



## Ricerca di Sistema elettrico

# Procedura di prova RSE-ENEA per batterie litio-ioni

*R. Lazzari, E. Micolano, M. Conte, F. Vellucci*

## PROCEDURA DI PROVA RSE-ENEA PER BATTERIE LITIO-IONI

R. Lazzari, E. Micolano (RSE)

M. Conte, F. Vellucci (ENEA)

Settembre 2013

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2012

Area: Governo, gestione e sviluppo del sistema elettrico nazionale

Progetto: Sistemi avanzati di accumulo dell'energia

Obiettivo: Progettazione, realizzazione e caratterizzazione di celle al litio con materiali innovativi

Responsabile del Progetto: Mario Conte, ENEA



Questa procedura è stato uno dei primi risultati del lavoro del Gruppo di Coordinamento "Ricerche su reti attive, generazione distribuita e sistemi di accumulo di energia elettrica" costituito da CNR, ENEA e RSE su indicazione del Ministero dello Sviluppo Economico nell'ambito del programma sulla Ricerca del Sistema Elettrico.

## Indice

SOMMARIO.....	5
SUMMARY .....	6
RIASSUNTO ESTESO .....	7
1 INTRODUZIONE .....	9
2 DOCUMENTI DI RIFERIMENTO .....	11
3 GLOSSARIO.....	12
4 PRESCRIZIONI GENERALI DI PROVA .....	13
4.1 TIPOLOGIE DEI CAMPIONI IN PROVA.....	13
4.2 ACCLIMATIZZAZIONE .....	13
4.3 CONNESSIONI .....	13
4.4 CIRCUITO DI PROVA .....	13
4.5 STRUMENTAZIONE DI PROVA .....	14
4.6 STRUMENTAZIONE DI MISURA .....	14
4.6.1 Accuratezza degli strumenti di misura.....	15
4.6.2 Taratura degli strumenti di misura .....	15
5 ASPETTI DI SICUREZZA .....	16
6 DISPOSIZIONI GENERALI.....	17
6.1 ISPEZIONE INIZIALE.....	17
6.2 ISPEZIONE FINALE .....	17
6.3 CARICA DELLE BATTERIE LITIO-IONI .....	17
6.3.1 Carica a fondo delle batterie litio-ioni.....	17
6.3.2 Carica standard delle batterie litio-ioni .....	18
6.4 SCARICA DELLE BATTERIE LITIO-IONI .....	18
6.4.1 Scarica a fondo delle batterie litio-ioni .....	18
6.4.2 Scarica standard delle batterie litio-ioni .....	18
6.5 CICLO STANDARD .....	18
6.6 CICLI DI PRECONDIZIONAMENTO .....	19
6.7 CICLI DI CARICA E SCARICA .....	19
6.8 STAND-BY .....	19
7 PROVE DI CARATTERIZZAZIONE DI BASE.....	20
PROVA DI SCARICA PARZIALE A CORRENTE COSTANTE A TEMPERATURA AMBIENTE .....	20
7.1 PROVA DI SCARICA A CORRENTE COSTANTE A TEMPERATURA AMBIENTE.....	20
7.2 PROVA DI SCARICA A CORRENTE COSTANTE IN TEMPERATURA .....	21
7.3 PROVA DI SCARICA PARZIALE A CORRENTE COSTANTE A TEMPERATURA AMBIENTE.....	22
7.4 PROVA PER LA STIMA DEL PICCO DI POTENZA E DELLA RESISTENZA INTERNA .....	23
7.5 PROVA PER LA MISURA DELLA RESISTENZA INTERNA SERIE .....	25
7.6 MISURA DELL'AUTOSCARICA.....	26
8 PROVE SPECIALISTICHE PER VEICOLO ELETTRICO .....	28
8.1 PROVA DI SCARICA DINAMICA .....	28
8.1.1 Ciclo di prova senza carica rigenerativa.....	28
8.1.2 Ciclo di prova con carica rigenerativa .....	29
8.2 CARICA RAPIDA .....	30

8.3	PROVA DI AVVIAMENTO A FREDDO .....	31
8.4	CICLI DI PROVA PER VEICOLO ELETTRICO IBRIDO .....	33
8.4.1	<i>Prova di sollecitazione dinamica per veicolo elettrico ibrido</i> .....	33
8.4.2	<i>Prova "potenza assistita" per veicolo elettrico ibrido</i> .....	35
8.5	CICLI DI PROVA PER VEICOLO PURAMENTE ELETTRICO .....	37
8.5.1	<i>Prova di sollecitazione dinamica per veicolo puramente elettrico</i> .....	37
8.5.2	<i>Prova bimodale alta potenza per veicolo puramente elettrico</i> .....	39
9	PROVE SPECIALISTICHE PER STAZIONARIO .....	42
9.1	MISURA DEGLI AUTOCONSUMI .....	42
9.2	PROVA PER TIME SHIFT .....	43
9.3	PROVA PER POWER BALANCING .....	45
10	CICLI DI VITA .....	48
10.1	CHECK-UP PARAMETRICO .....	48
10.2	PROVA CICLICA .....	48
11	ANALISI DEI RISULTATI DI TEST .....	50
11.1	CALCOLO DELLA CAPACITÀ .....	50
11.2	CALCOLO DELL'ENERGIA .....	50
11.3	CALCOLO DELLA POTENZA MEDIA .....	50
11.4	MISURA DEL RENDIMENTO AMPERORAMETRICO .....	50
11.5	MISURA DEL RENDIMENTO ENERGETICO .....	50
11.6	CALCOLO DELLA DENSITÀ DI ENERGIA .....	51
11.7	CALCOLO DELL'ENERGIA SPECIFICA .....	51
11.8	CALCOLO DELLA DENSITÀ DI POTENZA .....	51
11.9	CALCOLO DELLA POTENZA SPECIFICA .....	51
11.10	MISURA DEGLI AUTOCONSUMI .....	51
11.11	COSTRUZIONE DEL DIAGRAMMA DI RAGONE .....	51

## Sommario

Il documento descrive la procedura di prova per la caratterizzazione di una batteria litio-ioni al variare delle condizioni di lavoro. Lo scopo delle prove è l'analisi e il confronto delle prestazioni di batterie al litio-ioni, mediante la misura di alcuni parametri caratteristici dei sistemi di accumulo.

Il documento si compone di una parte introduttiva in cui sono descritti il circuito e la strumentazione di prova, le caratteristiche principali della tecnologia in prova, soffermandosi principalmente sugli aspetti gestionali e di sicurezza e vengono citati i documenti e le normative di riferimento.

Il corpo centrale del documento è la procedura vera e propria che è suddivisa in quattro sezioni:

- La prima sezione riguarda la caratterizzazione di base della batteria per la determinazione dei parametri caratteristici degli accumulatori elettrochimici in varie condizioni di lavoro.
- La seconda sezione riguarda la caratterizzazione della batteria in cicli di lavoro tipici del veicolo elettrico, sia ibrido che puramente elettrico.
- La terza sezione riguarda la caratterizzazione della batteria in cicli di lavoro tipici delle applicazioni nello stazionario, a sostegno della rete elettrica e in accoppiamento con generatori a fonte rinnovabile.
- La quarta sezione riguarda la procedura da seguire per la determinazione della vita utile di un accumulatore litio-ioni, sia per le applicazioni nello stazionario, che in quelle veicolari.

## SUMMARY

The document describes the procedure for the characterization of a lithium-ion battery in different working conditions. The aim of the tests is the analysis and the comparison of the performances of lithium-ion batteries through the measure of some parameters characteristic of the energy storage systems.

The document consists of an introductory part which describes the test circuit and instrumentation and the main characteristics of the device under test, focusing on the management and safety aspects, moreover some documents and regulations are reported.

The core of the document is the actual procedure, divided into four main sections:

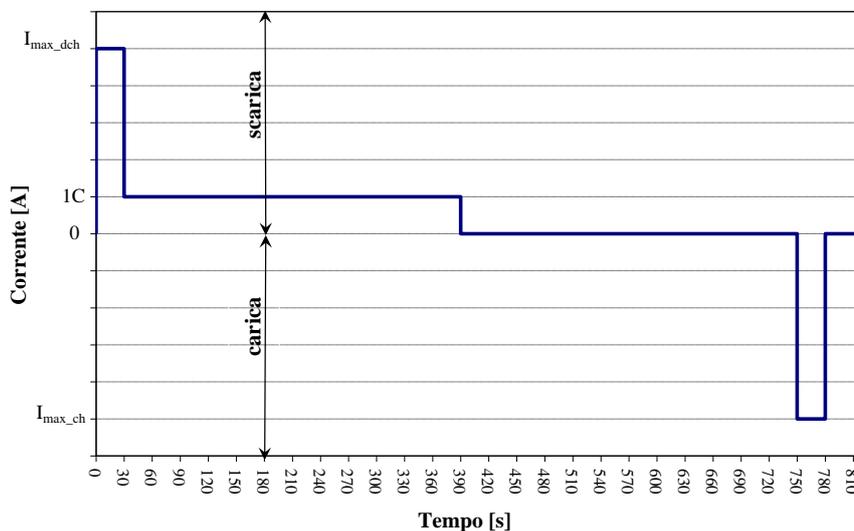
- The first section describes the basic characterization tests for the determination of the characteristic parameters of the electrochemical energy storage systems in different working conditions.
- The second section concerns the vehicular characterizations tests, both for full electric vehicle and hybrid electric vehicle
- The third section concerns the stationary characterizations tests for grid-connected energy storage systems applications, such as the Time-Shift and the renewable energy integration.
- The fourth section describes the life-cycle tests, both for vehicular and stationary applications.

## RIASSUNTO ESTESO

Le batterie litio-ioni sono caratterizzate da buone prestazioni in termini di energia e potenza specifica, rendimento amperometrico unitario e rendimento energetico molto elevato, oltre ad una elevata vita attesa e sono oggi le batterie più adatte sia per un utilizzo di tipo veicolare, che nello stazionario. Esistono numerose tipologie di batterie litio-ioni caratterizzate da prestazioni e costi differenti; per questo motivo è importante definire dei parametri di riferimento e dei metodi di misura per tali parametri che permettano di confrontare tra loro le diverse tecnologie esistenti. L'oggetto del documento è una procedura di prova per una batteria di accumulatori litio-ioni.

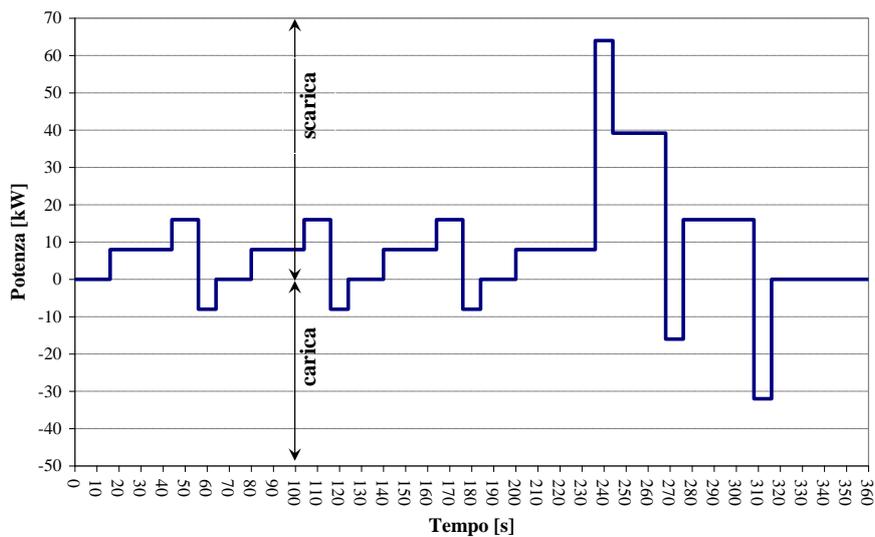
La procedura di prova si compone di una parte introduttiva che descrive il circuito e la strumentazione di prova, soffermandosi in particolare sugli aspetti generali di gestione e sicurezza.

Il corpo centrale della procedura è diviso in tre parti, la prima relativa alle prove di caratterizzazione di base, il cui obiettivo è identificare i parametri caratteristici delle batterie al variare delle condizioni di lavoro tramite semplici cicli di carica e scarica a corrente o potenza costante in condizioni di temperatura controllate.



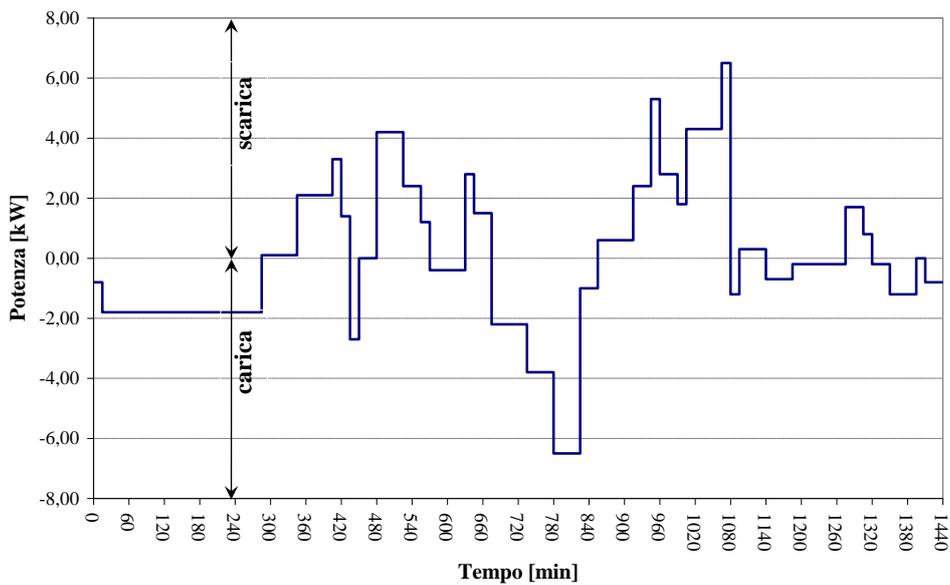
**Esempio di ciclo di prova di scarica e carica della batteria per il calcolo del picco di potenza**

La seconda parte della procedura descrive una serie di prove specialistiche il cui obiettivo è la verifica dell'attitudine della batteria ad essere utilizzata per l'applicazione veicolare. In questo tipo di applicazione, sia che si tratti di un veicolo ibrido che puramente elettrico, la batteria è sottoposta a continui cicli di scarica e carica di diversa intensità e durata, per cui le batterie devono essere in grado di lavorare in un'ampia gamma di regimi di corrente ed essere in grado di assorbire un'elevata corrente di ricarica nelle fasi di frenatura rigenerativa. Le prove specialistiche descritte nella procedura sono state messe a punto sulla base dei manuali di test per batterie per applicazioni veicolari pubblicate dal consorzio USABC, e dal comitato EUCAR (a loro volta basate sui cicli utilizzati per la misura dei consumi dei veicoli in fase di omologazione come il ciclo di omologazione ECE-15 o il ciclo di omologazione SFUDS) e riportate nelle norme CEI ed ISO.



**Esempio di ciclo di prova per l'applicazione veicolare: prova di sollecitazione dinamica**

La terza sezione riguarda la caratterizzazione della batteria in cicli di lavoro tipici delle applicazioni nello stazionario, a supporto della rete elettrica e in accoppiamento con generatori a fonte rinnovabile.



**Esempio di ciclo di prova per l'applicazione stazionaria: prova per Power Balancing**

La quarta sezione riguarda le prove da effettuare per la verifica della vita utile della batteria in funzione dell'applicazione.

