RdS
RICERCA DI SISTEMA

ENEA
AGENZIA NAZIONALE PER LE NUOVE TECNOLOGIE, L'ENERGIA E LO SVILUPPO ECONOMICO SOSTENIBILE

MINISTERO DELL'AMBIENTE E DELLA SICUREZZA ENERGETICA

Ricerca di Sistema elettrico

LA3.1 - Accumulo: Studio per la diagnostica preventiva e la gestione della "fuga termica" per sistemi di accumulo elettrochimico al litio

Natascia Andrenacci, Carla Menale, Manlio Pasquali, Umberto Brandimarte, Fabio Felici, Stefano Constà, Vincenzo Sglavo

RdS_PTR 22-24_PR 1.7_LA3.1_014

LA3.1 - ACCUMULO: STUDIO PER LA DIAGNOSTICA PREVENTIVA E LA GESTIONE DELLA “FUGA TERMICA” PER SISTEMI DI ACCUMULO ELETTROCHIMICO AL LITIO

Natascia Andrenacci, Carla Menale, Manlio Pasquali, Umberto Brandimarte, Fabio Felici, Stefano Constà, Vincenzo Sglavo

Giugno 2023

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dell’Ambiente e della Sicurezza Energetica - ENEA
Piano Triennale di Realizzazione 2022-2024

Obiettivo: *Decarbonizzazione/Digitalizzazione ed evoluzione delle reti*
Progetto: Tecnologie per la penetrazione efficiente del vettore elettrico negli usi finali
Linea di attività: 3.1
Responsabile del Progetto: Claudia Meloni, ENEA
Responsabile Linea di Attività: Carla Menale, ENEA
Mese inizio previsto: 1
Mese inizio effettivo: 1
Mese fine previsto: 18
Mese fine effettivo: 18

Indice

1 RISULTATI ATTESI 3
2 RISULTATI OTTENUTI 4
3 PRODOTTI ATTESI 5
4 PRODOTTI SVILUPPATI 6
5 ANALISI DEGLI SCOSTAMENTI SU ATTIVITÀ E RISULTATI 7
6 SINTESI DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 8
7 DETTAGLIO DELLE ATTIVITÀ SVOLTE 9
8 CONTRIBUTO DELLE EVENTUALI CONSULENZE ALLE ATTIVITÀ SOPRA DESCRITTE 22
9 PUBBLICAZIONI SCIENTIFICHE 22
10 EVENTI DI DISSEMINAZIONE 22

1 Risultati attesi

Determinazione delle caratteristiche di fluidi in grado di contenere o sopprimere il Thermal Runaway. Sviluppo di algoritmi per la previsione della durata di vita e della variazione dello stato di salute delle celle.
L'algoritmo in oggetto è uno strumento di previsione del degrado delle celle in funzione di un determinato ciclo di lavoro, previsione che viene effettuata in fase progettuale prima dell'esecuzione del ciclo. Lo studio prevede anche l'attività complementare dello sviluppo di un algoritmo di stima dello stato di degrado delle celle che compongono il sistema di accumulo mentre questo esegue i cicli di lavoro

2 Risultati ottenuti

Sono stati selezionati i liquidi potenzialmente in grado di contenere o sopprimere la Thermal Runaway. L'utilizzo di tali fluidi potrà consentire l'incremento della sicurezza dei sistemi batteria garantendo una riduzione dei potenziali incidenti. Nella selezione dei liquidi si è tenuto conto anche del loro impatto sull'ambiente.
È stato progettato e realizzato il set-up sperimentale per effettuare test di nail penetration su celle a bustina da utilizzare nella campagna sperimentale che verrà condotta nell'annualità successiva.
Nell'ambito degli studi di invecchiamento, è stata implementata l'analisi dei principali meccanismi di invecchiamento delle celle litio-ione sottoposte a cicli di carica e scarica. Sulla base di questa, sono stati realizzati il disegno architetturale e l'implementazione di un algoritmo inteso a stimare l'andamento del degrado della capacità delle batterie. È stata inoltre effettuata una valutazione preliminare dei parametri di invecchiamento sulla base di test di laboratorio.
Per lo sviluppo di algoritmi on line per la identificazione dello stato di degrado delle celle che compongono un sistema di accumulo si è utilizzato un modulo costituito da 12 celle da 20 Ah, 3.6 V nominali (campo di lavoro 3.0-4.2 V) collegate in serie tra di loro e utilizzate in second life per realizzare un test su un ciclo di lavoro di tipo stazionario. E' stata eseguita la prima caratterizzazione delle celle e si sono sviluppati due cicli di lavoro derivati entrambi da un utilizzo di un sistema di accumulo a supporto della rete di ricarica di un parcheggio di veicoli elettrici con i quali il sistema potrà essere invecchiato.
I due cicli sono equivalenti a meno delle pause tra le varie fasi operative, che in un caso sono state ridotte per permettere di eseguire due cicli al giorno invece che uno, è in corso un test per la scelta finale del ciclo di invecchiamento. Si sono caratterizzate le celle del modulo con test standard su ogni cella ed uno applicato all'intero sistema, lo scopo è verificare la coerenza tra le informazioni che possono essere dedotte da questo ultimo e i precedenti.
Lo scopo finale del lavoro è quello di sviluppare e testare algoritmi che permettano di quantificare lo stato di salute (o di degrado) delle batterie che compongono un sistema di accumulo stazionario, anche in Second Life, o automotive, permettendo così una diagnostica preventiva dello stesso, aumentandone l'affidabilità, la durata di vita, la sicurezza nella sua gestione. In questo modo sarà migliorata la sua continuità di servizio in funzione delle informazioni che il supervisore darà a chi lo gestisce e ne esegue la manutenzione e si potranno sfruttare le batterie per tutta la loro vita operativa.

3 Prodotti attesi

L'output della presente linea di attività è il rapporto tecnico dal titolo: Accumulo: Studio per la diagnostica preventiva e la gestione della "fuga termica" per sistemi di accumulo elettrochimico al litio.

4 Prodotti sviluppati

Progettazione e realizzazione di un Set-up sperimentale per test di nail penetration su celle a bustina.

Relativamente alle attività relative alla stima dell'invecchiamento, sono stati realizzati:

- la definizione dell'architettura del software per la valutazione dell'invecchiamento di celle litio-ione, in grado di riprodurre gli andamenti ottenuti da test di laboratorio precedenti;

- l'implementazione in fase di testing/sviluppo dell'algoritmo su piattaforma commerciale e prime elaborazioni di dati.

