



Ricerca di Sistema elettrico

Modellazione di sistemi di accumulo e loro validazione sperimentale. Analisi dell'invecchiamento

Massimo Ceraolo, Romano Giglioli, Giovanni Lutzemberger



Università di Pisa
DESTEC

Report RdS/PAR2016/165

MODELLAZIONE DI SISTEMI DI ACCUMULO E LORO VALIDAZIONE SPERIMENTALE. ANALISI DELL INVECCHIAMENTO

Massimo Ceraolo, Romano Giglioli, Giovanni Lutzemberger (DESTEC - Università di Pisa)

Settembre 2017

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2016

Area: Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica

Progetto: Sistemi di accumulo di energia per il sistema elettrico

Obiettivo: Studio dei fenomeni di invecchiamento, sicurezza e second life

Responsabile del Progetto: Pier Paolo Prosini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione: "Modellazione di sistemi di accumulo e loro validazione sperimentale: Analisi dell'invecchiamento in un'ottica di utilizzo second-life"

Responsabile scientifico ENEA: Natascia Andrenacci

Responsabile scientifico Università di Pisa - DESTEC: Romano Giglioli

Indice

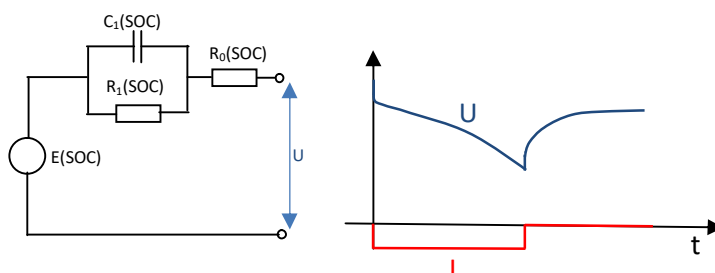
SOMMARIO.....	4
1 MODELLI.....	4
2 CICLI SPERIMENTALI PER LA CARATTERIZZAZIONE DELLA CELLA.....	4
3 ATTIVITÀ DI MODELLIZZAZIONE E CALIBRAZIONE	5
3.1 DESCRIZIONE CELLA AL LITIO	6
3.2 MODELLAZIONE CELLA.....	6
3.3 CALIBRAZIONE PARAMETRI MODELLO	8
3.4 RISULTATI CALIBRAZIONE.....	10
4 CONCLUSIONI	17
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	17
6 CURRICULA DEL GRUPPO DI LAVORO	18

Sommario

Le attività hanno avuto l'obiettivo di definire modelli circuitali equivalenti di celle al litio nuove o invecchiate. I modelli impiegati, di vario grado di precisione, sono caratterizzati da una serie di parametri (tensione a vuoto, resistenza e capacità) funzione dello stato di carica e della temperatura. I suddetti parametri sono determinabili partendo da test sperimentali appositamente definiti, i cui risultati vengono elaborati mediante tool di simulazione numerica. L'evoluzione dei parametri nel tempo dà inoltre indicazioni sullo stato di salute della cella, ai fini del suo impiego in un'ottica di second-life [1][2][3]. La procedura adottata è di seguito descritta.

1 Modelli

La modellazione delle celle al litio si effettua mediante reti elettriche equivalenti. Le reti elettriche di riferimento sono caratterizzate da una forza elettromotrice, una resistenza interna e una serie di blocchi R-C. Solitamente, nell'ottica di un giusto compromesso tra accuratezza e complessità di rappresentazione, tale numero è posto uguale a uno, come riportato nello schema di Figura 1. I parametri del circuito sono generalmente funzione dello stato di carica SOC e della temperatura. Riguardo alla modellazione è opportuno fare alcune precisazioni: la $E(\text{SOC})$ assume valori in accordo con la curva OCV-SOC della cella considerata, la resistenza R_0 rappresenta il salto di tensione in corrispondenza del gradino di corrente di scarica (visibile dagli andamenti qualitativi in Fig. 1 a dx), mentre la forma del profilo di tensione è determinata dalla costante di tempo uguale al prodotto $R_1 C_1$. Ulteriori dettagli sono riportati in [4][5].



**Figura 1. Modello equivalente di cella al litio (a sinistra);
tipico andamento della tensione di cella durante un gradino di scarica (a destra)**

2 Cicli sperimentali per la caratterizzazione della cella

Nei laboratori dell'ENEA sono state effettuate delle prove su una cella al litio, sia da nuova che progressivamente invecchiata. Obiettivo dell'attività è stato quello di valutare, partendo dai risultati delle prove sperimentali, i parametri del modello di cella. Ogni prova viene effettuata ripetendo 10 cicli composti come riportato in Figura 2.

1. Scarica a corrente costante pari a $0.5C$, finalizzata a estrarre il 10% della capacità di cella.
2. Pausa 1 minuto.
3. Scarica di 15 s a corrente costante pari a $1C$.
4. Pausa 3 minuti.
5. Carica 15 s a corrente costante pari a $1C$.
6. Pausa 33 minuti.