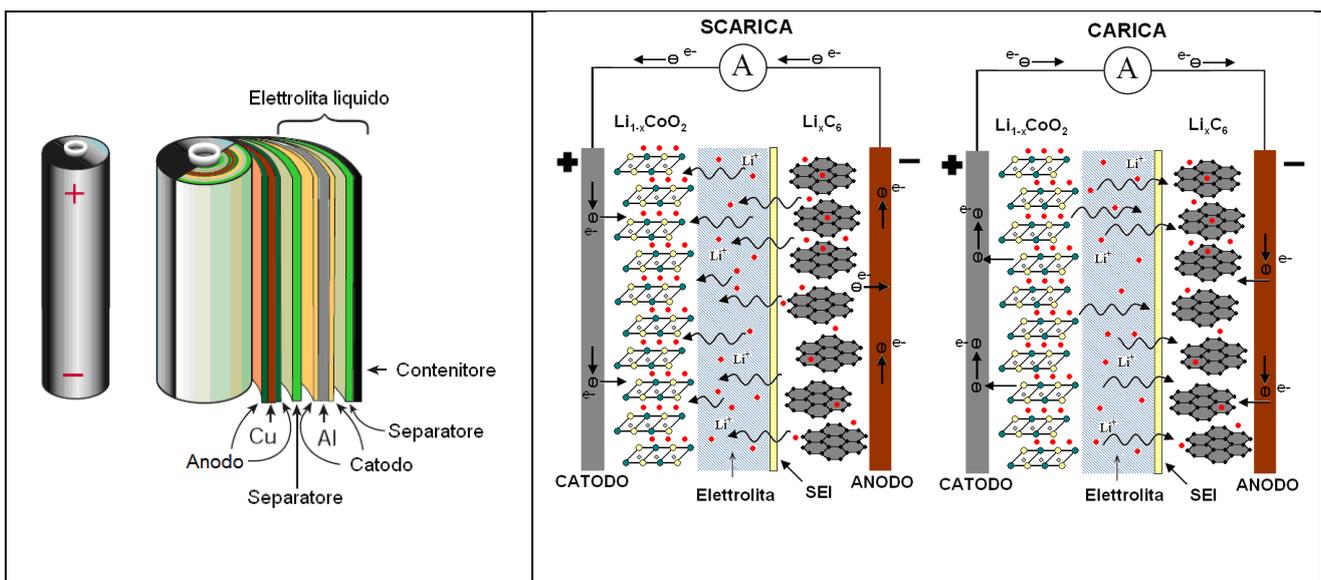
## 1 Introduzione

Le batterie litio-ioni sono ad oggi una delle più promettenti tecnologie di accumulo elettrochimiche e sono caratterizzate da ottime prestazioni in termini di energia e potenza specifica, altissimo rendimento energetico e vita attesa molto lunga. Il litio è il metallo con il più basso peso atomico, ha un potenziale standard molto elevato (-3,04 V) ed ha una capacità specifica molto alta, pari a 3,86 Ah/kg. Queste caratteristiche lo rendono l'elemento di elezione per la realizzazione di batterie con elevata energia specifica. Le batterie litio-ioni sono una tecnologia relativamente giovane, dal momento che il loro sviluppo è stato avviato negli anni '70 e la prima batteria ricaricabile agli ioni di litio è stata commercializzata nel 1991.

Una batteria litio-ioni è composta da sottili strati costituenti il catodo, il separatore e l'anodo, immersi in un elettrolita che permette il trasporto degli ioni litio. In una batteria *litio-ioni* il catodo è solitamente costituito da un ossido litiato di un metallo di transizione ( $\text{LiTMO}_2$  con  $TM = \text{Co, Ni, Mn}$ ), che garantisce una struttura a strati o a tunnel dove gli ioni litio possono essere inseriti ed estratti facilmente. L'anodo è generalmente costituito da grafite allo stato litiato,  $\text{Li}_x\text{C}_6$  ( $0 < x < 1$ ) in cui ogni atomo è legato ad altri tre in un piano composto di anelli esagonali fusi assieme e che grazie alla delocalizzazione della nuvola elettronica conduce l'elettricità. L'elettrolita è composto tipicamente da sali di litio, come l'esafluorofosfato di litio ( $\text{LiPF}_6$ ), disciolti in una miscela di solventi organici (carbonato di dimetile e di etilene) e la membrana separatrice è costituita normalmente da polietilene o polipropilene.

In tutte le batterie al litio durante le reazioni di ossidoriduzione associate ai processi di carica e scarica, gli ioni litio migrano da un elettrodo all'altro reversibilmente. Durante il processo di carica dell'accumulatore lo ione litio viene estratto dall'ossido metallico costituente il catodo e trasferito all'anodo, mentre gli elettroni migrano dal catodo all'anodo attraverso il circuito esterno, il metallo del catodo viene quindi ossidato. All'anodo, il processo di carica determina l'intrappolamento dello ione litio, che si riduce a litio nella matrice di grafite acquisendo gli elettroni provenienti dal circuito esterno. Durante la scarica il litio intercalato nella matrice di grafite si ossida rilasciando all'esterno gli elettroni mentre gli ioni litio migrano attraverso l'elettrolita al catodo che viene ridotto.

Nella Figura 1 è riportata la struttura di una cella al litio cilindrica e il meccanismo di carica e scarica per una cella con catodo in ossido litiato di cobalto  $\text{LiCoO}_2$ , anodo in grafite ed elettrolita allo stato liquido.



**Figura 1. Cella cilindrica litio-ioni e reazioni di carica e scarica.**

La famiglia delle batterie agli ioni di litio comprende molte sottocategorie, caratterizzate da una stessa struttura di base ma differenziate principalmente sulla base dei materiali elettrodici e degli elettroliti.

Ciascuna combinazione presenta differenti vantaggi e svantaggi in termini di energia specifica, potenza specifica, vita, costi e sicurezza, ma non esiste una tecnologia in assoluto ottimale.

Le prestazioni delle celle litio-ioni dipendono oltre che dalla tipologia di materiali elettrodi utilizzati anche dai processi realizzativi della cella. La stessa tipologia di cella può essere realizzata per applicazioni in potenza oppure in energia. Per tale ragione in commercio è possibile trovare una grande varietà di celle al litio i cui parametri prestazionali sono indicati in tabella 1.

**Tabella 1. Parametri prestazionali tipici per le celle litio-ioni.**

<b>Parametro</b>	<b>Valore Tipico</b>	<b>Commento</b>
<b>Capacità delle celle [Ah]</b>	0,1 ÷ 10000	Le celle in commercio coprono un ampio range di capacità, ma le celle maggiormente diffuse hanno una capacità tipica dell'ordine dei 10 Ah.
<b>Potenza specifica [W/kg]</b>	200 ÷ 3000	Questi parametri sono influenzati dai materiali elettrodi oltre che dalla realizzazione della cella, che può essere in potenza o in energia
<b>Energia specifica [Wh/kg]</b>	40 ÷ 180	
<b>Efficienza energetica [%]</b>	80 ÷ 95	
<b>Efficienza amperometrica [%]</b>	100	
<b>Regime di scarica tipico (C rate)</b>	C/3 ÷ 2C	Le celle possono essere realizzate per applicazioni in potenza o in energia, e presentano valori di corrente differenti.
<b>Massima corrente in scarica e in carica (C rate)</b>	1C ÷ 100C in scarica C/2 ÷ 10C in carica	
<b>Autoscarica mensile [%]</b>	< 1	
<b>Vita attesa DOD 80% [cicli]</b>	1500÷5000	Dipende dalla tipologia di cella
<b>Range di temperatura di lavoro</b>	-30 ÷ 60°C in scarica 0 ÷ 60°C in carica	Le celle con elettrodi in grafite non permettono la carica a temperatura inferiori ai 0°C, mentre l'anodo in titanato di litio garantisce un intervallo di temperatura in carica più ampio (fino a -30°C).
<b>Ausiliari necessari</b>	Sistema di bilanciamento BMS	Il sistema di condizionamento della temperatura è opzionale per queste celle, anche se la presenza di tale dispositivo risulta molto utile.

## 2 Documenti di Riferimento

- a) CEI EN 50110-1 (2004-11) Esercizio degli impianti elettrici.
- b) CEI EN 50191 (2001-09) Installazione ed esercizio degli impianti elettrici di prova
- c) CEI EN 61982-2 “Batterie per la propulsione di veicoli elettrici, Parte 2: Prova di prestazione di scarica dinamica e prova di durata dinamica”
- d) CEI EN 61982-3 “Batterie per la propulsione di veicoli elettrici, Parte 3: Prove di prestazioni e di durata (compatibilità con la circolazione, veicoli per uso urbano)
- e) “Electric Vehicle Battery Test Procedures Manual”, USABC Battery test procedure working group, gennaio 1996
- f) “Battery Test Manual for Plug-In Hybrid Electric Vehicle”, U.S. Department of Energy, marzo 2008
- g) ISO WD12405-1 “Electrically propelled road vehicles – Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems – Part 1: High power application”
- h) ISO WD12405-2 “Electrically propelled road vehicles – Test specification for lithium-ion traction battery packs and systems – Part 1: High energy application”
- i) EUCAR Traction Battery Working Group “Specification of test procedures for Hybrid Electric Vehicle Traction Batteries”
- j) IEC-CEI 61982-4 © IEC:200X “SECONDARY BATTERIES FOR THE PROPULSION OF ELECTRIC ROAD VEHICLES – Part 4: Performance testing for lithium-ion cells
- k) EUCAR, EC LIBERAL Project, “Operational Profiles & Accelerated Battery Life Test Procedures Final Issue”, July 2006 CONFIDENTIAL.

### 3 Glossario

BMS	Battery Management System: sistema elettronico di controllo e gestione della batteria
CC	Corrente costante: modalità di funzionamento della batteria, in cui la corrente è mantenuta costante
CV	Tensione costante: modalità di funzionamento della batteria, in cui la tensione è mantenuta costante
$C_n$	Capacità della batteria: carica elettrica, espressa in Ah, scaricata dalla batteria in “n” ore; si indicherà nel seguito con C la capacità al regime dell’ora
$C_{SC}$	Autoconsumo amperometrico: capacità in Ah/gg, persa lasciando la batteria in stand-by con il suo BMS acceso
$C_{SD}$	Autoscarica amperometrica: capacità in Ah/gg, persa lasciando la batteria a vuoto e con BMS spento
DC	Corrente Continua
DOD	Profondità di scarica: definisce il livello di scarica della batteria rispetto al valore massimo
$E_{ch}$	Energia caricata
$E_{dch}$	Energia scaricata
$E_{SC}$	Autoconsumo energetico: energia in Wh/gg, persa lasciando la batteria in stand-by con il suo BMS acceso
$E_{SD}$	Autoscarica energetica: energia in Wh/gg, persa lasciando la batteria a vuoto e con BMS spento
EUCAR	European Car Research Committee
fs	Fattore di scala: fattore di ridimensionamento dei set-up di prova
$I_{max\_ch}$	Corrente massima di carica
$I_{max\_dch}$	Corrente massima di scarica
OCV	Tensione a circuito aperto: tensione a cui si trova la batteria quando scollegata dal circuito
$P_{ch}$	Potenza di picco in carica
$P_{dch}$	Potenza di picco in scarica
$R_{ch}$	Resistenza interna in carica
$R_{dch}$	Resistenza interna in scarica
$R_S$	Resistenza serie della batteria, responsabile del solo salto ohmico
SOC	Stato di carica: definisce il livello di carica della batteria rispetto al valore massimo
USABC	United States Advanced Battery Consortium
$V_{min}$	Tensione minima di batteria: valore minimo di tensione consentito per la batteria
$V_{max}$	Tensione massima di batteria: valore massimo di tensione consentito per la batteria
$\Delta I$	Variazione della corrente di lavoro della batteria
$\Delta V$	Variazione della tensione di lavoro della batteria
$\eta_E$	rendimento energetico
$\eta_C$	rendimento amperometrico

## 4 Prescrizioni generali di prova

### 4.1 Tipologie dei campioni in prova

Le prove possono essere condotte su quattro diverse tipologie di campione:

- Singole celle: le prove sono condotte su singole celle litio-ioni. Per ottenere risultati statisticamente significativi occorre effettuare le prove su un numero di celle compreso tra tre a dieci.
- Moduli con solo bilanciamento: le prove sono condotte su moduli costituiti da celle singole in cui è presente il solo circuito di bilanciamento attivo o passivo. Per motivi di sicurezza occorre misurare durante le prove di caratterizzazione tutte le tensioni delle celle componenti il modulo, per evitare situazioni di abuso elettrico.
- Moduli con BMS: le prove sono condotte su moduli costituiti da celle singole in cui è presente un BMS, che si occupa oltre che del bilanciamento attivo o passivo delle celle, anche della sconnessione automatica del modulo, qualora vengono raggiunti i limiti di funzionamento delle celle.
- Sistemi batterie: le prove sono condotte su un sistema completo, che include il BMS ed il thermal management system, che si occupa della regolazione della temperatura dell'interno della batteria.

### 4.2 Acclimatizzazione

I test devono essere eseguiti a temperatura controllata all'interno di una camera climatica; se non diversamente specificato, prima di ciascun test la batteria deve essere stabilizzata alla temperatura di prova.

La stabilizzazione termica è ottenuta qualora la differenza tra la temperatura di test e la temperatura misurata in ciascun punto è inferiore a  $\pm 2^{\circ}\text{C}$ . In generale un periodo di 60 minuti deve essere osservato dopo ciascuna carica e scarica prima di procedere con ulteriori test.

Le prove in camera climatica devono essere effettuate nel corretto intervallo di temperatura ambiente, riportato nel datasheet di ciascuna tecnologia e in condizioni di bassa umidità, in modo che sia evitata la formazione di ghiaccio e condensa.

### 4.3 Connessioni

Le connessioni delle singole celle, all'interno di un modulo o di un sistema completo, dovrebbero essere fatte dal costruttore prima della consegna del pacco. Nel caso in cui non venga fornito un modulo già assemblato, il costruttore deve fornire tutte le informazioni necessarie per consentire la realizzazione di un sistema in grado di funzionare correttamente, senza arrecare situazioni di pericolo, ed ottenere risultati affidabili.

Gli stress termici durante le prove possono determinare l'indebolimento dei serraggi delle connessioni tra i diversi componenti del circuito di prova e tra le celle che costituiscono la batteria. I serraggi delle connessioni vanno registrati prima di ciascuna prova, per ridurre al minimo le perdite dovute a falsi contatti.

### 4.4 Circuito di prova

Il circuito di prova per batterie litio-ioni, mostrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, è costituito da un alimentatore con funzionamento a tensione o a corrente costante, da un carico, e da uno strumento di acquisizione dati.

La batteria in prova, posta in camera climatica, è collegata in parallelo ad un alimentatore CC/CV programmabile, e ad un carico elettronico o ad un carico puramente resistivo. Entrambi gli strumenti devono poter essere sezionati ed esclusi dal circuito di prova, qualora si verificano situazioni di pericolo, mediante l'utilizzo di teleruttori. Un sistema di acquisizione deve permettere la misura della tensione di batteria, della corrente di carica e scarica, della temperatura ambiente e della temperatura di lavoro della batteria. Nel caso di batterie in cui è possibile accedere alle singole celle, e nel caso di moduli dotati di solo sistema di bilanciamento è necessario effettuare anche la misura delle tensioni di singola cella.

Le misure delle temperature devono essere effettuate nei punti più caldi della batteria. Data l'impossibilità di inserire la sonda all'interno delle celle, è consigliabile porre la sonda di temperatura sui collettori di corrente della batteria, che essendo di metallo trasmettono maggiormente la temperatura interna rispetto all'involucro della batteria. Nel caso di batterie litio-ioni il collettore dell'elettrodo negativo, realizzato solitamente in rame, presenta una maggiore conducibilità termica rispetto al collettore dell'elettrodo positivo, realizzato in alluminio. Inoltre le reazioni determinate dalla sovraccarica avvengono da principio all'elettrodo negativo, determinando un maggiore aumento della temperatura a tale elettrodo. Il collettore dell'elettrodo negativo garantisce dunque il miglior punto di misura della temperatura interna della cella. La Figura 2 schematizza il circuito realizzato per l'esecuzione delle prove.