Per i test sperimentali che dovranno essere di supporto per la verifica dei software di stima e quantificazione dell'invecchiamento sono stati realizzati:

- I test preliminari sulle singole celle di un modulo second life che verrà sottoposto a prova vita;

- Un test standard di scarica e ricarica sul modulo second life utile a comparare la caratterizzazione delle singole celle così ottenuta con quella fatta precedentemente;

- La definizione di due cicli di lavoro, derivati da studi precedenti su applicazioni stazionarie, a cui sottoporre il modulo;

- Il test, su due celle equivalenti a quelle montate sul modulo, dei due cicli proposti, allo scopo di poterne comparare gli effetti sulle prestazioni e l'invecchiamento delle suddette celle e stabilire con quale invecchiare il modulo;

- Un test preliminare del ciclo 'breve', il più impegnativo dei due, sul modulo, per verificarne la compatibilità delle prestazioni;

5 Analisi degli scostamenti su attività e risultati

Per quanto concerne gli algoritmi per la stima dello stato di salute o degrado delle singole batterie che compongono un sistema di accumulo, ne era previsto il rilascio nel primo anno di attività, questo non è stato possibile in quanto il modulo oggetto del test, dopo essere stato acquisito, testato, aver risolto dei problemi di funzionamento e reso operativo, ha avuto un guasto legato ad un sovraccarico del microcontrollore.

Il tempo di riparazione del guasto è stato notevole, perché attualmente è difficile reperire in commercio materiale elettronico, e per lo stesso motivo i due moduli aggiuntivi che potevano essere utilizzati per sopperire al problema non erano ancora acquisiti.

I principi su cui si basano gli algoritmi di valutazione dello stato di salute in tempo reale che si vogliono sviluppare sono stati già descritti nelle annualità precedenti della ricerca di sistema, ma si propone di verificarli ed eventualmente correggerli nella applicazione pratica al modulo Second Life.

6 Sintesi delle attività svolte

Tenendo conto delle grandezze di riferimento individuate da un'analisi di letteratura, sono stati selezionati i fluidi dielettrici potenzialmente più performanti per la soppressione dell'incendio e/o esplosione di batterie: 2 esteri sintetici, 2 fluidi fluorurati inerti ad alte prestazioni e un olio siliconico.
È stato, inoltre, progettato e realizzato il set-up sperimentale per l'esecuzione di test di immersion cooling su celle sottoposte ad abuso.
Sulla base della letteratura sull'invecchiamento delle celle litio-ione, è stato proposto un approccio informatico per la simulazione della perdita di capacità delle celle sottoposte a diversi cicli di lavoro che permetta di tenere conto della variabilità intrinseca delle celle.
Si sono caratterizzate le celle di un modulo Second Life sia con test singoli che con uno applicato a tutto l'insieme, si sono costruiti due distinti cicli di lavoro derivanti da applicazioni stazionarie e comparato il loro effetto di degrado con test su celle gemelle.

7 Dettaglio delle attività svolte

7.1 Studio della capacità di contenimento della thermal runaway per immersion cooling

La thermal runaway (TR) di una batteria agli ioni di litio è un fenomeno che consiste in reazioni esotermiche a catena che si sviluppano all'interno del dispositivo stesso. Queste reazioni causano un rapido aumento della temperatura con un conseguente degrado delle strutture interne, che porta, il più delle volte, al guasto della batteria. Sono state sviluppate nel corso degli anni, diverse strategie per riuscire a prevenire e mitigare la TR. L'obiettivo del nostro studio è valutare la potenzialità di un immersion cooling come strategia di mitigazione e non solo prevenzione della reazione di fuga termica.

Nell'allegato tecnico - sezione A, sono stati analizzati i meccanismi e le strategie di mitigazione della TR attualmente studiati e utilizzati: un ruolo di primo piano rivestono gli agenti estinguenti a base d'acqua.

Per quanto attiene l'utilizzo di dielettrici in moduli o pacchi batteria, in letteratura gli studi si concentrano sull'applicazione di tali fluidi come refrigeranti, ma viene trascurata l'analisi dell'efficacia degli stessi nel contenimento della TR. Nell'allegato tecnico - sezione B è riportata un'analisi bibliografica dei fluidi utilizzati per l'immersion cooling che includono diverse categorie: idrofluoroeteri, idrocarburi, esteri, oli siliconici e miscele acqua/glicole.

Sulla base dell'analisi di letteratura, sono state individuate le proprietà fondamentali dei fluidi da tener in conto per la selezione dei dielettrici più idonei al contenimento della TR. Partendo da un confronto di tali proprietà, sono stati, poi, individuati i fluidi potenzialmente più performanti per la soppressione dell'incendio e/o esplosione. I fluidi devono essere in grado di contenere ed estinguere il fenomeno della TR, abbassando la temperatura delle celle ed isolandole termicamente ed elettricamente una dall'altra. È stato, inoltre, progettato e realizzato il set-up sperimentale per l'esecuzione di test di immersion cooling su celle sottoposte ad abuso di nail penetration.

7.1.1 Selezione dei liquidi per test di Immersion Cooling

Proprietà dei fluidi

Sono state individuate le proprietà da analizzare per la selezione dei dielettrici ritenuti più idonei a mitigare/contenere gli effetti di potenziali incendi/esplosioni:

- Temperatura di Flash Point /Temperatura di Fire Point /Temperatura di ignizione o autoaccensione: devono essere le più alte possibile per evitare che abbia luogo la combustione del fluido stesso.
- Temperatura di Pour Point: deve essere la più bassa possibile, per garantire la fluidità del liquido anche in condizioni ambientali rigide (basse temperature).
- Temperatura di ebollizione; deve essere la più alta possibile per evitare:
  - la formazione di vapori e quindi l'aumento volumetrico del fluido nel sistema, con possibili conseguenti danni meccanici;
  - la riduzione dell'efficienza dello scambio termico.
- Temperatura di degradazione: deve essere la più alta possibile, per evitare che il fluido si degradi nel campo di funzionamento del sistema.
- Coefficiente di espansione termica: deve essere il più basso possibile per evitare che ci siano eccessive variazioni volumetriche del sistema con conseguenti danni meccanici.
- Efficienza termica: deve essere valutata la capacità di ciascun liquido di asportare in maniera efficace il calore in condizioni di convezione naturale. Nello specifico, devono essere messe a confronto le seguenti grandezze:
  - calore specifico
  - conducibilità termica
  - viscosità.
- Impatto del fluido sull'ambiente: il fluido deve avere il minor impatto possibile sull'ambiente.

