esame pari a 7,2 A), fase a tensione costante pari al valore massimo ammesso dal costruttore (nel caso in esame pari a 4,2 V). La fase viene interrotta quando la corrente scende sotto un valore limite inferiore (nel caso in esame pari a 0,3 A).
- Pausa, nel caso in esame pari a 600 secondi.
- Scarica a corrente costante pari a 1C (nel caso in esame pari a 7,2 A) fino al valore di tensione minimo ammesso (nel caso in esame pari a 2,8 V).

Tabella 2: parametri operativi per verifica di capacità

Fase	V (V)	I <sub>Lim</sub> (A)	T <sub>Lim</sub> (s)	I <sub>alim</sub> (A)	T <sub>Max</sub> (°C)
CV	4,2	0,3	0	7,2	60
Fase	T <sub>Max</sub> (s)				
NO	600				
Fase	I (A)	V <sub>Lim</sub> (V)	T <sub>Max</sub> (°C)		
SI	7,2	2,8	60		

### 5. Implementazione di un controllo dello stato di carica

Uno dei problemi più frequenti durante l'esecuzione dei test di durata è che una cella sottoposta a una serie di cicli finisce progressivamente per scaricarsi o caricarsi dopo un certo numero di iterazioni. Ciò provoca una situazione quale quella riportata nella figura seguente, in cui la cella si posiziona su una condizione di lavoro significativamente diversa da quella iniziale. Tra l'altro il controllo sulla tensione limite finisce per alterare significativamente il ciclo, interrompendo ogni singola fase al raggiungimento della tensione massima o minima (in questo caso come si vede è il valore minimo a determinare il passaggio alla fase successiva) ammissibile.

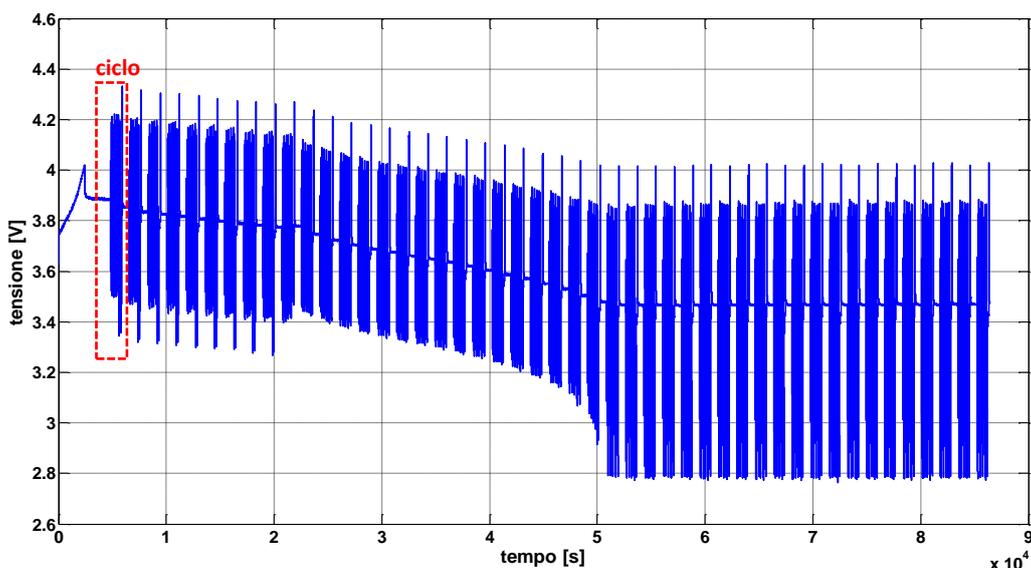


Figura 10: Ripetizione di cicli a stato di carica non bilanciato

Al fine di effettuare prove di lunga durata è dunque necessario implementare un controllo che verifichi la tensione alla fine di ogni ciclo e implementi una correzione, in carica o scarica, per riportare il valore della tensione a un valore di riferimento preimpostato. Se la differenza tra tensione misurata e tensione di riferimento supera in modulo un valore di riferimento (nel caso in esame ad esempio pari a 0,030 V) si attiva una correzione in scarica o carica, a seconda che la differenza sia rispettivamente positiva o negativa, a corrente costante pari a 1C (in questo caso 7,2 A). La durata di queste fasi è proporzionale alla differenza di tensioni misurate, secondo il legame esistente tra carica e tensione di rilassamento rilevato durante la prova di OCV, riportata in basso per la cella in esame.