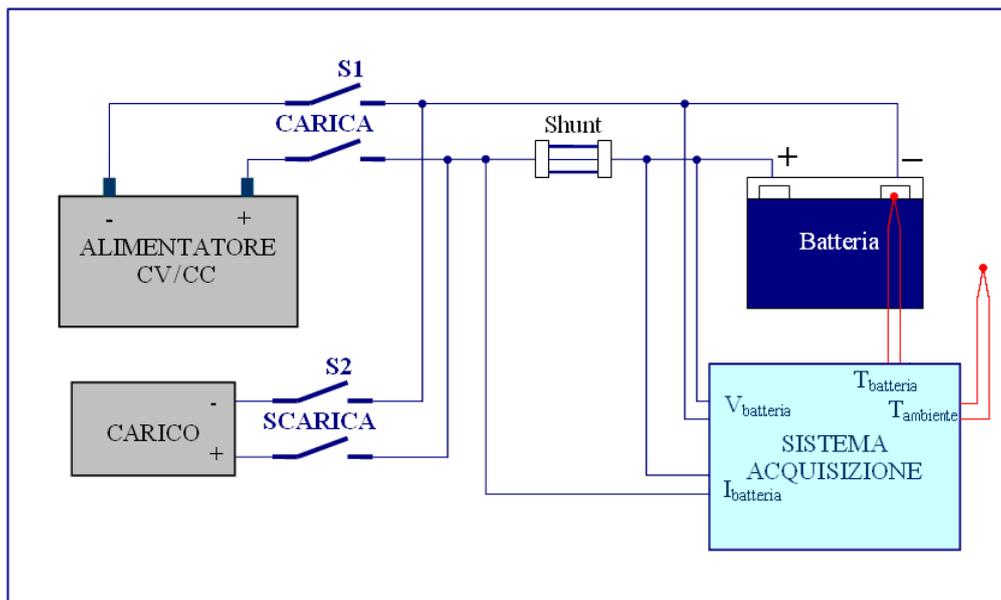


Figura 2. Schema del circuito di prova.

#### 4.5 Strumentazione di prova

- Alimentatore programmabile con funzionamento a tensione costante e corrente costante (CC/CV), di dimensioni opportune per la batteria in prova.
- Carico elettronico programmabile, di dimensioni opportune per la batteria in prova, in grado di lavorare a corrente continua, potenza continua e a resistenza costante.
- Camera climatica con intervallo minimo di temperatura compreso tra  $-40^{\circ}\text{C}$  e  $+60^{\circ}\text{C}$ .
- Set di resistenze, di dimensione opportuna, assemblabili in serie e in parallelo.

#### 4.6 Strumentazione di misura

Gli strumenti utilizzati devono permettere la corretta misura dei valori di tensione, corrente e temperatura. La portata di questi strumenti e i metodi di misura devono essere scelti in modo da assicurare l'accuratezza specifica per ciascuna prova. Può essere utilizzato qualsiasi strumento di misura, ammesso che permetta una certa accuratezza.

Nel caso specifico sono utilizzati:

- Data Logger per l'acquisizione della tensione, della corrente, della temperatura ambiente e della temperatura di batteria in prova. Il dispositivo deve garantire almeno queste quattro misure, oppure nel caso di batteria priva di involucro esterno deve permettere la misura di tutte le tensioni di cella e almeno tre temperature all'interno del pacco batterie.
- Oscilloscopio con canali isolati tra loro e sollevati da terra, con almeno due canali per la misura dei transitori veloci di corrente e tensione.

#### 4.6.1 Accuratezza degli strumenti di misura

L'accuratezza totale della catena di misura dei segnali deve essere almeno all'interno delle seguenti tolleranze:

- Tensione:  $\pm 1$  %;
- Corrente:  $\pm 1$  %;
- Temperatura:  $\pm 2$  °C;
- Tempo:  $\pm 0.1$  %;
- Massa:  $\pm 0.1$  %;
- Dimensione:  $\pm 0.1$  %.

Tutti i valori (temperatura, corrente e tensione) devono essere misurati almeno ogni 5% del tempo stimato di carica e scarica, eccetto i casi indicati nella procedura di prova.

#### 4.6.2 Taratura degli strumenti di misura

La taratura degli strumenti di acquisizione dati (data logger, oscilloscopio) e dei trasduttori di tensione e corrente (Shunt, Sonde ad effetto Hall, ecc..) deve essere effettuata con cadenza annuale.

## 5 Aspetti di sicurezza

Le batterie al litio risentono dei fenomeni di sovraccarica, sovrascarica e sovratemperatura, ed è quindi necessario evitare che ciascuna cella del pacco batterie e l'intera batteria superino i limiti di corrente, tensione e temperatura riportati nei datasheet di ciascuna tecnologia.

Per questo motivo le batterie devono essere dotate di sistemi di bilanciamento delle tensioni di cella, generalmente forniti dalle case costruttrici, che evitano l'instaurarsi di sbilanciamenti tali da determinare la sovraccarica delle singole celle. La batteria deve essere dotata inoltre di teleruttori tali da garantirne il distacco nel caso di sovraccarica, sovrascarica e sovratemperatura, che possano determinare, oltre alla perdita di prestazioni della batteria, anche l'emissione da parte della stessa di gas potenzialmente infiammabili.

Nel caso di prove condotte su moduli dotati di solo sistema di bilanciamento risulta inoltre necessario monitorare in modo continuativo le tensioni di singola cella, la corrente circolante e la temperatura della batteria per prevenire situazioni che possano essere deleterie per il funzionamento futuro della batteria ed evitare inoltre eventi distruttivi, garantendo il distacco della strumentazione di prova nel caso si verifichino queste situazioni.

Le batterie al litio-ioni devono essere conservate in ambiente fresco, asciutto e ventilato, poiché le elevate temperature possono causare l'invecchiamento precoce delle batterie.

Le celle non devono essere aperte, distrutte o incenerite poiché possono causare incendi, e nel caso di rottura di celle o esplosioni, è necessario evacuare immediatamente l'area contaminata e garantire la massima ventilazione per interrompere l'immagazzinamento di gas corrosivi e fumo.

La manutenzione dei serraggi delle batterie deve essere effettuata con chiavi isolate per evitare il cortocircuito dei terminali delle batterie. I cortocircuiti delle celle possono infatti causare fiamme, perdite, o rischi di esplosioni. È importante evitare di mischiare celle di diverse tipologie, e celle nuove con celle vecchie, in modo da evitare sbilanciamenti nelle celle durante le fasi di carica e scarica.

I solventi organici presenti all'interno dell'elettrolita sono infiammabili, corrosivi e irritanti. Il contenuto delle celle può causare irritazioni agli occhi, alla pelle, al sistema respiratorio e alle mucose. L'ingestione degli elettroliti può danneggiare i tessuti interni, le vie respiratorie e gastriche e può causare danni ai reni.

Nel caso di incidente o a seguito di un abuso, nel caso di perdita di elettrolita o cella aperta, è necessario utilizzare occhiali di sicurezza con protezione laterale e maschere anti-gas che coprono l'intero volto ed equipaggiate con opportuni filtri. Qualora si maneggino celle aperte, è necessario utilizzare guanti in polipropilene, polietilene o gomma, e indumenti in materiali plastici.

## 6 Disposizioni generali

Le prove consistono principalmente in cicli di carica e scarica delle batterie litio-ioni. Tutte le prove devono essere condotte con particolare riguardo nei confronti dei limiti di tensione e di corrente forniti nel datasheet del costruttore delle batterie in prova e condizionando termicamente la batteria all'interno della camera climatica.

Prima di effettuare le prove sulle batterie e al termine delle prove stesse occorre effettuare delle ispezioni per verificare eventuali danneggiamenti e rilevare i parametri fisici della batteria (massa, dimensioni, volume, ecc.).

### 6.1 Ispezione iniziale

La procedura di ispezione iniziale è la seguente:

- Ispezione visiva, consistente nel verificare che non siano avvenuti danneggiamenti dei campioni durante la fase di trasporto/consegna.
- Registrazione delle marcature di identificazione di ciascun componente. Deve essere presa ed inclusa nel report finale idonea documentazione fotografica dei principali componenti.
- Rilevazione della forma, dimensioni e peso dei campioni per determinare se le caratteristiche fisiche corrispondono a quelle fornite dal costruttore.

Moduli batterie, sistemi elettronici di gestione ed altri accessori, se presenti, quando possibile saranno pesati separatamente e di questo deve essere dato rilievo nel report finale.

Il peso impiegato per il calcolo dei valori specifici deve essere specificato e deve essere data spiegazione di come è stato calcolato.

Il volume della batteria è identificato dal più piccolo parallelepipedo che la contiene. Se è presente il BMS, il suo volume si determina allo stesso modo.

I risultati da riportare nel rapporto finale includono la descrizione degli eventuali danneggiamenti, le dimensioni, volume e peso della batteria e delle sue parti accessorie.

### 6.2 Ispezione finale

La procedura di ispezione finale consiste nel controllo di eventuali danneggiamenti che sono intervenuti durante le prove. Occorre effettuare la rilevazione della forma, delle dimensioni e del peso per verificare se sono avvenute deformazioni durante le prove.

I risultati da riportare nel rapporto finale includono la descrizione degli eventuali danneggiamenti presenti.

### 6.3 Carica delle batterie litio-ioni

La carica avviene collegando la batteria in parallelo ad un alimentatore CC/CV opportunamente programmato. Le modalità di carica di una batteria possono essere:

- a corrente costante;
- a potenza costante;
- a tensione costante;
- a fasi miste.

È necessario evitare che durante la carica della batteria sia superato il valore massimo di tensione fornito dal costruttore.

#### 6.3.1 Carica a fondo delle batterie litio-ioni

La procedura di carica a fondo delle batterie in prova, è a fasi miste, e si compone di:

- una fase di carica a corrente costante o potenza costante, con un valore di corrente che deve essere sempre inferiore al limite massimo per la corrente di carica di ciascuna tecnologia (riportato sul manuale di ogni batteria), fino al valore massimo di tensione fornita dal costruttore.
- una fase di carica a tensione costante, pari al valore nella fase a corrente o potenza costante e inferiore alla tensione massima di batteria. In questa fase la corrente si riduce gradualmente con

l'aumentare dello stato di carica della batteria. La batteria si può considerare completamente carica quando la corrente assorbita scende sotto un valore minimo che si può assumere pari al maggiore tra  $C/200$  (quindi pari a 0,5 A per una batteria da 100 Ah) e 0,1 A.

### 6.3.2 Carica standard delle batterie litio-ioni

La procedura di carica standard delle batterie litio-ioni, avviene seguendo la procedura di carica a fondo descritta nel §6.3.1 a temperatura ambiente di 20 °C, con una prima fase a corrente costante pari a  $C/2$ , salvo diverse indicazioni del costruttore, e una seconda fase a tensione costante fino ad un valore minimo di corrente pari a  $C/200$ . Durante la carica la tensione di batteria e di cella devono essere limitate al valore massimo di tensione fornito dal costruttore.

## 6.4 Scarica delle batterie litio-ioni

La scarica avviene collegando la batteria ad un carico opportuno, quale un carico elettronico opportunamente programmato, un pacco di resistenze o eventualmente una combinazione di entrambi.

Le modalità di scarica possono essere a corrente costante, a potenza costante o a resistenza costante, senza eccedere il limite minimo di tensione di batteria fornita dal costruttore.

La corrente di scarica continuativa deve essere sempre mantenuta al di sotto del limite massimo di ciascuna tecnologia, riportato sul manuale d'uso.

### 6.4.1 Scarica a fondo delle batterie litio-ioni

La scarica a fondo delle batterie litio-ioni viene ottenuta attraverso il raggiungimento della condizione di fine scarica della batteria. La batteria si considera completamente scarica quando la tensione di una cella della batteria raggiunge il valore minimo indicato dal costruttore oppure, nel caso non si disponga di tale misura, qualora sia raggiunta la tensione minima di batteria.

### 6.4.2 Scarica standard delle batterie litio-ioni

La procedura di scarica standard delle batterie litio-ioni, deve essere eseguita a corrente costante pari a  $C/2$  e temperatura ambiente di 20°C, salvo diverse indicazioni del costruttore. Durante la scarica la tensione di batteria e di cella devono essere limitate al valore minimo di tensione fornito dal costruttore.

## 6.5 Ciclo standard

Lo scopo di questo ciclo è quello di assicurare le medesime condizioni iniziali di carica immagazzinata nella batteria prima di effettuare ciascuna serie di test.

Il ciclo standard, come illustrato in tabella 2, è costituito da una scarica standard, descritta nel §6.4.2, seguita da una carica standard, descritta nel §6.3.2, intervallate tra loro da una fase di acclimatizzazione in camera climatica alla temperatura ambiente di 20°C.

**Tabella 2. Sequenza per l'esecuzione del ciclo standard.**

N° Fase	Titolo prova	N° Paragrafo
1	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
2	Scarica standard	§6.4.2
3	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
4	Carica standard	§6.3.2

Se la capacità scaricata durante questo test differisce per più del 3% dal valore fornito dal costruttore, il valore di capacità misurato deve essere utilizzato come base per qualsiasi ulteriore scarica a corrente costante. Il ciclo standard permette inoltre di verificare il degrado delle batterie durante le prove di caratterizzazione.

## 6.6 Cicli di preconditionamento

La batteria nuova deve essere condizionata attraverso alcuni cicli di carica e scarica, prima di iniziare la sequenza reale di test, in modo da assicurare una adeguata stabilizzazione delle performance del sistema in prova. Il preconditionamento avviene sottoponendo la batteria ad almeno tre cicli standard, descritti nel §6.5, e si può considerare condizionata qualora la capacità scaricata attraverso le prove consecutive di scarica non varia di un valore superiore al 3%.

## 6.7 Cicli di carica e scarica

Per effettuare cicli con fasi alterne di scarica e carica è necessario collegare la batteria in prova con un alimentatore CC/CV e un carico e programmarli opportunamente, instaurando la dovuta sincronizzazione tra i due strumenti.

Entrambi i rami del circuito devono essere sezionabili, come mostrato in Figura 2.

## 6.8 Stand-By

Durante lo stand-by la batteria in prova deve essere mantenuta a vuoto, con l'elettronica di controllo spenta per evitare eventuali autoconsumi, determinati dalle correnti di dispersione e dall'alimentazione dell'elettronica. Durante questa fase la batteria deve essere ricaricata a fondo ogni due mesi per evitare che il fenomeno irreversibile di autoscarica incida sulla capacità della batteria.

## 7 Prove di caratterizzazione di base

Le prove di caratterizzazione di base hanno come scopo la misura e la stima di una serie di parametri prestazionali caratterizzanti gli accumulatori elettrochimici. In particolare, questa prima tipologia di prove, permette la determinazione delle seguenti grandezze:

- capacità scaricata: carica elettrica, espressa in Ah, scaricata dalla batteria;
- energia scaricata: energia elettrica, espressa in Wh, scaricata dalla batteria;
- rendimento amperometrico: definito come rapporto tra la capacità scaricata e quella caricata;
- rendimento energetico: definito come rapporto tra l'energia scaricata e quella caricata;
- densità di energia: definita come l'energia scaricabile per unità di volume;
- densità di potenza: definita come la potenza di scarica per unità di volume;
- energia specifica: definita come l'energia scaricabile per unità di peso;
- potenza specifica: definita come la potenza di scarica per unità di peso;
- resistenza interna: definita come la resistenza interna di carica/scarica della batteria;
- picco di potenza: definito come la potenza massima di carica/scarica;
- resistenza serie: definita come la resistenza serie responsabile del solo salto ohmico;
- autoscarica: definita come la riduzione di capacità, a seguito dello stand-by della batteria.

Per la misura di questi parametri le batterie sono sottoposte a cicli di carica/scarica, con diversi valori della corrente di scarica e con diverse temperature ambiente. Tutte le prove sono effettuate all'interno della camera climatica, lasciando le batterie a riposo per il tempo necessario al raggiungimento della temperatura presente all'interno della camera.

Nel corso delle prove sono acquisite la tensione di batteria, le tensioni di cella, qualora disponibili, la corrente di scarica/carica, la temperatura ambiente e di batteria in modo da poter ricavare in seguito le grandezze d'interesse.

Nella tabella 3, è riportata la sequenza consigliata per l'esecuzione delle prove di caratterizzazione di base su batterie litio-ioni:

**Tabella 3. Sequenza consigliata per l'esecuzione delle prove di caratterizzazione di base.**

N° Fase	Descrizione della Fase	N° Paragrafo
1	Ispezione iniziale	§6.1
2	Cicli di preconditionamento	§6.6
3	Prova di scarica a corrente costante a temperatura ambiente	§7.1
4	Prova di scarica a corrente costante in temperatura	§7.2
5	Prova di scarica parziale a corrente costante a temperatura ambiente	§7.3
6	Prova per la stima del picco di potenza e della resistenza interna	§7.4
7	Prova per la misura della resistenza interna serie	§7.5
8	Misura dell'autoscarica	§7.6
9	Ispezione finale	§6.2

### 7.1 Prova di scarica a corrente costante a temperatura ambiente

Lo scopo di queste prove è la determinazione di alcuni parametri caratteristici delle batterie (capacità, energia, rendimento amperometrico ed energetico, densità di energia, energia specifica) al variare della corrente di scarica, a temperatura ambiente pari a 20°C.