Da un confronto delle proprietà dei fluidi presenti in commercio, sulla base delle grandezze più significative individuate, sono stati selezionati i fluidi potenzialmente più performanti per la soppressione dell'incendio e/o esplosione, da testare nella successiva annualità:

- 2 esteri sintetici della Mivolt, fluidi monofase e non volatili: sono liquidi biodegradabili e non tossici che presentano sicurezza al fuoco (alto valore di flash point e fire point) e robustezza.
  Nello specifico sono stati selezionati due fluidi, già testati per il thermal management di batterie agli ioni di litio:
  - Mivolt DF7: ha una bassa viscosità, che facilita lo scambio termico e un punto di scorrimento molto basso;
  - Mivolt DFK: ha elevati flash point e fire point ed un punto di scorrimento basso.
- 2 fluidi fluorurati inerti ad alte prestazioni della Galden® PFPE, che offrono un'eccezionale stabilità chimica e la capacità di operare a temperature sia molto basse che elevate in condizioni aggressive. Sono fluidi NON INFIAMMABILI, non hanno flash, fire o autoignition point.
  Nello specifico sono stati selezionati due fluidi:
  - GALDEN HT170: ha bassa viscosità cinematica, ma una temperatura di ebollizione più bassa;
  - GALDEN HT270: ha una temperatura di ebollizione più alta, ma è caratterizzato da alta viscosità cinematica.
- 1 olio siliconico, il CLEARCO PM-125, un fluido ecologico caratterizzato da un elevato valore di Flash Point ed un'elevata stabilità termica.

Di seguito si riportano delle tabelle che mettono a confronto le principali proprietà dei fluidi selezionati (da Tabella 1 a Tabella 6).

Tabella 1 Proprietà termiche

FLUIDO	MIVOLT DFK	MIVOLT DF7	GALDEN HT170	GALDEN HT270	CLEARCO PM-125
Densità a 20°C (kg/m^3)	968	916	1770	1850	1065
Calore specifico a 20°C (J/kg-K)	1902	1907	963	963	1498
Viscosità cinematica a 20°C (mm^2/s)	75	16.4	1.80	14	125
Conducibilità termica a 20°C (W/m-K)	0.147	0.129	0.065	0.065	0.14
Coefficiente di espansione a 20°C (1/K)	0.00075	0.00080	0.0011	0.0011	0.00075
Punto di ebollizione (°C)			170	270	>65
Calore di vaporizzazione al punto di ebollizione (cal/g)			16	15	

Tabella 2 Comportamento a freddo

FLUIDO	MIVOLT DFK	MIVOLT DF7	GALDEN HT170	GALDEN HT270	CLEARCO PM-125
Viscosità cinematica a -10°C (mm^2/s)	572	87.4			
Viscosità cinematica a -30°C (mm^2/s)	4362	534			
Punto di scorrimento (°C)	<-50	-75	-97	-66	-51°C

Tabella 3 Sicurezza al fuoco

FLUIDO	MIVOLT DFK	MIVOLT DF7	GALDEN HT170	GALDEN HT270	CLEARCO PM-125
Flash Point (°C)	>250	194	-	-	333°C
Fire Point (°C)	>300	218	-	-	
Temperatura di autoignizione (°C)	>400	385	-	-	

Tabella 4 Impatto sull'ambiente

FLUIDO	MIVOLT DFK	MIVOLT DF7	GALDEN HT170	GALDEN HT270	CLEARCO PM-125
Biodegradabilità	Facilmente biodegradabile	Facilmente biodegradabile			Fluido ecologico
Potenziale di riscaldamento globale (GWP)	<1	<1			
Potenziale di riduzione dell'ozono	0	0			

Tabella 5 Proprietà chimiche

FLUIDO	MIVOLT DFK	MIVOLT DF7	GALDEN HT170	GALDEN HT270	CLEARCO PM-125
Valore di neutralizzazione (mg KOH/g)	<0.03	<0.03			
Potere Calorifico netto (MJ/kg)	30.8	33.5			
Solubilità dell'acqua (ppm (wt))			< 10	< 10	
Solubilità dell'aria (cm^3 gas/100 cm^3 liquid)			26	26	
Peso molecolare medio					

Tabella 6 Proprietà dielettriche

FLUIDO	MIVOLT DFK	MIVOLT DF7	GALDEN HT170	GALDEN HT270	CLEARCO PM-125
Tensione di guasto in AC (kV)	>75	>75			
Resistività di volume (GΩ.m)	>90	>90	$15 \cdot 10^3$	$60 \cdot 10^3$	
Costante dielettrica			1.94	1.94	

7.1.2 Set up sperimentale

Nella campagna sperimentale che verrà condotta nell'annualità successiva, la thermal runaway verrà indotta tramite nail penetration di un'unità cella e sarà valutata la capacità di differenti fluidi di sopprimere/mitigare gli effetti dell'eventuale esplosione/incendio.

A tal fine è stato progettato e realizzato il set-up sperimentale per effettuare test di penetrazione su celle a bustina: il set-up è costituito da una struttura di sostegno metallica, una carrucola, un peso con una punta metallica e un tubo che serve ad indirizzare la corsa del peso dall'alto al basso; si riportano di seguito le immagini (da Figura 1 a Figura 3) e le caratteristiche principali.

Il Peso con punta ha:

- Altezza = 152 mm (inclusa la punta)
- Diametro= 48.5 mm
- Peso = 1186 g

La corsa del peso fino a terra (escluso lo spessore vaschetta) è di 870 mm

Il Tubo ha:

- Altezza = 650 mm
- Diametro interno = 55 mm.

La cella, sottoposta al test, sarà alloggiata all'interno di una vaschetta riempita di liquido.