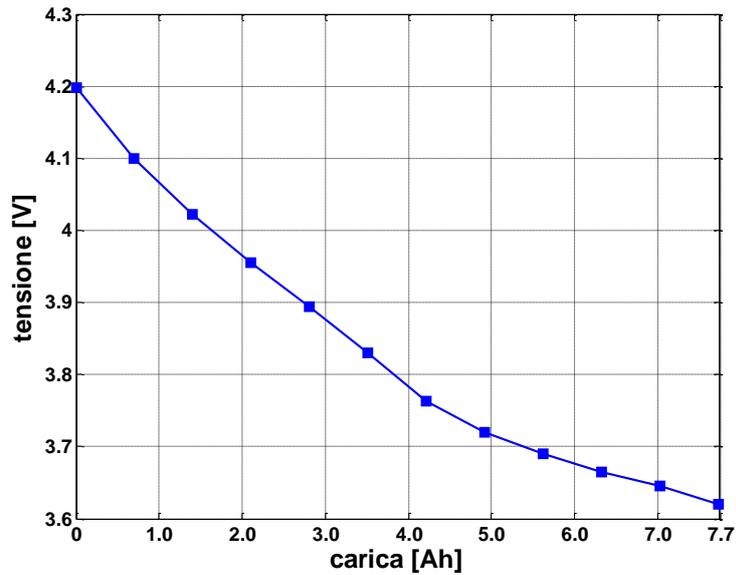


Figura 11: Curva OCV per la cella in esame

Come tensione di riferimento si è scelto in questo caso un valore pari a 3,85 V, corrispondente per la cella utilizzata a circa il 60% dello stato di carica. Nei due grafici riportati di seguito è visibile la correzione in carica effettuata al termine di ciascun ciclo di prova, dopo un tempo di rilassamento di 600 secondi.