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali, ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

La prova consiste in una scarica della batteria a corrente costante fino al raggiungimento della tensione di fine scarica (quindi fino alla scarica completa della batteria).

Dopo aver atteso che la temperatura della batteria ritorni al valore fissato per la prova si procede con una ricarica a fondo della batteria, attraverso una carica standard secondo la modalità descritta nel §6.3.2, in modo tale da garantire per tutte le prove il medesimo valore iniziale di carica immagazzinata nella batteria. La prova viene effettuata con sette diversi valori di corrente di scarica (C/5, C/3, C/2, 1C, 2C, 3C,  $I_{max\_dch}$ ) con temperatura ambiente pari a 20°C. Le prove a diversa corrente devono essere limitate alla corrente massima di scarica fornita dal datasheet del costruttore, e possono essere eseguite per ulteriori valori di corrente.

Nella tabella 4 è riportata la sequenza per l'esecuzione della prova:

**Tabella 4. Sequenza per l'esecuzione delle prove di scarica a corrente costante a temperatura ambiente.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard	§6.5
2	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
3	Scarica a fondo della batteria a C/5; C/3; C/2; 1C; 2C; 3C; $I_{max\_dch}$	§6.4.1
4	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
5	Carica standard	§6.3.2
6	Esecuzione delle fasi da 2 a 5 con diversi valori di corrente nella fase 3	

Durante la prova devono essere registrate la tensione delle singole celle, qualora disponibili, la tensione di batteria, la corrente, la temperatura ambiente e quella di batteria con un tempo di campionamento pari a 1 s.

## 7.2 Prova di scarica a corrente costante in temperatura

Lo scopo di queste prove è la determinazione di alcuni parametri caratteristici delle batterie (capacità, energia, rendimento amperometrico ed energetico, densità di energia, energia specifica) al variare della temperatura ambiente di scarica, a corrente costante pari a C/2.

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali, ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

La prova consiste in una scarica della batteria a corrente costante fino al raggiungimento della tensione di fine scarica (quindi fino alla scarica completa della batteria), a differenti temperature ambiente.

Dopo aver atteso che la temperatura della batteria ritorni alla temperatura ambiente di 20°C si procede con una ricarica a fondo della batteria, attraverso una carica standard secondo la modalità descritta nel §6.3.2, in modo tale da garantire per tutte le prove il medesimo valore iniziale di carica immagazzinata nella batteria.

La prova viene effettuata a sei diverse temperature (-20°C, -10°C, +5°C, +20°C, +40°C e +50°C) con corrente di scarica pari a C/2. Durante la prova devono essere registrate la tensione delle singole celle, qualora disponibili, la tensione di batteria, la corrente e la temperatura con un tempo di campionamento pari a 1 s.

Nella tabella 5 sono riportati i valori di corrente e di temperatura che caratterizzano le diverse prove.

**Tabella 5. Sequenza per l'esecuzione delle prove di scarica a corrente costante in temperatura.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard	§6.5
2	Acclimatizzazione a -20; -10; 5; 20; 40; 50°C	§4.2
3	Scarica a fondo della batteria a C/2	§6.4.1
4	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
5	Carica standard	§6.3.2
6	Esecuzione delle fasi da 2 a 5 con diversi valori di temperatura nella fase 2	

### 7.3 Prova di scarica parziale a corrente costante a temperatura ambiente

Lo scopo di queste prove è la determinazione del rendimento energetico della batteria, calcolato secondo la modalità descritta nel §11.5, al variare del SOC iniziale e finale della batteria a temperatura ambiente di 20°C e con corrente di scarica/carica costante e pari a C/2.

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali, ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

La prova consiste nella scarica parziale della batteria a corrente costante, a partire da un determinato livello iniziale del SOC, fino al raggiungimento dello stato di carica finale, e successiva ricarica per riportare la batteria nella medesima condizione dello stato di carica iniziale.

Nella tabella 6 è presentata la sequenza per l'esecuzione della prova.

**Tabella 6. Sequenza per l'esecuzione della prova di scarica parziale.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard	§6.5
2	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
3	Scarica standard fino al raggiungimento del valore iniziale del SOC [%]	§6.4.2
4	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
5	Scarica standard fino al raggiungimento del valore finale del SOC [%]	§6.4.2
6	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
7	Carica standard fino al raggiungimento del valore iniziale del SOC [%]	§6.3.2
8	Esecuzione delle fasi da 2 a 7 con diversi valori del SOC finale della fase 5 e SOC iniziale della fase 7 (che deve corrispondere in uno stesso ciclo a quello della fase 3)	

La prova viene effettuata per diversi valori iniziali dello stato di carica (100%, 80%, 60%, 40%, 20%), con diversi valori della variazione del SOC (20%, 40%, 60%, 80%), come illustrato in tabella 7. Durante la prova

devono essere registrate la tensione delle singole celle, qualora disponibili, la tensione di batteria, la corrente e la temperatura con un tempo di campionamento pari a 1 s.

**Tabella 7. Tabella riassuntiva delle prove di scarica parziale.**

	SOC iniziale [%]	SOC finale [%]
Prova 1	100	80
Prova 2	100	60
Prova 3	100	40
Prova 4	100	20
Prova 5	100	0
Prova 6	80	60
Prova 7	80	40
Prova 8	80	20
Prova 9	80	0
Prova 10	60	40
Prova 11	60	20
Prova 12	60	0
Prova 13	40	20
Prova 14	40	0
Prova 15	20	0

#### 7.4 Prova per la stima del picco di potenza e della resistenza interna

Lo scopo della prova è la determinazione della potenza massima di scarica e di carica della batteria al variare del SOC, e della durata temporale del picco di scarica/carica. Il calcolo del picco di potenza di una batteria si ottiene analizzando la risposta dell'accumulatore ad un gradino di corrente di opportuna intensità. L'andamento della tensione in risposta al gradino di corrente è caratterizzato da una variazione determinata dalla presenza di una resistenza interna, che limita di fatto il picco di potenza della batteria.

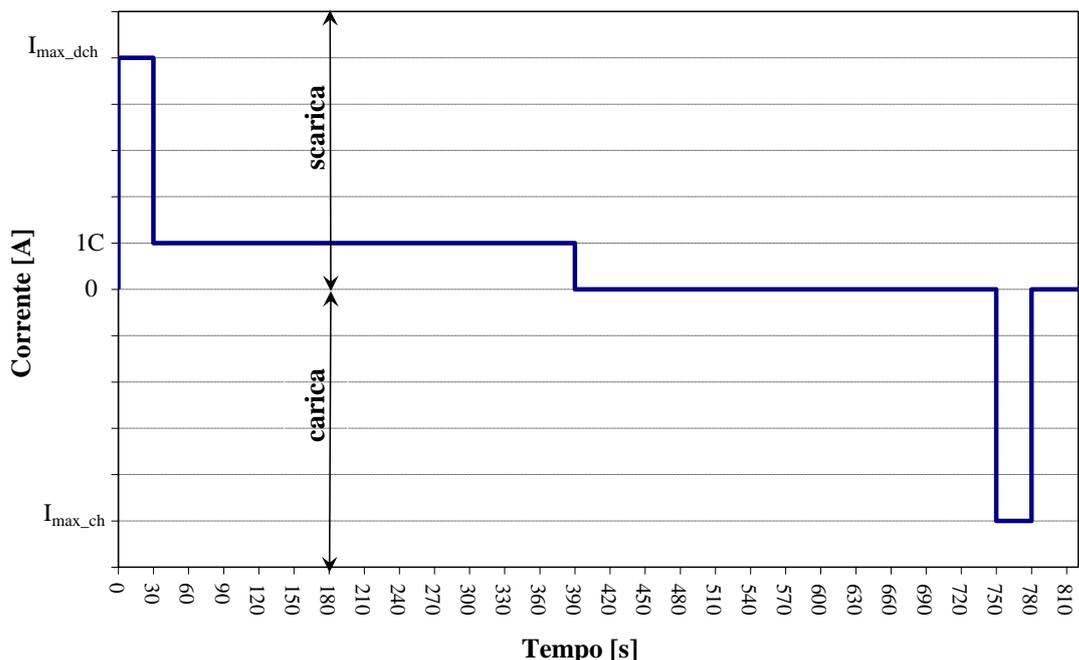
La prova consiste nel sottoporre la batteria ad un ciclo di lavoro comprendente un gradino di scarica, alla corrente massima ammissibile per la batteria in scarica, e uno di carica, limitato al valore massimo di corrente per questa fase, intervallati da una fase di scarica a corrente costante pari a 1C, tale da ridurre il SOC del 10%, e da una fase di riposo della medesima durata di tale scarica. Il ciclo, mostrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** ha una durata complessiva di 820 s e si compone delle seguenti fasi:

- una fase di scarica con corrente costante pari a  $I_{\max\_dch}$  della durata di 30 s;
- una fase di scarica a corrente costante pari a 1C della durata di 360 s;
- una fase a corrente nulla della durata di 360 s;
- una fase di carica con corrente costante pari a  $I_{\max\_ch}$  della durata di 30 s;
- una fase a corrente nulla della durata di 40 s.

Il ciclo permette la stima della resistenza interna della batteria in scarica per una durata massima di 30 s, per valori del SOC che vanno dal 100% al 10%, ad intervalli regolari del 10% dello stato di carica, e la stima della resistenza interna in carica per valori del SOC che vanno dal 90% allo 0% del SOC.

La corrente massima di scarica è scelta come la minore tra la corrente massima di scarica fornita dal costruttore e la corrente che per stati di carica prossimi al 10% garantisce una scarica della durata di 30 s, senza raggiungere il valore di tensione di fine scarica.

Analogo discorso vale per la corrente massima di carica, che è scelta come la minore tra la corrente massima di carica fornita dal costruttore e la corrente che per stati di carica prossima al 90% garantisce una carica della durata di 30 s, senza raggiungere il valore di tensione massimo di batteria.



**Figura 3. Ciclo di scarica e carica per il calcolo del picco di potenza.**

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali e verificare la capacità della batteria, ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

La prova vera e propria, eseguita a temperatura ambiente pari a 0°C, 20°C o 40°C, consiste nel ripetere il ciclo di Figura 3 fino al raggiungimento della scarica completa della batteria.

Durante la prova devono essere registrate la tensione delle singole celle, qualora disponibili, la tensione di batteria, la corrente e la temperatura con un tempo di campionamento massimo di 1 s.

Nella tabella 8 è presentata la sequenza per l’esecuzione della prova.

**Tabella 8. Sequenza per l’esecuzione della prova per la stima del picco di potenza e della resistenza interna.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard	§6.5
2	Acclimatazione a 0; 20; 40°C	§4.2
3	Esecuzione del ciclo di Figura 3 fino al raggiungimento della condizione di fine scarica	§7.4
4	Acclimatazione a 20°C	§4.2
5	Carica standard	§6.3.2
8	Esecuzione delle fasi da 2 a 5 con diverse temperature nella fase 2	

La prova permette la misura della potenza massima di scarica/carica per i diversi stati di carica, per diverse durate temporali, pari a 2, 10, 20 e 30 s.

La stima del picco di potenza di scarica si ricava a partire dal calcolo della resistenza interna di scarica della batteria per ogni valore del SOC che è data dalla seguente formula:

$$R_{dch\_K} = \frac{|V(T_K) - V(0)|}{|I(T_K) - I(0)|} \quad (7.1)$$

dove  $V(T_K)$  e  $I(T_K)$  sono la tensione e la corrente all'istante  $T_K$ , che assume i valori 2, 10, 20, 30s, mentre  $V(0)$  e  $I(0)$  sono la tensione e la corrente all'istante 0 del ciclo di lavoro illustrato in Figura 3.

La potenza di picco di scarica è così calcolata:

$$P_{dch\_K} = V_{\min} \cdot \frac{(OCV - V_{\min})}{R_{dch\_K}} \quad (7.2)$$

dove  $V_{\min}$  è la tensione minima della batteria, il cui valore è riportato nel datasheet di ciascuna tecnologia, e OCV è la tensione a circuito aperto della batteria misurata poco prima del termine della fase a corrente nulla del ciclo di lavoro di Figura 3, per diversi valori del SOC.

Analogamente, la resistenza interna di carica è calcolata attraverso la misura della corrente e della tensione della batteria durante la fase di carica del ciclo di Figura 3 ed è data dalla seguente formula:

$$R_{ch\_K} = \frac{|V(750 + T_K) - V(750)|}{|I(750 + T_K) - I(750)|} \quad (7.3)$$

dove  $V(750+T_K)$  e  $I(750+T_K)$  sono i valori assunti dalla tensione e dalla corrente all'interno della fase di carica a corrente massima costante del ciclo,  $V(750)$  e  $I(750)$  sono la tensione e la corrente all'istante 750, e cioè i valori assunti da queste grandezze all'istante iniziale del picco di corrente di carica.

La potenza di picco di carica è così calcolata:

$$P_{ch\_K} = V_{\max} \cdot \frac{(V_{\max} - OCV)}{R_{ch\_K}} \quad (7.4)$$

Dove  $V_{\max}$  è la tensione massima della batteria, il cui valore è riportato nel datasheet di ciascuna tecnologia, e OCV è la tensione a circuito aperto della batteria misurata, poco prima del termine della fase a corrente nulla del ciclo di lavoro di **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, per diversi valori del SOC.

### 7.5 Prova per la misura della resistenza interna serie

La resistenza interna serie si misura tipicamente analizzando la risposta della tensione dell'accumulatore ad un gradino di corrente. L'andamento della tensione in risposta al gradino di corrente è caratterizzato da una variazione quasi verticale, dovuta alla caduta di tensione quasi istantanea sulla resistenza interna in risposta alla variazione della corrente, il cosiddetto salto ohmico. Il valore di questa resistenza, indicata con  $R_s$ , è calcolabile dividendo il salto ohmico per il corrispondente gradino di corrente, mediante la formula  $R_s = \Delta V / \Delta I$ . La misura della resistenza interna è effettuata a partire dal ciclo di **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, e può essere effettuato per diversi valori di temperatura.

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali, ed inoltre deve essere mantenuta in camera climatica per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

La prova vera e propria, eseguita a temperatura ambiente pari a 0°C, 20°C o 40°C, consiste nel ripetere il ciclo di Figura 3 fino al raggiungimento della scarica completa della batteria.

Durante la prova devono essere registrate la tensione e la corrente di batteria mediante un oscilloscopio con elevata frequenza di campionamento pari almeno a 1 kHz.

### 7.6 Misura dell'autoscarica

L'autoscarica della batteria è un fenomeno che interessa tutte le tipologie di accumulatori elettrochimici, e che determina a seguito di un periodo più o meno lungo in cui la batteria non viene utilizzata, una riduzione della capacità e dell'energia immagazzinata all'interno della batteria.

L'autoscarica, provocata dalle reazioni parassite che possono avvenire all'interno della batteria quando quest'ultima è mantenuta in stand-by, è nella migliore delle ipotesi un evento reversibile, ma può anche essere un fenomeno irreversibile, che come tale determina l'impossibilità di ripristinare il valore iniziale di capacità delle batterie.

La prova per la misura dell'autoscarica si compone di tre cicli standard, descritti nel §6.5, consecutivi ed intervallati tra loro rispettivamente di una fase di stand-by pari almeno a 30 giorni tra il primo e il secondo ciclo e di 1 giorno tra il secondo e il terzo ciclo.

Nella tabella 9 è riportata la sequenza per l'esecuzione della misura dell'autoscarica.