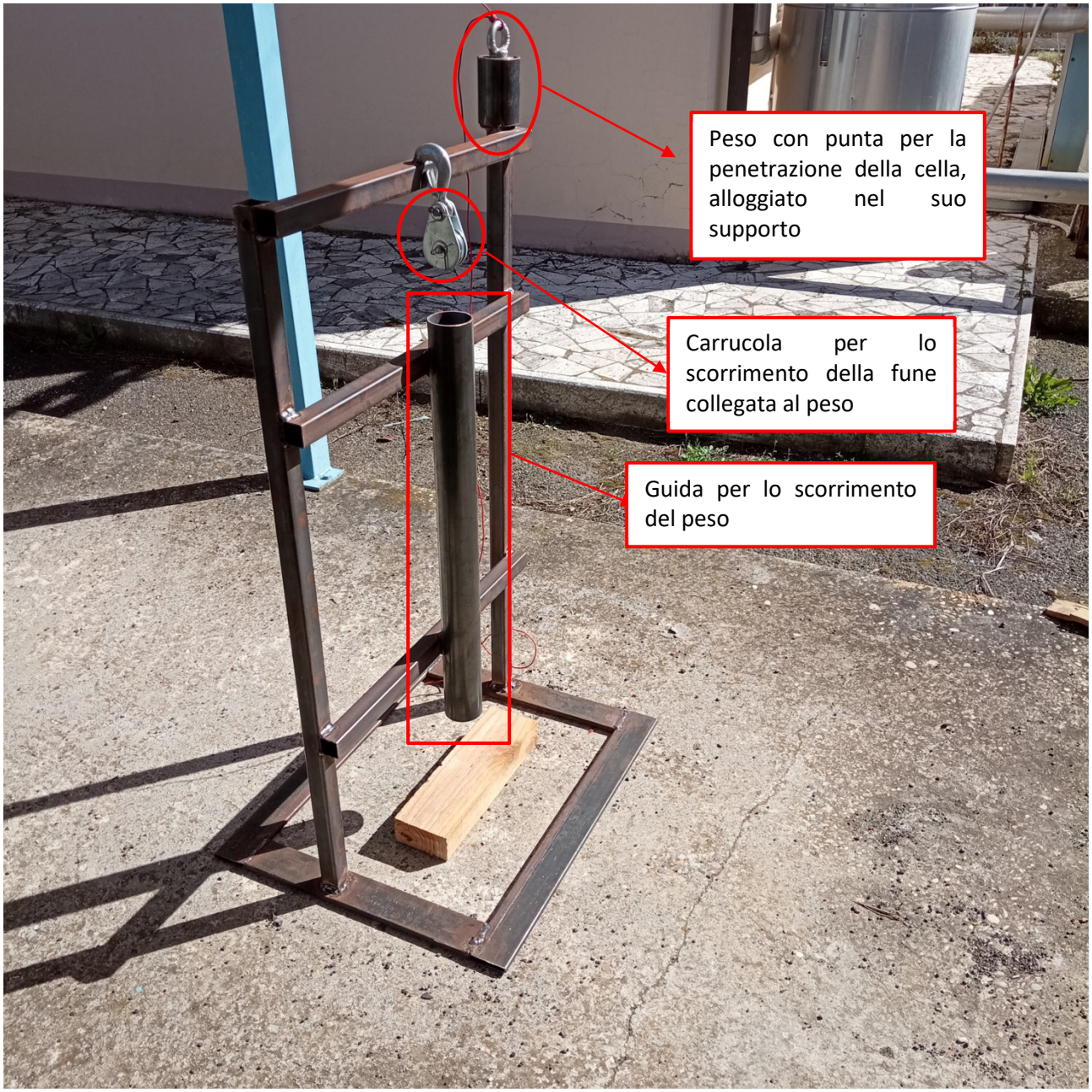

Figura 1 Set-up sperimentale: vista laterale

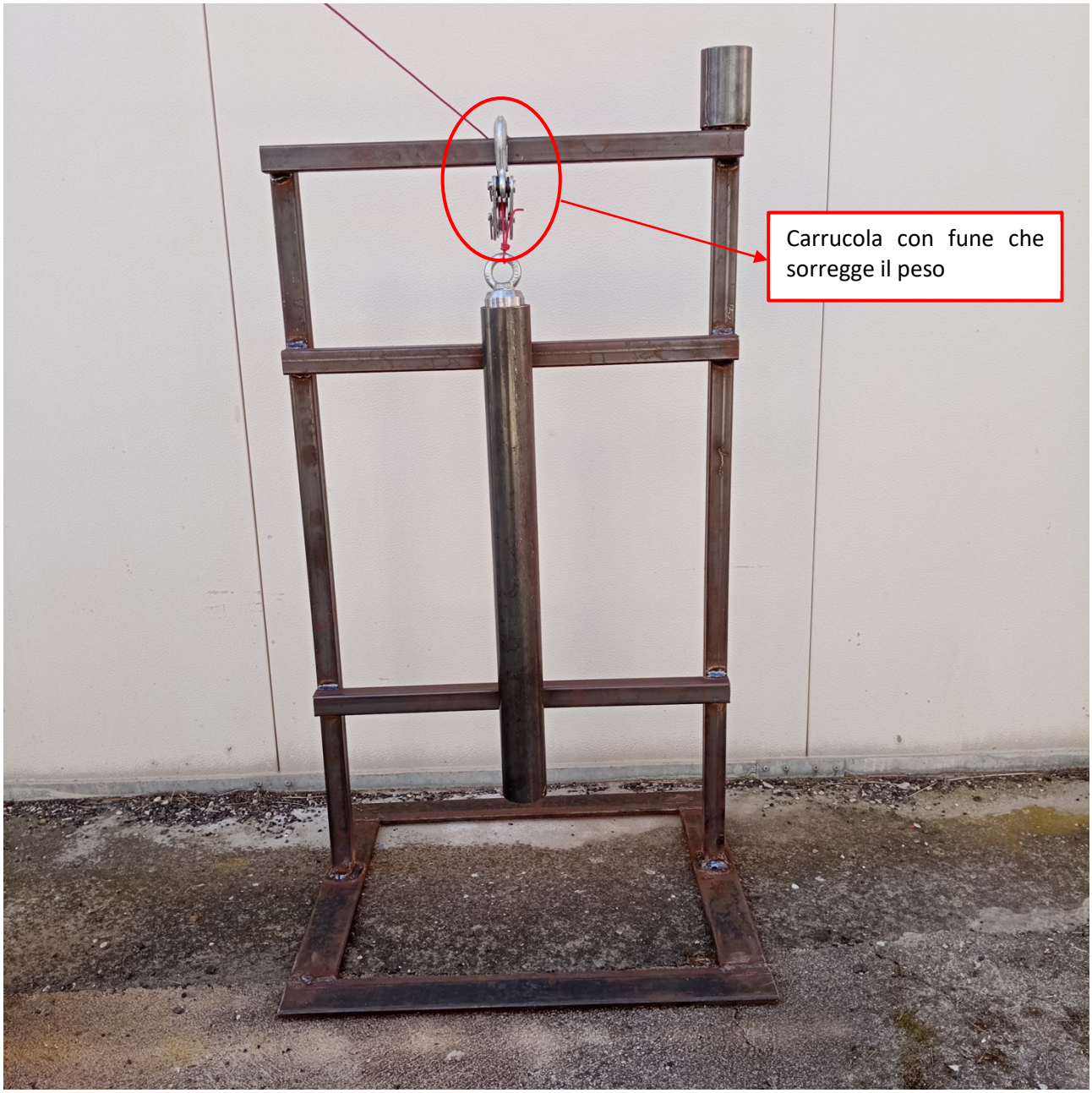

Figura 2 Set-up sperimentale: vista frontale

Figura 3 Set-up sperimentale: dettaglio della punta del peso alla fine della guida