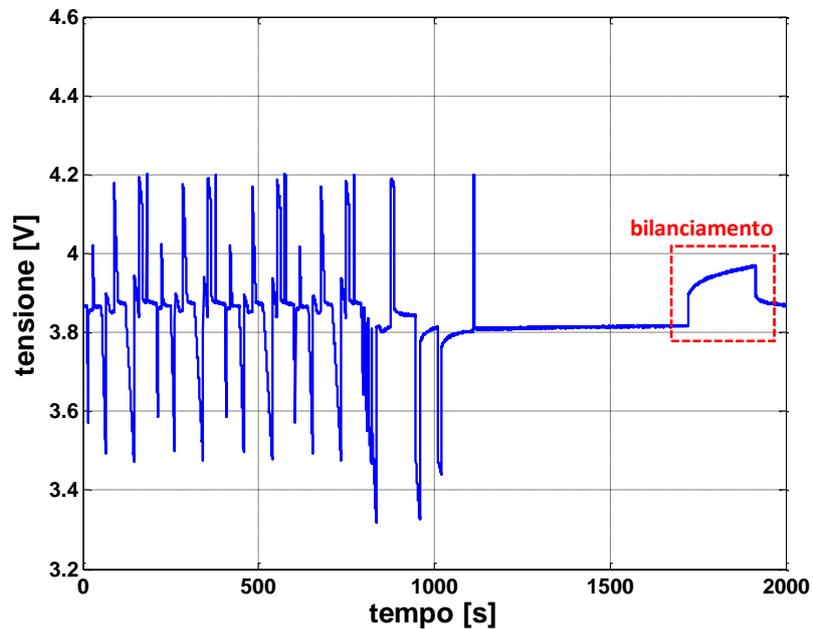


Figura 12: Fase di bilanciamento a fine ciclo, tensione

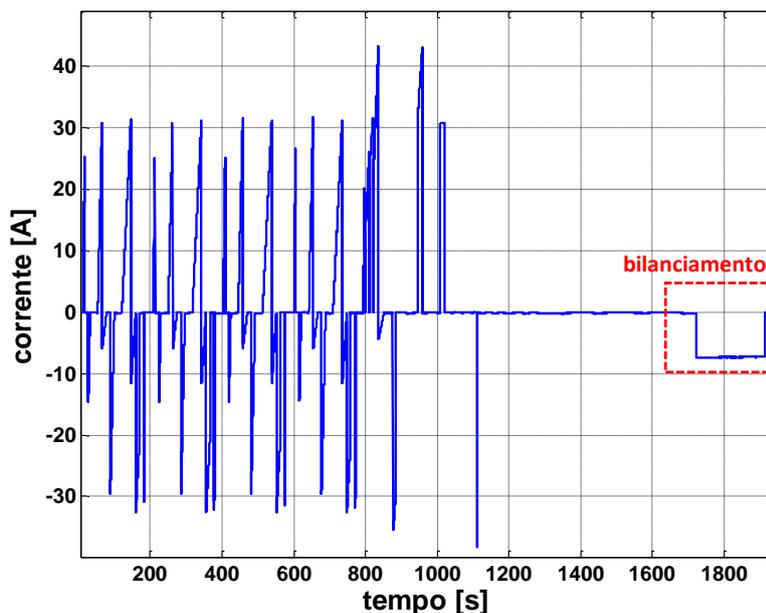


Figura 13: Fase di bilanciamento a fine ciclo, corrente

### 6. Caso studio

Si riporta infine a puro titolo esemplificativo il risultato di un'attività sperimentale di caratterizzazione di una cella al litio ad alta potenza sottoposta a un ciclo di impiego tipico di un veicolo ibrido impegnato in un ciclo di prova standard (NEDC). I test effettuati sono composti da una serie di ripetizioni consecutive della sequenza sotto riportata:

- Fase di bilanciamento dello stato di carica. Il valore di riferimento utilizzato nel caso in esame è pari al 60%.
- Esecuzione ripetuta di 136 cicli. Il numero di cicli scelto corrisponde ad una percorrenza equivalente pari a circa 1400 km.
- Fase di controllo della capacità estratta. Il controllo della capacità avviene secondo le modalità prima menzionate.

I risultati ottenuti sono riassunti nella figura seguente. Come è stato possibile osservare la percorrenza complessiva, pari a circa 10 000 km, non ha in questo caso inciso significativamente sulla vita dell'accumulo, notandosi una differenza di capacità estratta prossima al 2% di quella iniziale. Per una descrizione più approfondita dell'attività si rimanda a [5].

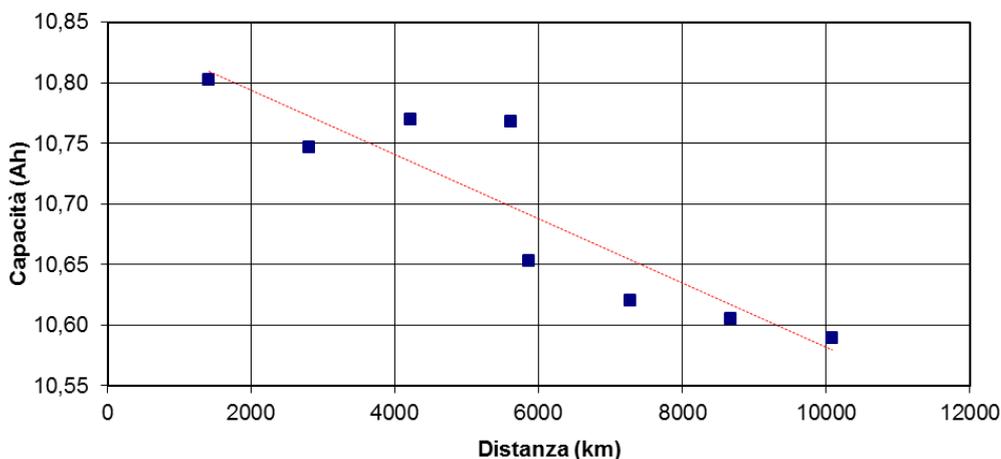


Figura 14: Risultati test di invecchiamento per applicazione stradale

## Conclusioni

Con il presente documento sono state descritte alcune procedure di caratterizzazione di accumulatori al Litio da utilizzarsi in applicazioni stazionarie, una volta terminato il primo impiego a bordo di veicoli elettrici. L'effettivo stato di invecchiamento può essere rilevato attraverso l'implementazione delle procedure di prova descritte. I risultati in termini di capacità residua in funzione del numero di cicli trascorsi offrono, come mostrato nel caso studio, la possibilità di effettuare valutazioni di natura tecnico-economica relativamente alla residua parte di vita utile dei sistemi di accumulo in esame.

## Riferimenti bibliografici

1. J. Neubauer, A. Pesaran, "NREL's PHEV/EV Li-ion Battery Secondary-Use Project", *Advanced Automotive Batteries Conference (AABC) 2010*, Orlando, Florida.
2. J. Neubauer, A. Pesaran, "The Ability of Battery Second Use Strategies to Impact Plug-in Electric Vehicle Prices and Serve Utility Energy Storage Applications" *Journal of Power Sources*, 196, pp. 10351-10358, 2011.
3. P. Cicconi, D. Landi, A. Morbidoni, M. Germani, "Feasibility analysis of second life applications for Li-Ion cells used in electric powertrain using environmental indicators", *2<sup>nd</sup> IEEE ENERGYCON Conference & Exhibition*, 2012, Florence, Italy.
4. M. Conte, F.V. Conte, I.D. Bloom, K. Morita, T. Ikeya, J. R. Belt, "Ageing Testing Procedures on Lithium Batteries in an International Collaboration Context", *25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition*, Idaho National Laboratory, INL/CON-10-19698, 2010.
5. M. Ceraolo, G. Lutzemberger, M. Marracci: "High power Lithium batteries usage in hybrid vehicles". *IEEE VPPC 2010, Vehicle Power and Propulsion Conference*. Lille, 1-3/9/2010.