**Tabella 9. Sequenza per l'esecuzione della misura dell'autoscarica.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard	§6.5
2	Acclimatizzazione a 0; 20; 40°C	§4.2
3	Stand-by della batteria per 30gg	§6.8
4	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
5	Ciclo standard	§6.3.2
6	Acclimatizzazione a 0; 20; 40°C	§4.2
7	Stand-by della batteria per 1gg	§6.8
8	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
9	Ciclo standard	§6.5
10	Esecuzione delle fasi da 2 a 9 con diversi valori di temperatura nella fase 2 e 6	

Le variazioni di capacità e di energia rilevate tra i primi due cicli standard, sono l'autoscarica complessiva della batteria, calcolabili secondo la seguente formula:

$$E_{SDtot} = E_1 - E_2; \quad C_{SDtot} = C_1 - C_2 \quad (7.5)$$

Dove  $C_1$  e  $E_1$  sono la capacità e l'energia scaricate dalla batteria, calcolate secondo le modalità descritte nei §11.1 e 11.2, durante il primo ciclo standard, mentre  $C_2$  e  $E_2$  sono la capacità e l'energia scaricate dalla batteria durante il secondo ciclo standard.

Le variazioni rilevate per tali grandezze tra il primo e il terzo ciclo standard, qualora presenti, sono invece la sola componente irreversibile dell'autoscarica, calcolabili attraverso le seguenti formule:

$$E_{SDirr} = E_1 - E_3; \quad C_{SDirr} = C_1 - C_3 \quad (7.6)$$

Dove  $C_3$  e  $E_3$  sono la capacità e l'energia scaricate dalla batteria durante il terzo ciclo standard.

La componente reversibile della capacità e dell'energia risultano invece ottenibili attraverso le formule:

$$E_{SDrev} = E_{SDtot} - E_{SDirr}; \quad C_{SDrev} = C_{SDtot} - C_{SDirr} \quad (7.7)$$

Per ottenere i valori di autoscarica giornalieri si dividono i valori sopra ottenuti per il numero di giorni che intercorrono tra il primo e il secondo ciclo standard.

## 8 Prove specialistiche per veicolo elettrico

Le prove di caratterizzazione di base, permettono la stima dei parametri caratteristici degli accumulatori elettrochimici attraverso cicli di lavoro puramente a corrente costante. La corrente di riferimento di carica/scarica per veicolo elettrico è da considerare pari a C/3.

Nelle applicazioni veicolari, che si tratti di un veicolo ibrido o puramente elettrico, la batteria è sottoposta a continui cicli di scarica e carica di diversa intensità e durata. La verifica delle prestazioni delle batterie per veicolo elettrico deve dunque passare per una caratterizzazione più approfondita in cui vengono simulate le situazioni tipiche a cui sono sottoposte gli accumulatori elettrochimici per autotrazione. Il degrado osservato nelle prove specialistiche per veicolo elettrico, rispetto a quanto ottenuto nelle prove di caratterizzazione di base, quantifica la maggiore difficoltà della batteria a lavorare in questa tipologia di applicazione.

### 8.1 Prova di scarica dinamica

La prova, riportata nella norma CEI EN 61982-2, ha come oggetto la determinazione delle prestazioni dei sistemi di accumulo in applicazioni tipiche della trazione elettrica stradale.

Nelle applicazioni in veicoli elettrici, le batterie per propulsione devono essere in grado di fornire diversi valori di corrente, sintetizzabili in: corrente a regime elevato per l'accelerazione, corrente a basso regime per la guida a velocità costante e corrente zero per i periodi di riposo. Un impulso di ricarica della batteria a regime elevato può essere incluso nel profilo per sintetizzare la frenatura rigenerativa, presente solo in taluni veicoli elettrici. La prova di scarica dinamica può dunque essere effettuata considerando o meno la carica rigenerativa, in funzione dell'applicazione di interesse.

#### 8.1.1 Ciclo di prova senza carica rigenerativa

La prova di scarica dinamica senza carica rigenerativa si compone di un ciclo della durata di 60 s composto da fasi di scarica con tre livelli di corrente, come mostrato in Figura 4: per i primi 10 s del ciclo la corrente di scarica risulta pari a  $5,2 * C/3$ , per i successivi 20 s la corrente risulta pari a  $1,3 * C/3$ , e quindi rimane nulla per i successivi 30 s.

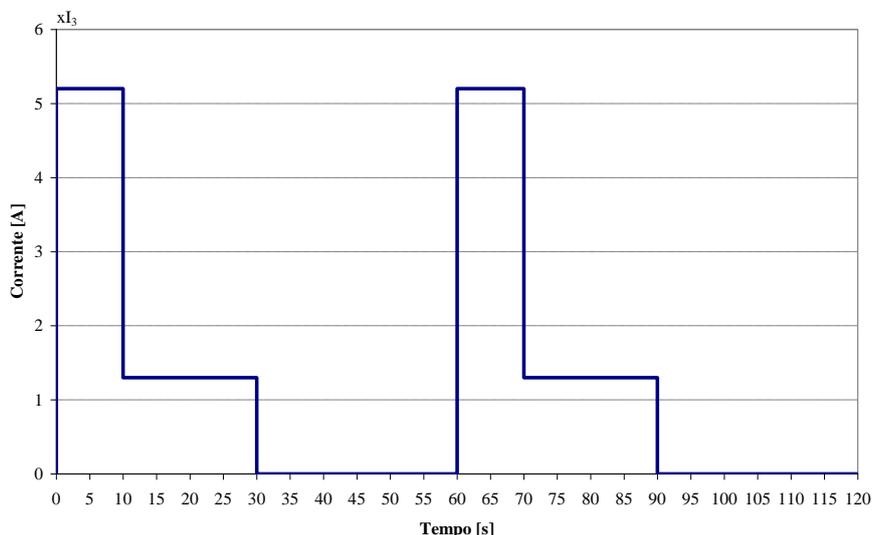


Figura 4. Ciclo per la prova di scarica dinamica senza carica rigenerativa.

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali, ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

Il ciclo di base viene ripetuto fino a che la tensione di una singola cella, o dell'intera batteria, non scenda al di sotto della tensione minima fornita dal costruttore. Al termine di questa fase occorre ricaricare la

batteria secondo la procedura di carica a fondo con corrente pari a  $C/3$ . Nella tabella 10 è presentata la sequenza per l'esecuzione della prova.

**Tabella 10. Sequenza per l'esecuzione della prova di scarica dinamica con carica rigenerativa.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard a $C/3$	§6.5
2	Acclimattizzazione a 20°C	§4.2
3	Esecuzione del ciclo di Figura 4 fino al raggiungimento della condizione di fine scarica	§8.1.1
4	Acclimattizzazione a 20°C	§4.2
5	Carica a fondo a $C/3$	§6.3.1

Lo scopo della prova è verificare l'attitudine della batteria a lavorare in una applicazione veicolare attraverso la determinazione dei seguenti parametri:

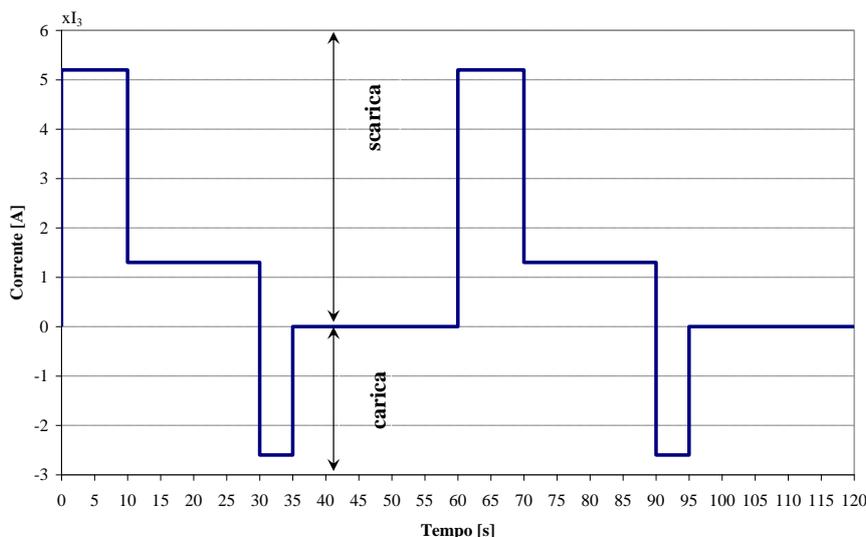
- Numero di cicli completati
- Capacità (Ah scaricati)
- Energia (kWh scaricati)
- Rendimento amperometrico
- Rendimento energetico

Durante la prova devono essere registrate la tensione delle singole celle, qualora disponibili, e la tensione di batteria, la corrente e la temperatura con un tempo di campionamento pari a 1 s.

Tali grandezze permettono la determinazione dei parametri d'interesse secondo la metodologia di calcolo descritta nel §11.

### 8.1.2 Ciclo di prova con carica rigenerativa

La prova di scarica dinamica con carica rigenerativa si compone di un ciclo con fasi di scarica e carica con diversi valori di corrente, della durata di 60 s, come mostrato in Figura 5: la prima fase è una scarica con corrente pari a  $5,2 * C/3$  della durata di 10 s, seguita da una fase di scarica con corrente pari a  $1,3 * C/3$  della durata di 20 s, da una fase di carica con corrente pari a  $2,6 * C/3$  della durata di 5 s e una fase a corrente nulla di 25 s.



**Figura 5. Ciclo per la prova di scarica dinamica con carica rigenerativa.**

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali, ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

Il ciclo di base viene ripetuto fino a che la tensione di una singola cella, o dell'intera batteria, non scenda al di sotto della tensione minima fornita dal costruttore. Al termine di questa fase occorre ricaricare la batteria secondo la procedura di carica a fondo con corrente pari a C/3. Nella tabella 11 è presentata la sequenza per l'esecuzione della prova.

**Tabella 11. Sequenza per l'esecuzione della prova di scarica dinamica con carica rigenerativa.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard a C/3	§6.5
2	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
3	Esecuzione del ciclo di <b>Figura 5. Ciclo per la prova di scarica dinamica con carica rigenerativa.</b>  Figura 5 fino al raggiungimento della condizione di fine scarica	§8.1.2
4	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
5	Carica a fondo a C/3	§6.3.1

Lo scopo della prova è verificare l'attitudine della batteria a lavorare in una applicazione veicolare attraverso la determinazione dei seguenti parametri:

- Numero di cicli completati
- Capacità (Ah scaricati)
- Energia (kWh scaricati)
- Ah caricati nelle fasi di frenatura
- kWh caricati nelle fasi di frenatura
- Rendimento amperometrico
- Rendimento energetico

Durante la prova devono essere registrate la tensione delle singole celle, qualora disponibili, e la tensione di batteria, la corrente e la temperatura di batteria con un tempo di campionamento pari a 1 s. Tali grandezze permettono la determinazione dei parametri d'interesse secondo la metodologia di calcolo descritta nel §11.

## 8.2 Carica rapida

Lo scopo di questa prova è la verifica dell'efficienza energetica ed amperometrica della batteria litio-ioni quando sottoposta ad un processo di carica rapida. La prova è realizzata caricando la batteria con un'elevata corrente di carica tra il 40% e l'80% del SOC, con tre diversi valori elevati di corrente di carica pari a 2C, 5C e  $I_{max\_ch}$ , non eccedendo la tensione massima di batteria fornita dal costruttore.

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali, ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

A partire da batteria pienamente carica, occorre effettuare una prima scarica con corrente pari a C/2, per portare lo stato di carica ad un valore pari al 40%, e quindi effettuare la carica rapida con i valori di corrente precedentemente espressi.

Nella tabella 12 è presentata la sequenza per l'esecuzione della prova.

**Tabella 12. Sequenza per l'esecuzione della prova di scarica dinamica con carica rigenerativa.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Carica a fondo a C/3	§6.3.1
2	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
3	Ciclo standard a C/3	§6.5
4	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
5	Scarica standard a C/3 fino al 40% del SOC	§6.4.2
6	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
7	Carica a 2C; 5C; $I_{max\_ch}$ fino all'80% del SOC	§6.3
8	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
9	Scarica a fondo a C/3	§6.4.1
10	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
11	Carica a fondo a C/3	§6.3.1
12	Esecuzione delle fasi da 2 a 11, con diversi valori di corrente nella fase 7	

La prova realizzata con tre differenti valori di temperatura ambiente, pari a 0°C, 20°C e +40°C, permette di misurare l'efficienza di carica rapida secondo le seguenti formule:

$$\eta_C = \frac{C_{dch2} - (C_{in} - C_{dch1})}{C_{Fch}} \quad \eta_E = \frac{E_{dch2} - (E_{in} - E_{dch1})}{E_{Fch}} \quad (8.1)$$

Dove  $C_{in}$  e  $E_{in}$  sono i valori iniziali di capacità ed energia misurati a partire dal ciclo standard, calcolati secondo le modalità descritte nei §11.1 e 11.2  $C_{dch2}$  e  $E_{dch2}$  sono i valori di capacità ed energia scaricati per passare dall'80% allo 0% del SOC,  $C_{dch1}$  e  $E_{dch1}$  sono i valori di capacità ed energia scaricati per passare dall'100% allo 40% del SOC, e  $C_{Fch}$  e  $E_{Fch}$  sono i valori di capacità ed energia caricati durante la fase di carica rapida.

### 8.3 Prova di avviamento a freddo

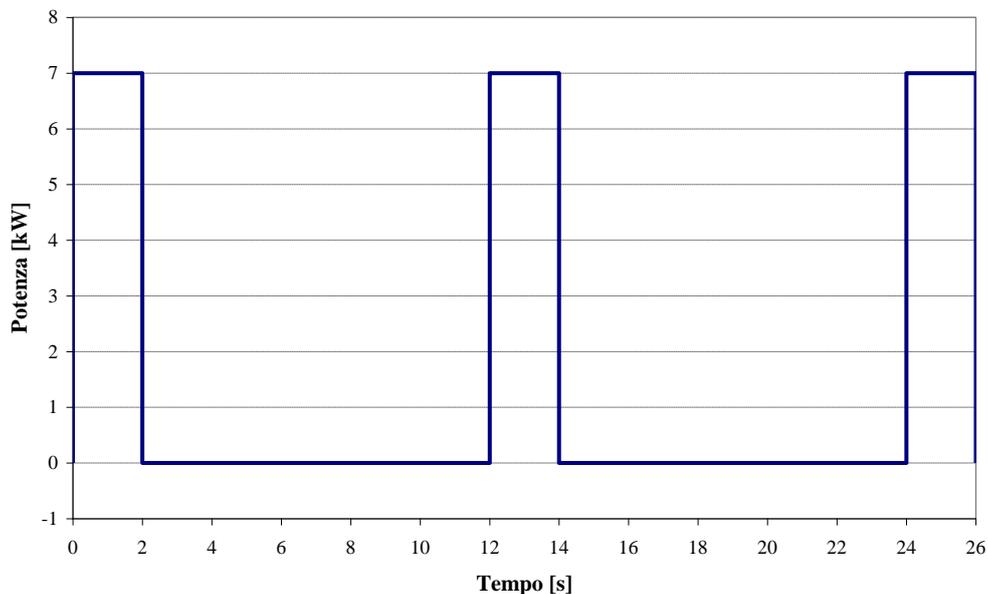
La prova, definita a partire dal "Battery Test Manual for Plug-In Hybrid Electric Vehicle", ha come scopo la verifica della potenza di picco in scarica per una durata temporale di 2s a temperatura ambiente pari a -30°C, ed è specialistica per i veicoli elettrici ibridi.

La prova di avviamento a freddo si compone di un ciclo della durata di 26 s, composto da tre picchi di scarica della durata di 2s ciascuno ed ampiezza pari a 7kW, intervallati tra loro da fasi a potenza nulla della durata di 10s, come mostrato in Figura 6.

I set-up di potenza indicati nella Figura 6 sono validi per una batteria standard da 11,6 kWh di energia alla potenza nominale di 10 kW, adatta per alimentare un veicolo ibrido PHEV con un peso di 1500 kg, con un intervallo di percorrenza di circa 64 km in puro elettrico.

Per effettuare prove su batterie più piccole si possono dividere tali valori di potenza per un opportuno fattore di scala (fs), pari al rapporto tra l'energia nominale della batteria standard e quella della batteria effettivamente in prova (ad esempio se la batteria in prova ha una energia nominale pari a 3 kWh si avrà un fs pari a 3,86).

La prova deve essere condotta al valore massimo di DOD, cioè a quel valore di profondità di scarica per cui è possibile effettuare una scarica a potenza costante della durata di 2 s e ampiezza pari a 46 kW per la batteria standard.