7.2 Algoritmo di previsione di invecchiamento

Nel presente lavoro viene proposto un algoritmo che simula il degrado di capacità di una generica cella litio-ione. L'algoritmo è progettato tenendo conto dei principali meccanismi di invecchiamento che avvengono negli elementi che compongono la batteria, quali la perdita di materiale attivo e di litio inventariabile.

1.2.1 Formulazione generale

Essendo i meccanismi legati all'invecchiamento della batteria altamente complicati, sono state fatte delle ipotesi semplificative nella modellazione, di seguito elencate:

1. La batteria è assimilata ad una matrice (bidimensionale in questa fase dello sviluppo) nella quale ogni elemento mima le proprietà delle parti che compongono la batteria. Quindi:
2. Le strutture microscopiche vengono assimilate ad N strutture "mesoscopiche".
3. Gli elementi della batteria presi in considerazione per l'invecchiamento sono: anodo, catodo ed elettrolita. Ognuno è caratterizzato da una legge di invecchiamento che può differire da quella degli altri elementi

3. Ogni struttura del singolo elemento segue la stessa legge di invecchiamento, ma è soggetta ad una "stocasticità" rispetto al degrado che racchiude tutta la variabilità intrinseca dei sistemi reali.

Come accennato, i principali meccanismi di invecchiamento presi in considerazione sono:

1. Perdita di ioni attivi, che si ricombinano in maniera permanente e non sono più disponibili per i processi di ossidoriduzione e per il trasporto;

2. Perdita di materiali attivi, in cui sono le lacune ioniche a ricombinarsi e non essere più disponibili per la ricombinazione (ossidoriduzione).

La quantità di litio disponibile in una cella dipende dalla quantità disponibile all'anodo Qa e al catodo Qc. In generale, $Qa>Qc$ e $Qcella<Qa, Qc$. Con l'ipotesi semplificativa che le velocità delle singole reazioni parassite non vari durante la vita della batteria, possiamo ipotizzare che la capacità C della cella sia proporzionale alla capacità più piccola fra catodo e anodo $Qcella \propto min(Qa, Qc)$. In questo modo possiamo considerare l'andamento della capacità partendo dalla riserva di litio disponibile e dalla disponibilità di siti al catodo e all'anodo.

Considerando un sistema in cui gli elettrodi sono immersi nell'elettrolita, ovvero escludendo il caso di elettrolita solido, I principali parametri da considerare per il modello sono inoltre i seguenti:

1. Velocità di crescita del SEI;
2. Velocità di crescita del CEI;
3. Tasso di danneggiamento per intercalazione all'anodo;
4. Tasso di danneggiamento per intercalazione al catodo.

La cella è quindi mimata da una struttura matriciale in cui ad ogni sito sono associate un insieme di proprietà, rappresentate dai parametri, che caratterizzano l'elemento considerato, in modo da disaccoppiare i principali fenomeni di invecchiamento (perdita di materiale attivo, perdita di litio inventariabile). Il contributo dell'elettrolita non viene per il momento preso in considerazione. L'aumento del SEI e del CEI alle interfacce delle mesoparticelle contribuisce all'aumento della resistenza interna. Inoltre, la diminuzione di siti disponibili per l'intercalazione, dovuta alla ricombinazione con altri ioni in dissoluzione, contribuisce alla perdita di capacità.

La possibilità di associare a ciascun elemento matriciale un set indipendente di proprietà permette di includere fattori di variabilità che rappresentano possibili difetti di sintesi e di fabbricazione, oltre a permettere di caratterizzare in modo differente i materiali.

1.2.2 Formulazione ridotta

La formulazione generale dell'algoritmo presentata sopra richiede la conoscenza dei parametri di invecchiamento caratteristici di anodo e catodo, ottenibili da misurazione delle cosiddette "half-cell". Non disponendo di questo tipo di misurazioni, ma solo di test sulla cella intera, l'algoritmo va ulteriormente semplificato. Nella nuova formulazione che è oggetto del presente studio, quindi, tutti i siti della struttura matriciale hanno le stesse proprietà che corrispondono a quelle che forniscono gli stessi risultati per le grandezze osservabili dalle prove sperimentali. Ad ogni sito è associato quindi un valore di capacità di intercalazione di litio, e una scorta di litio. Queste grandezze diminuiscono all'aumentare del numero di cicli (corrispondente alle iterazioni dell'algoritmo) con leggi derivate dagli andamenti sperimentali. Un eventuale variabilità intrinseca fra i siti può essere rappresentata da un rumore bianco nella distribuzione dei valori dei parametri iniziali, ed eventualmente anche da un fattore di aleatorietà nelle funzioni di degrado. Essendo le componenti aleatorie molto difficili da determinare, esse saranno prese in considerazione successivamente alla messa a punto dell'algoritmo. Il flowchart dell'algoritmo è illustrato in figura 4.