## Appendice

### Curriculum scientifico degli autori

#### **Massimo Ceraolo**

Born in 1960, he took his Ms Degree in Electrical Engineering from the University of Pisa, with honours, in 1985.

He is full professor of Electric Power Systems since 2002, and teaches on-board Electrical Systems at the University of Pisa and *Accademia Navale* of Livorno.

He is author or co-author of more than 90 National and International scientific papers, mainly regarding electrochemical energy storage, and electric and hybrid vehicles.

Up to 2011, and for a period of 8 years, he has coordinated the PhD Program on "Land Vehicles and Transport Systems" of the University of Pisa.

He is member of the directing board of CIVES, Italian subsidiary of AVERE (European Association for battery, Hybrid and Fuel cell Electric Vehicles).

#### **Romano Giglioli**

Nato a San Gimignano (SI) il 02/06/1951, laureato con lode in Ingegneria Elettrotecnica nel 1976, nello stesso anno ha ricevuto il premio di Economia e Tecnica dell'Energia "G. Levi Cases".

Dal 1994 è Professore Ordinario e ricopre la cattedra di "Sistemi Elettrici per l'Energia e tecnica ed Economia dell'energia".

##### *Attività di ricerca*

Nell'arco di più di trenta anni di attività nel settore della ricerca, in collaborazione con strutture di ricerca pubbliche e private, sia nazionali che internazionali, ha contribuito, con studi teorici e sperimentali, all'innovazione e allo sviluppo di sistemi e dispositivi per la produzione, trasporto ed accumulo (in particolare elettrochimico) dell'energia elettrica e dei sistemi di conversione energetica, nonché dei sistemi di trasporto con propulsione elettrica ed ibrida. L'attività è testimoniata da oltre un centinaio di pubblicazioni, dalla titolarità di alcuni brevetti utilizzati nell'ambito dei sistemi elettrici per l'energia ed in quelli di conversione energetica e dalla realizzazione di numerosi sistemi e dispositivi prototipali.

Tale attività è stata ed è sviluppata anche come responsabile di numerosi contratti di ricerca e coordinatore di gruppi di lavoro nell'ambito dei Sistemi per l'Energia e di quelli per il Trasporto.

##### *Incarichi direttivi nell'ambito dell'Amministrazione Universitaria*

Dal 1995 al 2002 ha assunto l'incarico di Direttore del Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa.

Dal 2005 al 2009 è stato Direttore del Master post laurea "Pianificazione e gestione di sistemi per l'energia da fonti rinnovabili", istituito dall'Università di Pisa con ENEL Produzione, CONFINDUSTRIA, Kyoto Club, Legambiente.

Dal 2006 è nel comitato direttivo del consorzio Interuniversitario CRIBE per la ricerca sulle biomasse ad uso energetico, che ha contribuito a costituire.

Dal 2007 è nel comitato direttivo del consorzio Nazionale Interuniversitario ENSIEI per la ricerca sui Sistemi per l'Energia, che ha contribuito a costituire.

Dal gennaio 2007 è membro del Consiglio di Amministrazione dell'Università di Pisa

##### *Incarichi in strutture esterne all'Università*

Dal 2003 al 2009 è membro del Consiglio di Amministrazione della società ITALCERTIFER (del gruppo Ferrovie dello Stato), società per la ricerca nell'ambito dei sistemi di trasporto e per l'omologazione dei mezzi di trasporto ferroviario. Dal 2005 al 2008 è stato delegato italiano nel mirror europeo per le "smart grids". È coordinatore scientifico nell'ambito del Consorzio Regionale per l'energia CET, di cui è stato promotore. Dal maggio del 2007 è membro del Consiglio del CEI (Comitato Elettrotecnico Italiano per la normativa elettrica). Valutatore di progetti di sviluppo precompetitivo L.n. 46/82 per conto del Ministero

delle Attività Produttive e, per lo stesso Ministero, nel 2008 ha fatto parte del gruppo di esperti, con il compito di sviluppare l'analisi fattuale in ambito energia ed ambiente, per l'indirizzamento dei fondi strutturali per le regioni del mezzogiorno. Esperto per la valutazione dei progetti di Ricerca di Sistema per il Settore Elettrico per la CCSE. Esperto per la valutazione per il MIUR dei progetti PRIN e dei progetti PON.