**Figura 6. Ciclo per la prova di avviamento a freddo.**

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali, ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

La batteria viene dunque scaricata a corrente costante pari a C/3, a temperatura ambiente fino al raggiungimento del valore massimo di DOD, verificato attraverso la prova per la stima del picco di potenza e della resistenza interna, descritta nel §7.4.

La batteria viene condizionata in camera climatica per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura ambiente di -30°C, e quindi scaricata con il ciclo di Figura 6, verificandone l’attitudine a lavorare in questa condizione.

Nella tabella 13 è presentata la sequenza per l’esecuzione della prova.

**Tabella 13. Sequenza per l’esecuzione della prova di scarica dinamica con carica rigenerativa.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard a C/3	§6.5
2	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
3	Scarica standard a C/3 fino al raggiungimento del massimo DOD	§6.4.2
4	Acclimatizzazione a -30°C	§4.2
5	Esecuzione del ciclo di Figura 6	§8.3
6	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
7	Carica a fondo a C/3	§6.3.1

Durante la prova devono essere registrate la tensione delle singole celle, qualora disponibili, e la tensione di batteria, la corrente e la temperatura con un tempo di campionamento pari a 0,1 s.

## 8.4 Cicli di prova per veicolo elettrico ibrido

Nella seguente sezione sono descritte due diverse tipologie di prove per veicolo elettrico ibrido tratte rispettivamente dal consorzio USABC e dal comitato EUCAR. Le due prove, utili per verificare le prestazioni delle batterie litio-ioni durante cicli di lavoro tipici per l'applicazione in veicoli elettrici ibridi, consentono anche la verifica della vita utile della batteria quantificata in cicli di vita.

### 8.4.1 Prova di sollecitazione dinamica per veicolo elettrico ibrido

La prova, definita a partire dal "Battery Test Manual for Plug-In Hybrid Electric Vehicle", e basata sul profilo illustrato in Figura 6, ha come scopo la determinazione dei parametri caratteristici delle batterie in una condizione di lavoro propria per un veicolo elettrico ibrido PHEV.

Il ciclo di prova da effettuare è costituito da gradini di scarica e carica a diversa potenza e viene ripetuto fino al raggiungimento della tensione di fine scarica.

I set-up di potenza indicati nella Figura 7 sono validi per una batteria standard da 11,6 kWh di energia alla potenza nominale di 10 kW, adatta per alimentare un veicolo ibrido PHEV con un peso di 1500 kg, con un intervallo di percorrenza di circa 64 km in modalità puramente elettrica.

Per effettuare prove su batterie più piccole si possono dividere tali valori di potenza per un opportuno fattore di scala ( $f_s$ ), pari al rapporto tra l'energia nominale della batteria standard e quella della batteria effettivamente in prova (ad esempio se la batteria in prova ha una energia nominale pari a 3 kWh si avrà un  $f_s$  pari a 3,86).

Al termine di questa fase occorre ricaricare la batteria secondo la procedura di carica fondo con corrente pari a C/3.

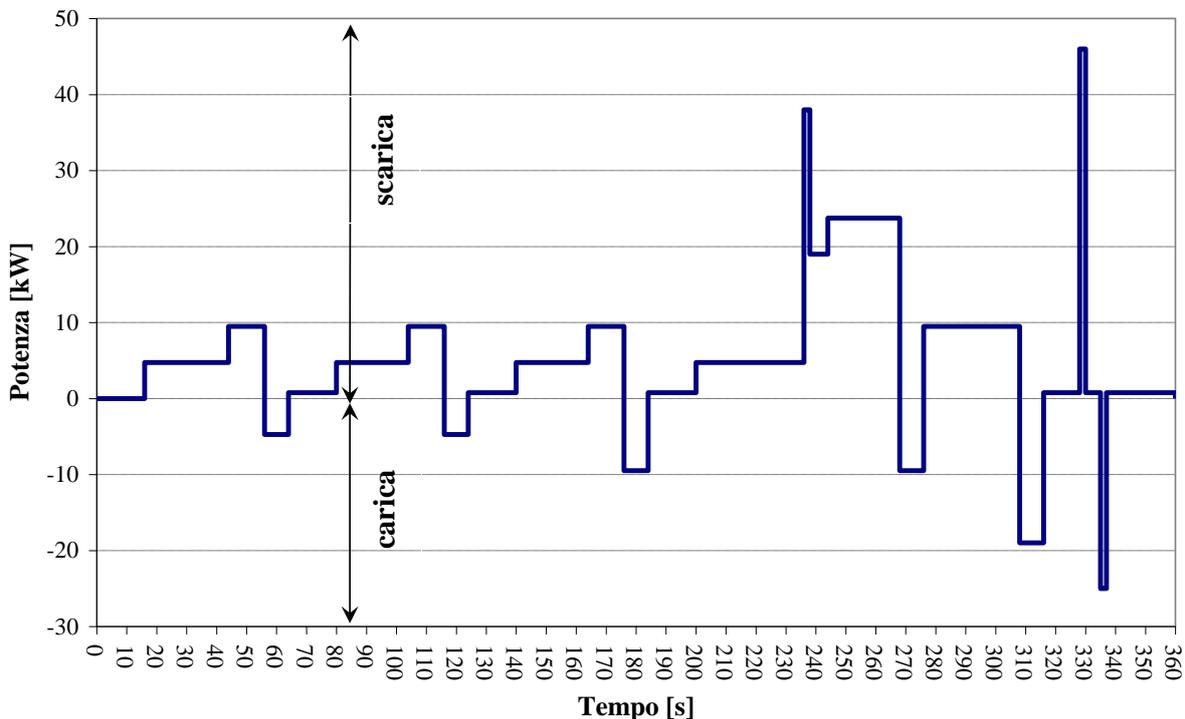


Figura 7. Ciclo da ripetere nella prova di sollecitazione dinamica per veicolo elettrico ibrido.

La tabella 14 riporta i set-up di potenza e la durata dei singoli gradini che costituiscono il ciclo di prova.

**Tabella 14. Elenco dei valori di potenza (divisi per il fattore di scala) e durata dei singoli gradini del ciclo della prova di sollecitazione dinamica, convenzione dei generatori.**

Gradino No.	Durata [s]	Potenza [kW]	Gradino No.	Durata [s]	Potenza [kW]
1	16	0	14	36	4,75/fs
2	28	4,75/fs	15	2	38/fs
3	12	9,5/fs	16	6	19/fs
4	8	-4,75/fs	17	24	23,75/fs
5	16	0,76/fs	18	8	-9,5/fs
6	24	4,75/fs	19	32	9,5/fs
7	12	9,5/fs	20	8	-19/fs
8	8	-4,75/fs	21	12	0,76/fs
9	16	0,76/fs	22	2	46/fs
10	24	4,75/fs	23	5	0,76/fs
11	12	9,5/fs	24	2	-25/fs
12	8	-9,5/fs	25	23	0,76/fs
13	16	-0,76/fs			

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali, ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

Il ciclo di base viene ripetuto fino a che la tensione di una singola cella, o dell'intera batteria, non scenda al di sotto della tensione minima fornita dal costruttore.

Al termine di questa fase occorre ricaricare la batteria secondo la procedura di carica a fondo con corrente pari a C/3.

Nella tabella 15 è illustrata la sequenza da seguire per l'esecuzione della prova.

**Tabella 15. Sequenza per l'esecuzione della prova di sollecitazione dinamica per veicolo ibrido**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard a C/3	§6.5
2	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
3	Esecuzione del ciclo di Figura 7 fino al raggiungimento della condizione di fine scarica	§8.4.1
4	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
5	Carica a fondo a C/3	§6.3.1

Durante la prova devono essere registrate la tensione delle singole celle, qualora disponibili, e la tensione di batteria, la corrente e la temperatura con un tempo di campionamento pari a 1 s. Tali grandezze permettono la determinazione dei parametri d'interesse secondo la metodologia di calcolo descritta nel §11.

Lo scopo della prova è verificare l'attitudine della batteria a lavorare in una applicazione tipica per un veicolo ibrido attraverso la determinazione dei seguenti parametri:

- Numero di cicli completati
- Capacità (Ah) ed energia (kWh) scaricati
- Capacità (Ah) ed energia (kWh) caricati nelle fasi di frenatura
- Rendimento amperometrico ed energetico
- Resistenza interna di scarica, e picco di potenza in scarica

La resistenza di scarica è calcolata a partire dal rapporto tra la differenza di tensione e di corrente che si verificano tra il gradino 14 e il gradino 15 del ciclo riportato in Figura 7:

$$R_{dch} = \frac{V_{14} - V_{15}}{I_{15} - I_{14}} \quad (8.2)$$

Dove  $V_{14}$ ,  $I_{14}$  sono la tensione e la corrente al termine del gradino 14, mentre  $V_{15}$ ,  $I_{15}$  sono la tensione e la corrente al termine del gradino 15.

La tensione a circuito aperto è data dalla seguente relazione:

$$OCV = V_{14} + I_{14} \cdot R_{dch} \quad (8.3)$$

La massima potenza erogabile dalla batteria è il valore di potenza, che a partire da una tensione di circuito aperto pari a OCV determina una caduta di potenziale tale da determinare il raggiungimento della tensione di fine scarica. Questa quantità, considerando  $V_{min}$  la tensione minima di batteria, può essere così calcolata:

$$P_{dch} = \frac{V_{min} \cdot (OCV - V_{min})}{R_{dch}} \quad (8.4)$$

Il calcolo della resistenza e della potenza di picco deve essere ripetuto per diversi valori dello stato di carica (90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20%, 10%).

#### 8.4.2 Prova “potenza assistita” per veicolo elettrico ibrido

La prova, definita a partire dal ciclo proposto dall’EUCAR, e basata sul profilo illustrato in Figura 8, ha come scopo la determinazione dei parametri caratteristici delle batterie in una condizione di lavoro propria per un veicolo elettrico ibrido a potenza assistita.

Il ciclo di prova da effettuare è costituito da gradini di scarica e carica a diversi valori di corrente e viene ripetuto nell’intorno di un determinato valore dello stato di carica. In questo profilo è presente un bilancio tra la capacità scaricata e quella accumulata in carica, ma se l’efficienza amperometrica della batteria non è esattamente al 100% si potrebbe verificare un fenomeno di deriva della tensione. E’ quindi raccomandabile regolare la durata della ricarica a 2C in modo da evitare questo problema.

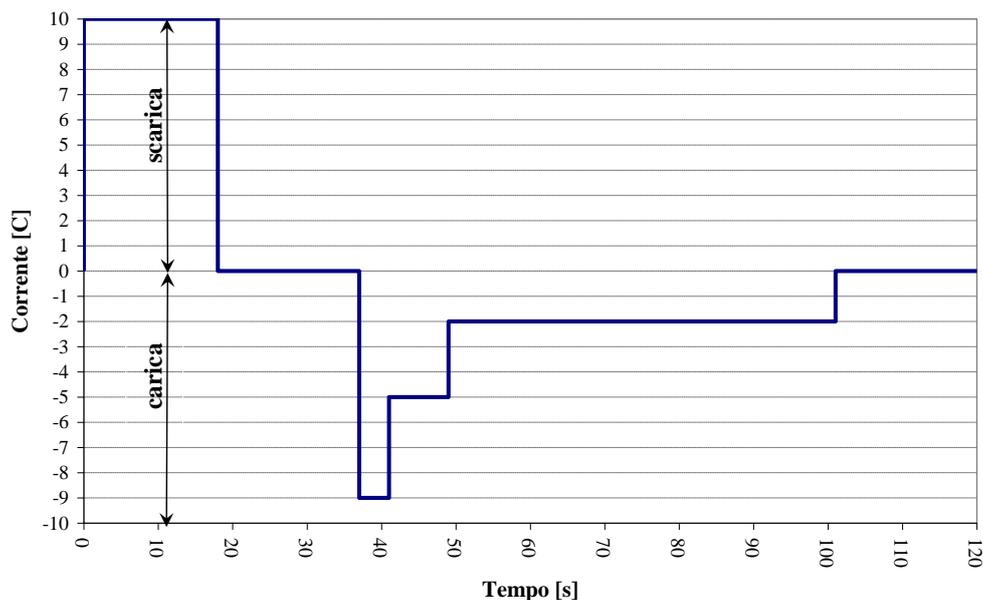


Figura 8. Ciclo da ripetere nella prova “potenza assistita”.

La tabella 16 riporta i set-up di potenza e la durata dei singoli gradini che costituiscono il ciclo di prova.

**Tabella 16. Elenco dei valori di corrente (divisi per il fattore di scala) e durata dei singoli gradini del ciclo di vita "Potenza assistita", convenzione dei generatori.**

Gradino No.	Durata [s]	Corrente [A]
1	18	10C
2	19	0
3	4	-9C
4	8	-5C
5	52	-2C
6	19	0

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali, deve essere mantenuta a temperatura controllata per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova e quindi scaricata con corrente pari a C/3 fino al raggiungimento del valore dello stato di carica di riferimento pari al 60%.

Il ciclo di lavoro riportato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** deve essere ripetuto continuamente ma, per evitare eccessivi abbassamenti dello stato di carica e la disequalizzazione nel caso di sistemi batterie ad elevato numero di celle, la batteria sarà caricata completamente a temperatura ambiente pari a 20°C e con corrente pari a C/3 dopo 500 profili.

Al termine di questa fase occorre ricaricare la batteria secondo la procedura di carica a fondo con corrente pari a C/3.

Nella tabella 17 è illustrata la sequenza da seguire per l'esecuzione della prova.

**Tabella 17. Sequenza per l'esecuzione della prova "potenza assistita" per veicolo elettrico ibrido.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard a C/3	§6.5
2	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
3	Scarica standard fino al raggiungimento del 60% del SOC	§6.4.2
4	Esecuzione del ciclo di Figura 8 per 500 profili consecutivi	§8.4.2
5	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
6	Carica a fondo a C/3	§6.3.1

Durante la prova devono essere registrate la tensione delle singole celle, qualora disponibili, e la tensione di batteria, la corrente e la temperatura con un tempo di campionamento pari a 1 s. Tali grandezze permettono la determinazione dei parametri d'interesse secondo la metodologia di calcolo descritta nel §11.

Lo scopo della prova è verificare l'attitudine della batteria a lavorare in una applicazione tipica per un veicolo ibrido attraverso la determinazione dei seguenti parametri:

- Numero di cicli completati
- Capacità (Ah) ed energia (kWh) scaricati
- Capacità (Ah) ed energia (kWh) caricati nelle fasi di frenatura

- Rendimento amperometrico ed energetico
- Resistenza interna di scarica, e picco di potenza in scarica

### 8.5 Cicli di prova per veicolo puramente elettrico

Nella seguente sezione sono descritte due diverse tipologie di prove per veicolo puramente elettrico tratte rispettivamente dal consorzio USABC e dal comitato EUCAR. Le due prove, utili per verificare le prestazioni delle batterie litio-ioni durante cicli di lavoro tipici per l'applicazione in veicoli puramente elettrici, consentono anche la verifica della vita utile della batteria quantificata in cicli di vita.

#### 8.5.1 Prova di sollecitazione dinamica per veicolo puramente elettrico

La prova basata sul profilo riportato nella norma CEI EN 61982-3, ed illustrato in **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.**, ha come scopo la misura dei parametri caratteristici delle batterie in una condizione di lavoro propria per un veicolo puramente elettrico. Il ciclo di prova da effettuare è costituito da gradini di scarica e carica a diversa potenza e viene ripetuto fino al raggiungimento della tensione di fine scarica.

I set-up di potenza indicati nella **Errore. L'origine riferimento non è stata trovata.** sono validi per una batteria standard da 40 kWh di energia alla potenza nominale, adatta per alimentare un veicolo puramente elettrico con un peso di circa 2000 kg, per un intervallo di percorrenza di 250 km.

Per effettuare prove su batterie più piccole si possono dividere tali valori di potenza per un opportuno fattore di scala (fs), pari al rapporto tra l'energia nominale della batteria standard e quella della batteria effettivamente in prova (ad esempio se la batteria in prova ha una energia nominale pari a 8 kWh si avrà un fs pari a 5).