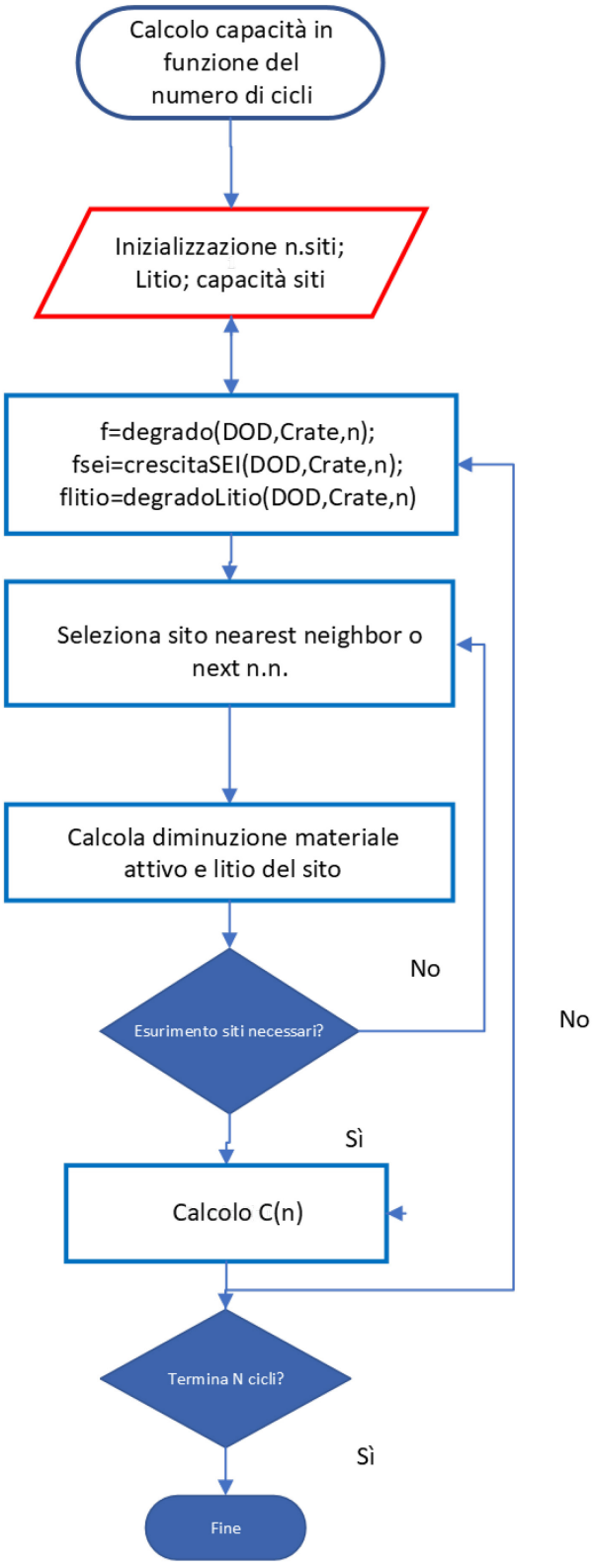

Figura 4: Flowchart dell'algoritmo

A titolo di esempio, riportiamo un fitting del modello per l'andamento sperimentale del degrado di capacità di una cella EIG 20 Ah in figura 5. Il fitting è stato effettuato per approssimazioni successive sulle funzioni di degrado e sui valori delle variabili. L'approfondimento dell'analisi dell'algoritmo è rimandato alla sezione C dell'allegato.

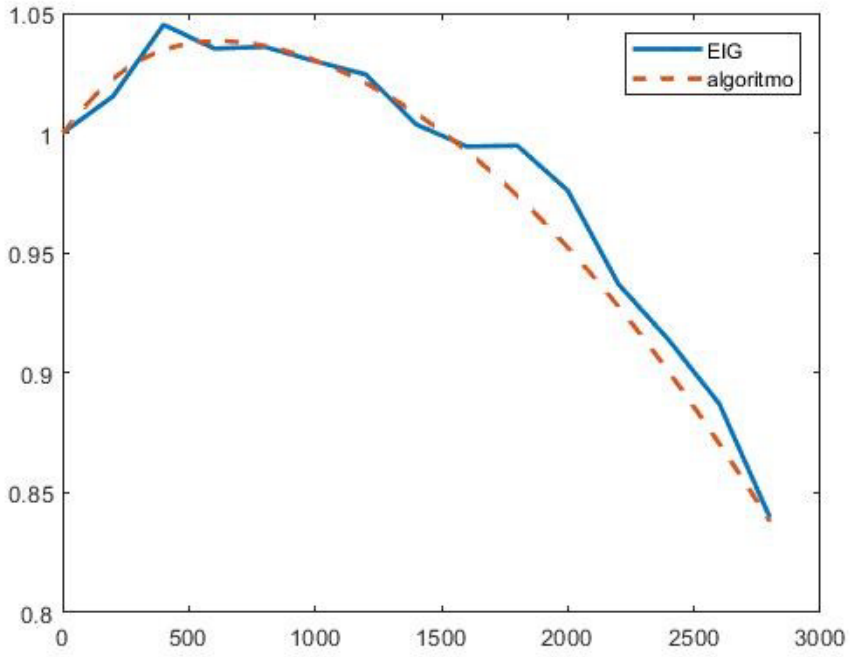

Figura 5: Curva sperimentale di degrado e fitting del modello numerico.

7.3 Diagnostica preventiva su moduli di celle al litio

In Figura 6 è presentato il modulo che sarà oggetto di studio: esso è composto da 12 celle EIG da 20 Ah connesse in serie tra di loro e gestite tramite una elettronica dedicata.