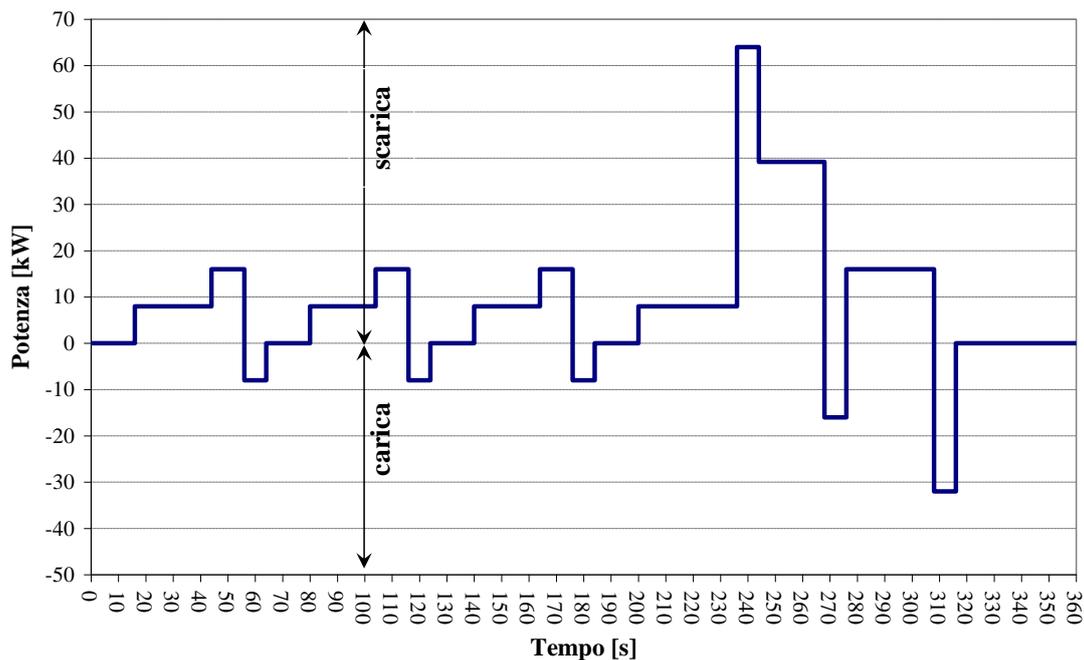


Figura 9. Ciclo da ripetere nella prova di sollecitazione dinamica.

La tabella 18 riporta i set-up di potenza e la durata dei singoli gradini che costituiscono il ciclo di prova.

**Tabella 18. Elenco dei valori di potenza (divisi per il fattore di scala) e durata dei singoli gradini del ciclo della prova di sollecitazione dinamica, convenzione dei generatori.**

Gradino No.	Durata [s]	Potenza [kW]	Gradino No.	Durata [s]	Potenza [kW]
1	16	0	11	12	16/fs
2	28	8/fs	12	8	-8/fs
3	12	16/fs	13	16	0
4	8	-8/fs	14	36	8/fs
5	16	0	15	8	64/fs
6	24	8/fs	16	24	39,2/fs
7	12	16/fs	17	8	-16/fs
8	8	-8/fs	18	32	16/fs
9	16	0	19	8	-32/fs
10	24	8/fs	20	44	0

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali, ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

Il ciclo di base viene ripetuto fino a che la tensione di una singola cella, o dell'intera batteria, non scenda al di sotto della tensione minima fornita dal costruttore.

Al termine di questa fase occorre ricaricare la batteria secondo la procedura di carica a fondo con corrente pari a C/3.

Nella tabella 19 è illustrata la sequenza da seguire per l'esecuzione della prova.

**Tabella 19. Sequenza per l'esecuzione della prova di sollecitazione dinamica per veicolo puramente elettrico.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard a C/3	§6.5
2	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
3	Esecuzione del ciclo di Figura 9 fino al raggiungimento della condizione di fine scarica	§8.5.1
4	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
5	Carica a fondo a C/3	§6.3.1

Durante la prova devono essere registrate la tensione delle singole celle, qualora disponibili, e la tensione di batteria, la corrente e la temperatura con un tempo di campionamento pari a 1 s. Tali grandezze permettono la determinazione dei parametri d'interesse secondo la metodologia di calcolo descritta nel §11.

Lo scopo della prova è verificare l'attitudine della batteria a lavorare in una applicazione tipica per un veicolo puramente elettrico attraverso la determinazione dei seguenti parametri:

- Numero di cicli completati
- Capacità (Ah) ed energia (kWh) scaricati
- Capacità (Ah) ed energia (kWh) caricati nelle fasi di frenatura
- Rendimento amperometrico ed energetico
- Resistenza interna di scarica, e picco di potenza in scarica

La resistenza di scarica è calcolata a partire dal rapporto tra la differenza di tensione e di corrente che si verificano tra il gradino 14 e il gradino 15 del ciclo di Figura 9:

$$R_{dch} = \frac{V_{14} - V_{15}}{I_{15} - I_{14}} \quad (8.5)$$

dove  $V_{14}$ ,  $I_{14}$  sono la tensione e la corrente al termine del gradino 14, mentre  $V_{15}$ ,  $I_{15}$  sono la tensione e la corrente al termine del gradino 15.

La tensione a circuito aperto è data dalla seguente relazione:

$$OCV = V_{14} + I_{14} \cdot R_{dch} \quad (8.6)$$

La massima potenza erogabile dalla batteria è il valore di potenza, che a partire da una tensione di circuito aperto pari a OCV determina una caduta di potenziale tale da determinare il raggiungimento della tensione di fine scarica. Questa quantità, considerando  $V_{\min}$  la tensione minima di batteria, può essere così calcolata:

$$P_{dch} = V_{\min} \cdot \frac{(OCV - V_{\min})}{R_{dch}} \quad (8.7)$$

Il calcolo della resistenza e della potenza di picco deve essere ripetuto per diversi valori dello stato di carica (90%, 80%, 70%, 60%, 50%, 40%, 30%, 20%, 10%).

### 8.5.2 Prova bimodale alta potenza per veicolo puramente elettrico

La prova basata sul profilo riportato nella norma EUCAR, ed illustrato in Figura 10, ha come scopo la misura dei parametri caratteristici delle batterie in una condizione di lavoro propria per un veicolo puramente elettrico.

Il ciclo di prova da effettuare è costituito da gradini di scarica e carica a diversa potenza e viene ripetuto fino al raggiungimento della tensione di fine scarica.

I set-up di potenza indicati nella Figura 10 sono validi per una batteria standard da 15 kWh di energia alla potenza nominale, in grado di consegnare 250 W/kg con un SOC del 40%, adatta per alimentare un veicolo puramente elettrico con un peso di circa 1150 kg, per un intervallo di percorrenza di 113 km.

Per effettuare prove su batterie più piccole si possono dividere tali valori di potenza per un opportuno fattore di scala ( $f_s$ ), pari al rapporto tra l'energia nominale della batteria standard e quella della batteria effettivamente in prova (ad esempio se la batteria in prova ha una energia nominale pari a 5 kWh si avrà un  $f_s$  pari a 3).

Al termine di questa fase occorre ricaricare la batteria secondo la procedura di carica fondo con corrente pari a C/3.

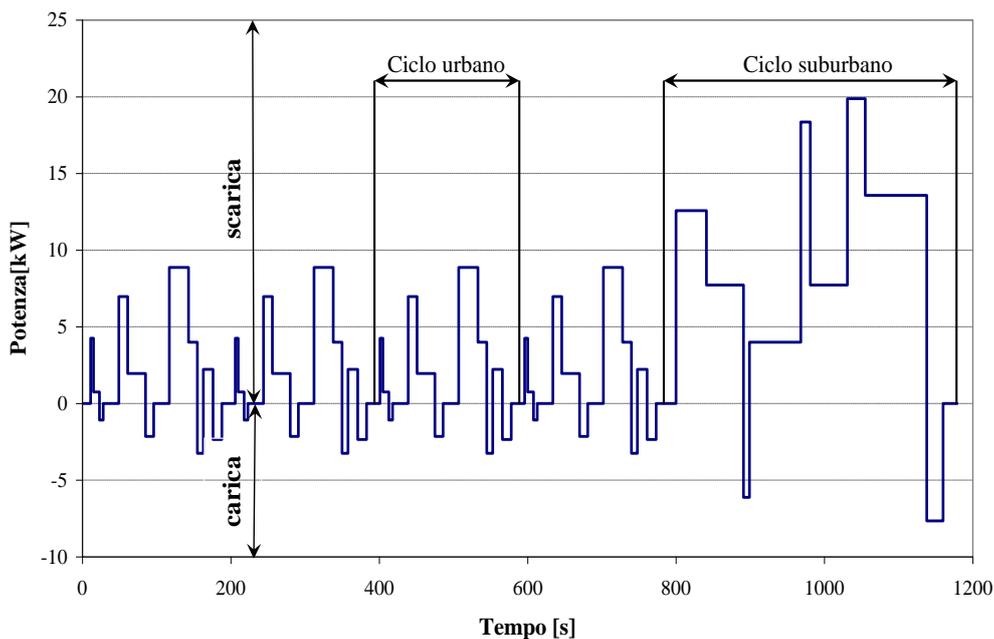


Figura 10. Ciclo da ripetere nella prova bimodale alta potenza.

La tabella 20 riporta i set-up di potenza e la durata dei singoli gradini che costituiscono il ciclo di prova.

Tabella 20. Elenco dei valori di potenza (divisi per il fattore di scala) e durata dei singoli gradini del ciclo di vita bimodale alta potenza, convenzione dei generatori.

ECE Ciclo Urbano			EUDC Ciclo Suburbano		
Gradino No.	Durata [s]	Potenza [kW]	Gradino No.	Durata [s]	Potenza [kW]
1	11	0	1	20	0
2	4	4,25/fs	2	41	12,575/fs
3	8	0,75/fs	3	50	7,725/fs
4	5	-1,075/fs	4	8	-6,125/fs
5	21	0	5	69	4/fs
6	12	6,975/fs	6	13	18,35/fs
7	24	1,950/fs	7	50	7,725/fs
8	11	-2,150/fs	8	24	19,875/fs
9	21	0	9	83	13,575/fs
10	26	8,875/fs	10	22	-7,65/fs
11	12	4/fs	11	20	0
12	8	-3,25/fs			
13	13	2,225/fs			
14	12	-2,35/fs			
15	7	0			

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali, ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

Il ciclo di base viene ripetuto fino a che la tensione di una singola cella, o dell'intera batteria, non scenda al di sotto della tensione minima fornita dal costruttore.

Al termine di questa fase occorre ricaricare la batteria secondo la procedura di carica a fondo con corrente pari a C/3.

Nella tabella 21 è illustrata la sequenza da seguire per l'esecuzione della prova:

**Tabella 21. Sequenza per l'esecuzione della prova "bimodale alta potenza" per veicolo puramente elettrico.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard a C/3	§6.5
2	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
3	Esecuzione del ciclo di Figura 10 fino al raggiungimento della condizione di fine scarica	§8.5.2
4	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
5	Carica a fondo a C/3	§6.3.1

Durante la prova devono essere registrate la tensione delle singole celle, qualora disponibili, e la tensione di batteria, la corrente e la temperatura di batteria con un tempo di campionamento pari a 1 s. Tali grandezze permettono la determinazione dei parametri d'interesse secondo la metodologia di calcolo descritta nel §11.

Lo scopo della prova è verificare l'attitudine della batteria a lavorare in una applicazione tipica per un veicolo puramente elettrico attraverso la determinazione dei seguenti parametri:

- Numero di cicli completati
- Capacità (Ah) ed energia (kWh) scaricati
- Capacità (Ah) ed energia (kWh) caricati nelle fasi di frenatura
- Rendimento amperometrico ed energetico

## 9 Prove specialistiche per stazionario

Le prove di caratterizzazione di base, permettono la stima dei parametri caratteristici degli accumulatori elettrochimici attraverso cicli di lavoro puramente a corrente costante.

Nelle applicazioni per lo stazionario<sup>1</sup> la batteria è sottoposta a cicli di scarica e carica di diversa intensità e durata, in funzione dell'applicazione a cui è rivolta. La caratterizzazione delle batterie per stazionario deve dunque passare per una caratterizzazione più approfondita in cui vengono simulate le situazioni tipiche a cui sono sottoposti gli accumulatori elettrochimici per stazionario.

Le applicazioni delle batterie per lo stazionario si possono suddividere in tre categorie principali:

- a) Time shift;
- b) Power balancing;
- c) Power ancillary services.

Nel time shift, il sistema di accumulo è utilizzato per immagazzinare energia in un certo periodo, per poi utilizzarla diverse ore dopo, quando si ha una richiesta di potenza. La durata delle fasi di scarica varia tra 1 e 10 ore, con diverse profondità di scarica e sollecitazioni prossime alla potenza nominale.

Nel power balancing, il sistema di accumulo è utilizzato per livellare la curva di produzione e di carico. Questa applicazione determina la necessità di avere una batteria in grado di lavorare con elevate energie e potenze, ed in grado di transitare velocemente tra la fase di carica e scarica. Tipicamente, la durata delle fasi di scarica varia da un paio di secondi fino a un'ora con variazioni della potenza tra lo 0% e il 100% della potenza nominale.

Nel power ancillary services, il sistema di accumulo è utilizzato per fornire potenza di picco per i servizi ancillari della rete, in funzione delle condizioni di rete. L'applicazione necessita tempi di risposta inferiori al secondo con diversi cicli di carica e scarica a diversi stati di carica.

Nel seguito della procedura, è illustrato un esempio di prova per batteria litio-ioni in applicazioni per lo stazionario nel caso di power balancing, che può rappresentare l'utilizzo delle batterie veicolari connesse in rete a compensare le fluttuazione della potenza da fonti rinnovabili.

### 9.1 Misura degli autoconsumi

Le batterie al litio-ioni, come descritto nel §5, sono dotate di un sistema elettronico di controllo e gestione, che evita l'instaurarsi dei fenomeni di sovraccarica, sovrascarica e sovratemperatura.

Questi dispositivi prendono l'alimentazione necessaria per il loro funzionamento dalla batteria stessa, determinando nelle fasi di stand-by del dispositivo degli autoconsumi, che vanno ad aggiungersi ai fenomeni di autoscarica della batteria.

Lo scopo, della prova illustrata nel seguito, è quello di misurare gli autoconsumi prodotti dall'elettronica di controllo, quando la batteria è in stand-by.

La prova per la misura degli autoconsumi si compone di una prima fase in cui l'elemento in prova viene sottoposto a un ciclo standard, secondo la procedura di carica descritta nel §6.5, e di una fase in cui la batteria è lasciata scollegata dalla strumentazione di prova per evitare eventuali correnti di dispersione, ma mantenendo l'elettronica di controllo in funzione, per un periodo di tempo almeno pari a 30 giorni, a temperatura ambiente pari a 20°C.

Al termine di questo intervallo temporale si procede con una ricarica a fondo della batteria, con corrente costante pari a  $C/2$ , per ripristinare la carica persa dalla batteria per il fenomeno degli autoconsumi, considerando comunque trascurabili gli effetti prodotti dall'autoscarica della batteria.

Nella tabella 22 è riportata la sequenza per l'esecuzione della misura degli autoconsumi.

---

<sup>1</sup> Si considerano applicazioni innovative con batteria connessa alla rete in modo dinamico, come la fornitura di servizi ancillari di rete da parte di batterie veicolari, e non applicazioni tradizionali quali i gruppi di continuità.



**Tabella 23. Elenco dei valori di potenza (divisi per il fattore di scala) e durata dei singoli gradini del ciclo di prova per Time Shift, convenzione dei generatori.**

Gradino No.	Durata [min]	Potenza [kW]	Gradino No.	Durata [min]	Potenza [kW]
1	15	0	16	15	0,9/fs
2	180	-3,1/fs	17	15	0,2/fs
3	270	0	18	150	0
4	30	0,2/fs	19	15	0,3/fs
5	15	0,9/fs	20	15	1/fs
6	15	1,4/fs	21	15	0,3/fs
7	15	1/fs	22	105	1/fs
8	15	1,7/fs	23	15	1,8/fs
9	15	1,2/fs	24	15	2,1/fs
10	15	0,5/fs	25	30	1,6/fs
11	15	1,3/fs	26	45	2,5/fs
12	15	0,4/fs	27	15	1,6/fs
13	45	0	28	15	0,8/fs
14	30	0,3/fs	29	15	0,3/fs
15	15	0,7/fs	30	255	0

Prima della prova la batteria deve essere sottoposta a un ciclo standard, descritto nel §6.5, in modo da assicurare le medesime condizioni iniziali, ed inoltre deve essere mantenuta a temperatura controllata per un numero di ore necessario al raggiungimento della temperatura di prova.

Il ciclo di lavoro riportato in Figura 11 deve essere ripetuto continuamente ma, per evitare eccessivi abbassamenti dello stato di carica e la disequalizzazione nel caso di sistemi batterie ad elevato numero di celle, la batteria sarà caricata completamente a temperatura ambiente pari a 20°C e con corrente pari a C/2 dopo 30 profili.

Nella tabella 24 è illustrata la sequenza da seguire per l'esecuzione della prova.

**Tabella 24. Sequenza per l'esecuzione della prova per Time Shift.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard a C/2	§6.5
2	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
3	Esecuzione del ciclo di Figura 11	§9.2
4	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
5	Scarica a fondo a C/2	§6.4.1
6	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
7	Carica standard	§6.3.2

Durante la prova devono essere registrate la tensione delle singole celle, qualora disponibili, e la tensione di batteria, la corrente e la temperatura con un tempo di campionamento minimo pari a 1 min. Tali grandezze permettono la determinazione dei parametri d'interesse secondo la metodologia di calcolo descritta nel §11.

Lo scopo della prova è verificare l'attitudine della batteria a lavorare in tale applicazione, attraverso la determinazione dei seguenti parametri:

- Capacità (Ah scaricati)
- Energia (kWh scaricati)
- Rendimento amperometrico

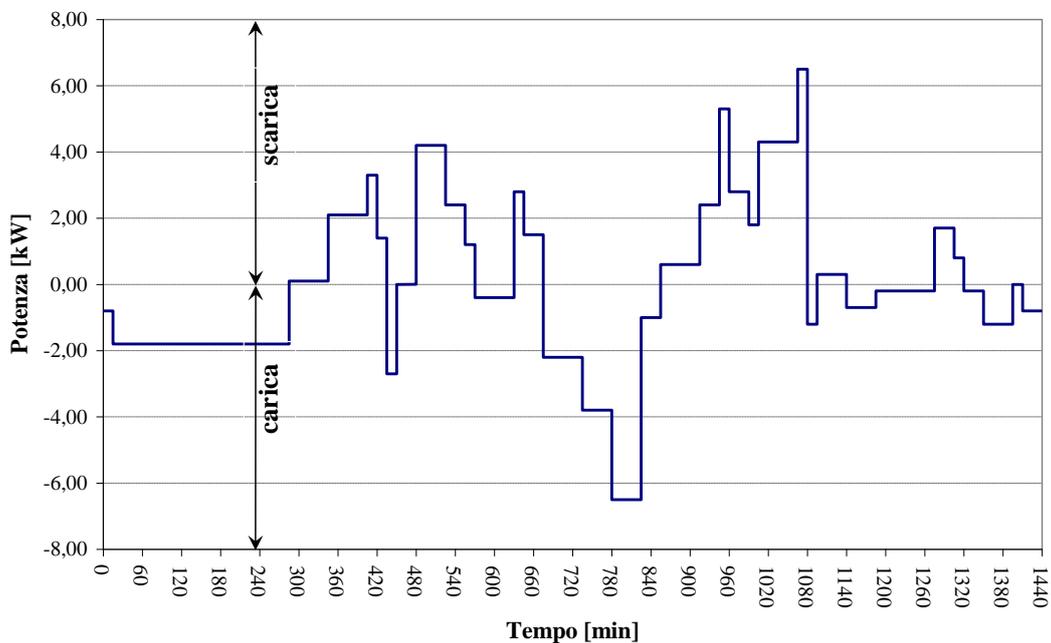
- Rendimento energetico

### 9.3 Prova per power balancing

La prova, basata sul profilo di Figura 12, ha come scopo la determinazione di alcuni parametri prestazionali delle batterie, nel caso in cui l'accumulatore elettrochimico è accoppiato a fonti rinnovabili con funzione di power balancing.

Il ciclo di prova è costituito da gradini di carica e scarica di diversa ampiezza, garantisce il mantenimento dello stato di carica tra l'inizio e la fine della prova, e può essere realizzato a partire da uno stato iniziale di energia per la batteria standard pari a 3 kWh.

I set-up di potenza indicati nella Figura 12 sono validi per una batteria standard da 15kWh di energia alla potenza nominale. Per effettuare prove su batterie più piccole si possono dividere tali valori di potenza per un opportuno fattore di scala (fs), pari al rapporto tra l'energia nominale della batteria standard e quella della batteria effettivamente in prova (ad esempio se la batteria in prova ha una energia nominale pari a 3 kWh si avrà un fs pari a 5).



**Figura 12. Profilo di carica/scarica per power balancing.**

La tabella 25 riporta i set-up di potenza e la durata dei singoli gradini che costituiscono il ciclo di prova.

**Tabella 25. Elenco dei valori di potenza (divisi per il fattore di scala) e durata dei singoli gradini del ciclo di prova per Power Balancing, convenzione dei generatori.**

Gradino No.	Durata [min]	Potenza [kW]	Gradino No.	Durata [min]	Potenza [kW]
1	15	-0,8/fs	19	60	0,6/fs
2	270	-1,8/fs	20	30	2,4/fs
3	60	0,1/fs	21	15	5,3/fs
4	60	2,1/fs	22	30	2,8/fs
5	15	3,3/fs	23	15	1,8/fs
6	15	1,4/fs	24	60	4,3/fs
7	15	-2,7/fs	25	15	6,5/fs
8	30	0	26	15	-1,2/fs
9	45	4,2/fs	27	45	0,3/fs
10	30	2,4/fs	28	45	-0,7/fs
11	15	1,2/fs	29	90	-0,2/fs
12	60	-0,4/fs	30	30	1,7/fs
13	15	2,8/fs	31	15	0,8/fs
14	30	1,5/fs	32	30	-0,2/fs
15	60	-2,2/fs	33	45	-1,2/fs
16	45	-3,8/fs	34	15	0
17	45	-6,5/fs	35	30	-0,8/fs
18	30	-1/fs			

Il ciclo di lavoro riportato in Figura 12 deve essere ripetuto continuamente ma, per evitare eccessivi abbassamenti dello stato di carica e la disequalizzazione nel caso di sistemi batterie ad elevato numero di celle, la batteria sarà caricata completamente a temperatura ambiente pari a 20°C e con corrente pari a C/2 dopo 30 profili.

Nella tabella 26 è illustrata la sequenza da seguire per l'esecuzione della prova.

**Tabella 26. Sequenza per l'esecuzione della prova per Power Balancing.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard a C/2	§6.5
2	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
3	Esecuzione del ciclo di Figura 12	§9.3
4	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
5	Scarica a fondo a C/2	§6.4.1
6	Acclimatizzazione a 20°C	§4.2
7	Carica standard	§6.3.2

Durante la prova devono essere registrate la tensione delle singole celle, qualora disponibili, e la tensione di batteria, la corrente e la temperatura con un tempo di campionamento pari a 1 min. Tali grandezze permettono la determinazione dei parametri d'interesse secondo la metodologia di calcolo descritta nel §11.

Lo scopo della prova è verificare l'attitudine della batteria a lavorare in tale applicazione, attraverso la determinazione dei seguenti parametri:

- Capacità (Ah scaricati)
- Energia (kWh scaricati)

- Rendimento amperometrico
- Rendimento energetico

## 10 Cicli di vita

La prova per i cicli di vita consente di verificare la vita attesa della batteria in termini di cicli compiuti in funzione della tipologia di applicazione. In generale la vita attesa della batteria viene quantificata come il numero di cicli completi effettuati dalla batteria prima di osservare una riduzione della capacità pari al 20% del valore osservato inizialmente. La sequenza per l'esecuzione delle prove di vita è riportata nella tabella 27.

**Tabella 27. Sequenza per l'esecuzione della prova per la determinazione dei cicli di vita.**

N° Fase	Descrizione della fase	N° Paragrafo
1	Ispezione iniziale	§6.1
2	Cicli di preconditionamento	§6.6
3	Check-up parametrico	§10.1
4	Prova ciclica	§10.2
5	Esecuzione delle fasi 3 e 4 fino al raggiungimento della condizione di fine vita	

### 10.1 Check-up parametrico

Il check-up dei parametri è una serie di prove che vengono eseguite prima e dopo ogni sequenza di cicli vita, e che consente di verificare la variazione dei parametri significativi delle batterie litio-ioni a seguito dell'invecchiamento determinato dai cicli di vita.

L'esecuzione del Check-up parametrico si effettua attraverso la sequenza di prove di tabella 28, effettuata a temperatura ambiente pari a 20°C:

**Tabella 28. Sequenza per l'esecuzione del Check-up parametrico.**

N° Fase	Descrizione della Fase	N° Paragrafo
1	Ciclo standard a C/3 (applicazione veicolare) o a C/2 (stazionario)	§6.5
2	Prova per la stima del picco di potenza e della resistenza interna	§7.4
3	Prova per la misura della resistenza interna serie	§7.5
4	Ciclo standard a C/3 (applicazione veicolare) o a C/2 (stazionario)	§6.5

Il check-up parametrico permette di verificare le variazioni della capacità della batteria alla corrente di riferimento, la stima del picco di potenza e della resistenza interna della batteria, che rappresentano i parametri di riferimento per la verifica dello stato di salute di una batteria litio-ioni.

### 10.2 Prova ciclica

La procedura di prova per la determinazione dei cicli di vita delle batterie litio-ioni, sia per applicazioni veicolari che per applicazioni nello stazionario, viene effettuata eseguendo i cicli di prova presentati nelle sezioni precedenti in modo continuativo.

Nel caso di prove in cui la batteria non viene mai caricata e scaricata completamente, come nel caso del ciclo "potenza assistita", il numero di cicli effettuati può essere stimato rapportando la capacità complessiva scaricata per il valore di capacità di riferimento.

Nella tabella 29 sono contenuti il numero di cicli da eseguire per ciascuna tipologia di prova prima di eseguire un nuovo check-up dei parametri.

**Tabella 29. Numero di ciclo per ciascuna tipologia di ciclo di prova.**

<b>Applicazione</b>	<b>Titolo della prova</b>	<b>N° Paragrafo</b>	<b>N° cicli prima di un Check-up parametrico</b>
Veicolo PHEV	Ciclo "sollecitazione dinamica per veicolo ibrido"	§8.4.1	25
	Ciclo "potenza assistita"	§8.4.2	25
Veicolo EV	Ciclo sollecitazione dinamica per veicolo puramente elettrico	§8.5.1	25
	Ciclo "bimodale alta potenza"	§8.5.2	25
Stazionario	Ciclo per Time Shift	§9.2	30
	Ciclo per Power Balancing	§9.3	30

## 11 Analisi dei risultati di test

### 11.1 Calcolo della capacità

La capacità di una batteria è la carica che può essere estratta durante la scarica completa. La misura della capacità di una batteria si ottiene integrando la corrente registrata durante la scarica, tra il tempo di inizio e di fine scarica espressi entrambi in ore, secondo la seguente formula:

$$C_{dch} = \int_{t_{in}}^{t_{fin}} i_{dch}(t) dt \quad (11.1)$$

La misura della capacità deve essere ripetuta per tutte le diverse prove di scarica effettuate, in modo da ottenere il valore della capacità a diverse correnti di scarica e diverse temperature.

### 11.2 Calcolo dell'energia

Analogamente alla misura di capacità, la misura dell'energia accumulata in una batteria, espressa in Wh, si effettua integrando la potenza di scarica tra il tempo di inizio e di fine scarica, esprimendo entrambi in ore:

$$E_{scarica} = \int_{t_{in}}^{t_{fin}} P_{scarica}(t) dt = \int_{t_{in}}^{t_{fin}} V_{batteria}(t) \cdot i_{scarica}(t) dt \quad (11.2)$$

### 11.3 Calcolo della potenza media

La misura della potenza media erogata durante ciascuna prova dalla batteria, espressa in W, è effettuata calcolando la media della potenza istantanea di scarica tra il tempo di inizio e di fine scarica:

$$\bar{P} = \frac{1}{t_{fin} - t_{in}} \int_{t_{in}}^{t_{fin}} P_{dch}(t) dt = \frac{1}{t_{fin} - t_{in}} \int_{t_{in}}^{t_{fin}} V_{batteria}(t) \cdot i_{dch}(t) dt \quad (11.3)$$

### 11.4 Misura del rendimento amperometrico

Il valore del rendimento amperometrico è ottenuto dal rapporto tra la carica estratta dalla batteria durante la scarica e quella ripristinata durante la successiva ricarica, secondo la seguente formula:

$$\eta_C = \frac{C_{dch}}{C_{ch}} \cdot 100 \quad (11.4)$$

Dove  $C_{dch}$  si ottiene integrando la corrente di scarica secondo la modalità riportata nel §11.1, e  $C_{ch}$  si ottiene integrando la corrente registrata durante la successiva ricarica a fondo tra il tempo di inizio e fine carica. Perché la misura sia corretta è necessario che lo stato di carica della batteria alla fine della prova sia uguale a quello iniziale; per questo motivo la prova ha inizio e si conclude con batteria pienamente carica.

### 11.5 Misura del rendimento energetico

Il rendimento energetico della batteria è ottenuto dal rapporto tra l'energia scaricata durante la prova di scarica e l'energia caricata durante la ricarica seguente, secondo la seguente formula:

$$\eta_E = \frac{E_{dch}}{E_{ch}} \cdot 100 \quad (11.5)$$

dove  $E_{dch}$  si ottiene integrando la potenza di scarica secondo la modalità riportata nel §11.2, e  $E_{ch}$  si ottiene integrando la potenza registrata durante la successiva ricarica tra il tempo di inizio e fine carica. Perché la misura sia corretta è necessario che il contenuto energetico della batteria alla fine della prova sia uguale a quello iniziale; per questo motivo la prova ha inizio e si conclude con batteria pienamente carica.

### 11.6 Calcolo della densità di energia

La densità di energia di una batteria si ottiene dividendo il valore dell'energia scaricata, calcolata secondo la modalità espressa nel § 11.2, per il volume della batteria espresso in litri.

### 11.7 Calcolo dell'energia specifica

L'energia specifica di una batteria si ottiene dividendo il valore dell'energia scaricata, calcolata secondo la modalità espressa nel §11.2, per il peso della batteria espresso in kg.

### 11.8 Calcolo della densità di potenza

La densità di potenza di una batteria si ottiene dividendo il valore di potenza di scarica, calcolata secondo la modalità espressa nel §11.2, per il volume della batteria espresso in litri.

### 11.9 Calcolo della potenza specifica

L'energia specifica di una batteria si ottiene dividendo il valore di potenza di scarica, calcolata secondo la modalità espressa nel §11.2, per il peso della batteria espresso in kg.

### 11.10 Misura degli autoconsumi

La misura degli autoconsumi si ottiene dividendo la capacità e l'energia caricate, durante la fase di carica per il ripristino del SOC, per il numero di giorni in cui la batteria è rimasta in stand-by scollegata dalla apparecchiatura di prova, secondo le seguenti formule:

$$E_{SC} = \frac{E_{ch}}{T}; C_{SC} = \frac{C_{ch}}{T} \quad (11.6)$$

dove T è il tempo in cui la batteria è rimasta scollegata espresso in giorni.

### 11.11 Costruzione del diagramma di Ragone

Il diagramma di Ragone è un diagramma tipico dei sistemi di accumulo in cui si rappresenta l'energia specifica in funzione della potenza specifica delle diverse tecnologie di accumulo in scala logaritmica. Tale diagramma permette di rappresentare l'energia che si può estrarre dalla batteria al variare del regime di scarica ed è uno strumento di aiuto nella scelta della tecnologia più adatta per ogni applicazione.

Il diagramma si può ottenere a partire dalla prova di scarica a corrente costante, ripetuta per diversi valori di corrente (nel caso specifico a sette valori: C/5, C/2, C/3, 1C, 2C, 3C, I<sub>max\_dch</sub>), mettendo in relazione l'energia specifica calcolata per ciascuna prova secondo la modalità descritta nel §11.7 e la potenza media delle batterie durante ciascuna prova rapportata al peso.