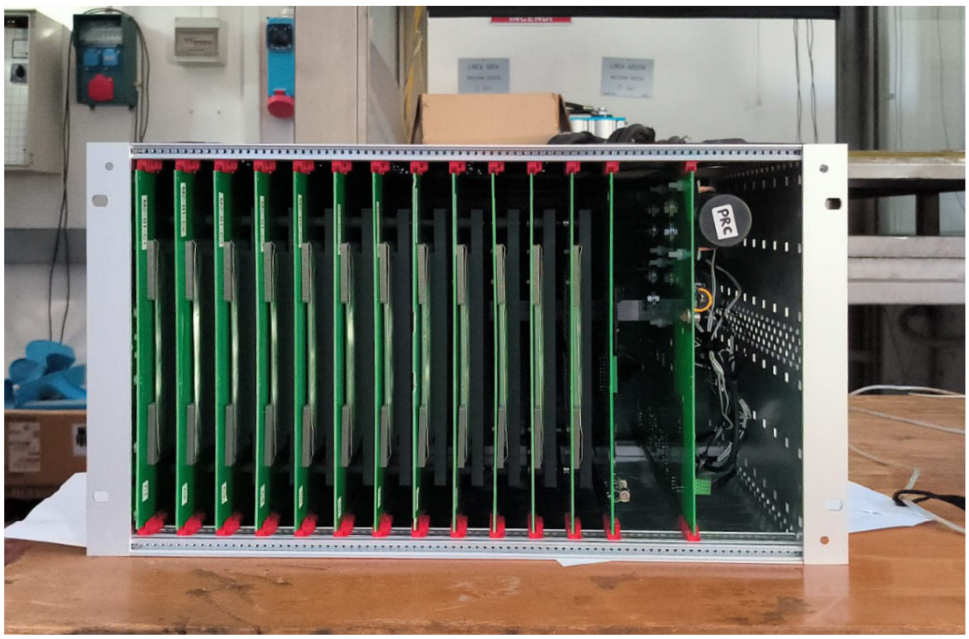

Figura 6: Modulo second life

Scopo del lavoro è estrarre le celle dal modulo e caratterizzarle con test specifici, replicare i test sul modulo nel suo insieme, sviluppando delle analisi che permettano di ottenere cella per cella gli stessi risultati rilevati precedentemente, invecchiare le celle con un ciclo di lavoro predeterminato e ripetere periodicamente i test di caratterizzazione.
Con i dati raccolti dai test sarà possibile elaborare delle procedure che quantifichino il degrado di prestazioni delle celle, inteso come perdita di capacità ed aumento della resistenza ed impedenza interna, realizzando così un sistema di diagnostica, anche preventiva, che possa aiutare a gestire i sistemi di accumulo nella loro vita operativa.
Il test sulla singola cella è costituito da tre cicli di carica e scarica standard e un successivo ciclo che permette il rilievo delle resistenze ed impedenze associabili alle varie formulazioni dei circuiti equivalenti di una batteria, il ciclo test è presentato in figura 7.

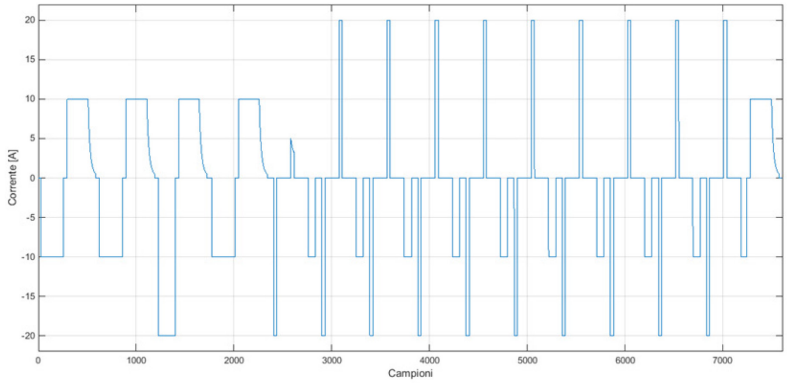

Figura 7: Test per la caratterizzazione delle celle

In Figura 8a) e 8b) sono invece presentati l'andamento della corrente di test del modulo e la risposta in tensione delle singole celle che lo compongono.

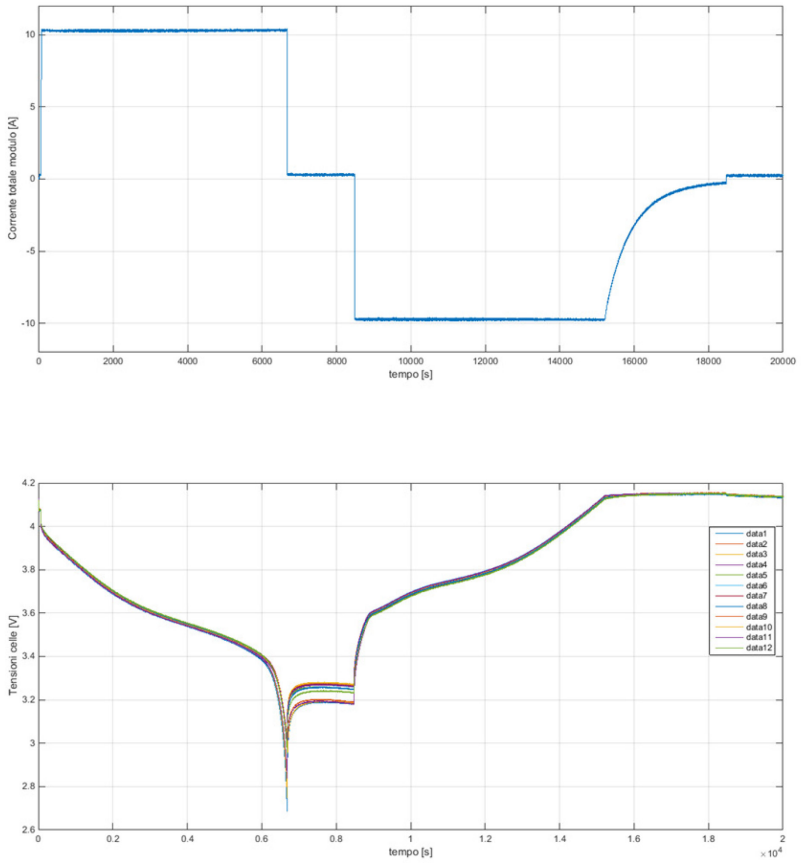

Figura 8: Test sul modulo a) Corrente b) Tensioni di cella

Infine in Figura 9 è presentato il ciclo, ricavato dallo studio su una applicazione stazionaria, che servirà ad invecchiare il modulo, viene presentato l'andamento della corrente e la risposta in tensione di ogni cella.

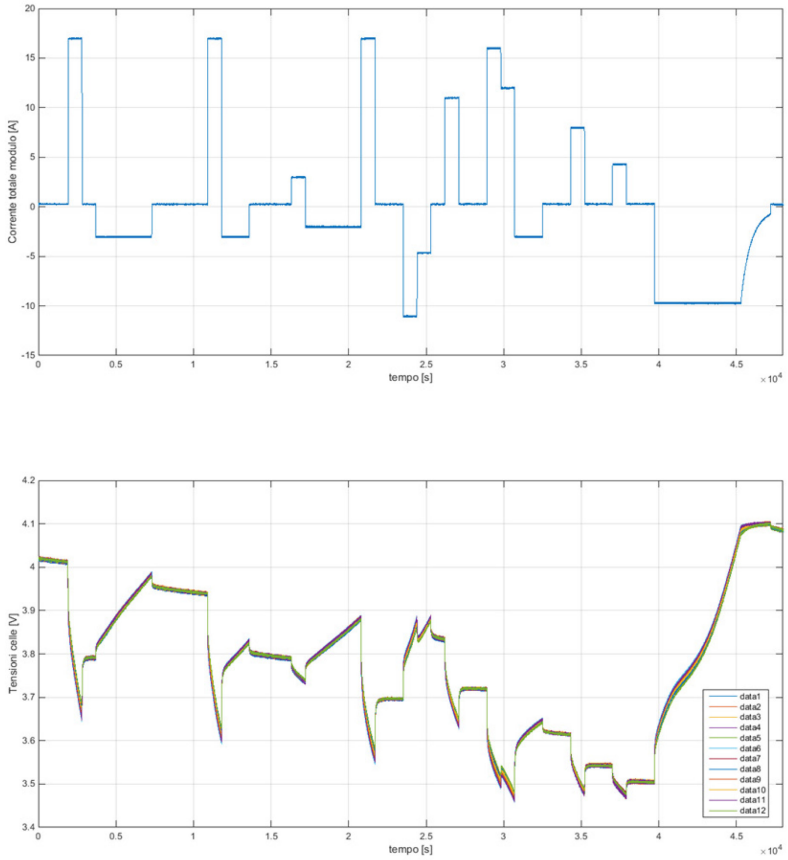

Figura 9: Ciclo di invecchiamento a) corrente b) tensioni di cella

Il campo di variazione ammissibile per le tensioni di ogni singola cella è 3.0 V<=Vcell<=4.15 V, perfettamente compatibile con il ciclo considerato.

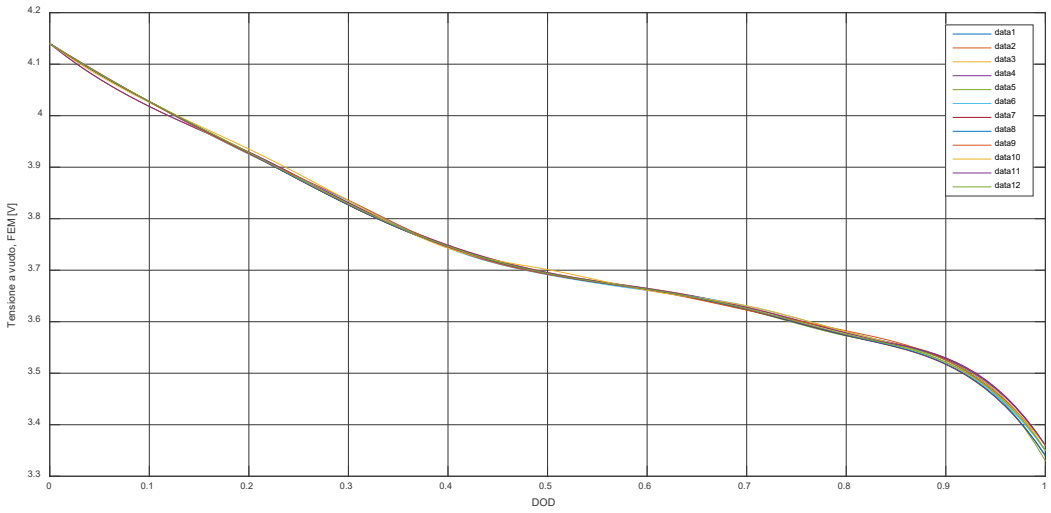

Figura 10: Curva caratteristica a vuoto delle celle in esame

La figura 10 mostra come le curve caratteristiche della FEM delle singole celle siano praticamente identiche eccetto nella fase finale di scarica, dove lo scostamento è contenuto in un intervallo di 0.03 V, una condizione simile si verifica per le resistenze interne, le quali vengono valutate considerando la variazione di tensione di

cella tra il valore che si ha all'interruzione di un gradino di corrente e quello rilevato in un tempo prestabilito (20 min nel caso in esame).

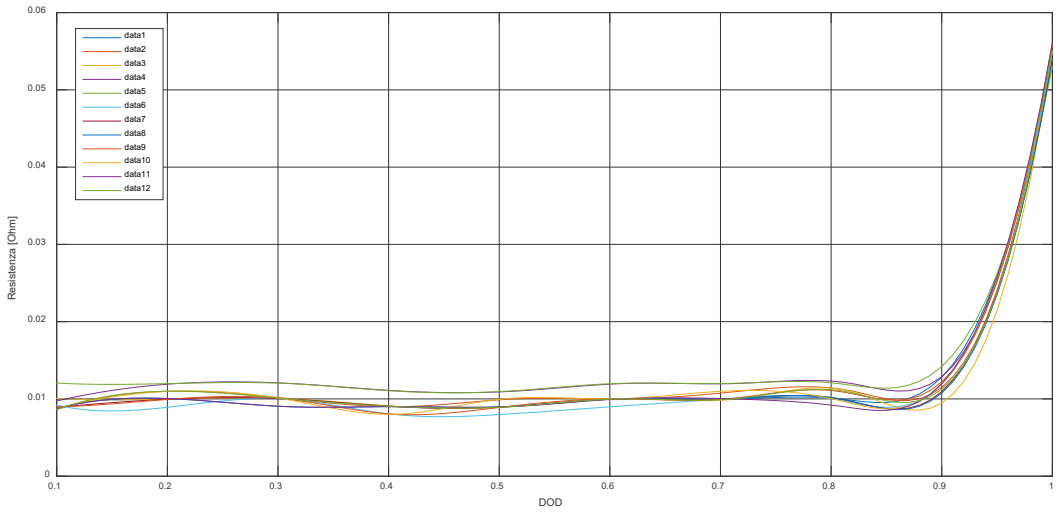

Figura 11: Resistenze di cella

Quanto visto dimostra l'omogeneità iniziale delle caratteristiche delle celle da invecchiare e la loro compatibilità con i cicli di lavoro previsti.

8 Contributo delle eventuali consulenze alle attività sopra descritte

Non è stata utilizzata nessuna attività di consulenza.

9 Pubblicazioni scientifiche

Carla Menale, Roberto Bubbico, "Temperature Control of Lithium-ion Battery Packs under High-Current Abuse Conditions", CHEMICAL ENGINEERING TRANSACTIONS, VOL. 99, 2023, ISBN 978-88-95608-98-3; ISSN 2283-9216, DOI: 10.3303/CET2399030.

10 Eventi di disseminazione

Partecipazione di Carla Menale alla conferenza IcheaP16 "16th international conference on chemical and process engineering" dal 21 al 24 maggio 2023. Titolo dell'intervento: "EFFECT OF COMPONENTS TYPOLOGY FOR TEMPERATURE CONTROL OF LITHIUM-ION BATTERY PACKS".