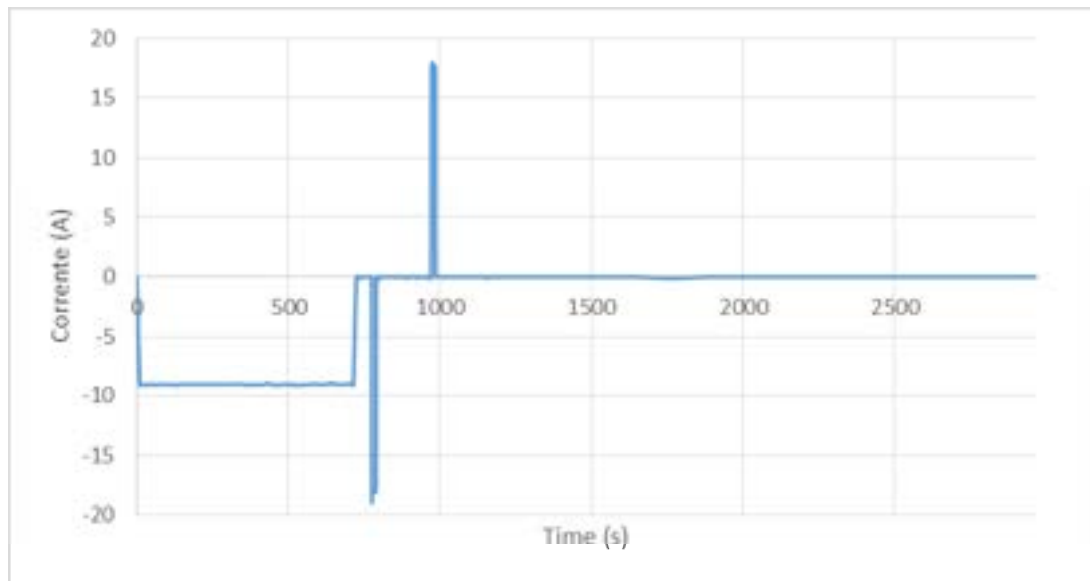


Figura 2. Prova di riferimento

Sono disponibili in particolare i risultati del test effettuato sia su cella nuova che con differente livello di invecchiamento, in particolare:

- Cella nuova.
- 1000 cicli.
- 1600 cicli.
- 2000 cicli.
- 2800 cicli.
- 3200 cicli.

Partendo dai dati sperimentali a nostra disposizione, per l'attività di calibrazione dei singoli parametri del modello di cella non sono state considerate le fasi di scarica e carica rapide di durata 15 s, utilizzando soltanto la prima fase di scarica a corrente costante, mantenendo inalterato il valore di tensione alla fine del tempo di rilassamento. Si ritiene infatti che tale valore non sia significativamente influenzato dalla rapida successione delle fasi di scarica-carica.

3 Attività di modellizzazione e calibrazione

L'attività sperimentale svolta presso i laboratori ENEA ha applicato ad una cella al litio, testata in condizione di primo uso ed anche in fase di invecchiamento progressivo, la ripetizione di un test di riferimento descritto nel paragrafo precedente. La cella al litio scelta le cui caratteristiche sono riportate nel paragrafo 3.1 è di tipo NMC.

La prima parte dell'attività oggetto di questa relazione comprende la modellazione in linguaggio Modelica della cella utilizzata nelle prove sperimentali, come descritto nel paragrafo 3.2. Successivamente viene individuata nel medesimo tool di simulazione una procedura automatica di calibrazione delle grandezze elettriche in funzione del SOC, le quali vengono determinate allo scopo di riprodurre con buona accuratezza l'andamento misurato della tensione di cella sotto il medesimo profilo di corrente.

3.1 Descrizione cella al litio

Come detto l'attività di modellazione della cella al litio nuova e con livello crescente di invecchiamento ha avuto l'obiettivo di operare una caratterizzazione completa di una cella al litio NMC, le cui caratteristiche sono riassunte in Tabella 1.

Tabella 1. Caratteristiche della cella EIG

Modello	C020
Massa (kg)	0.43
Dimensioni (mm)	217x129x7.2
Tensione max/nom/min (V)	4.15/3.65/3.0
Corrente max continuativa carica/scarica (A)	$0.5C_n/5C_n$
Capacità nominale (Ah)	20
Energia specifica (Wh/kg)	174
Densità di energia (Wh/L)	370
Potenza specifica (W/kg)	2300
Densità di potenza (W/L)	4600

Come visibile si tratta di una cella caratterizzata da buone prestazioni sia relativamente all'energia specifica che alla potenza specifica. Dai dati dichiarati dal costruttore si evince peraltro una vita a cicli piuttosto elevata, poiché la riduzione di capacità nominale dopo i primi 1000 cicli, considerando cicli di carica-scarica completi, è pari al 5%. Ciò peraltro giustifica tempi lunghi relativamente all'invecchiamento, dovendosi compiere orientativamente 4000 cicli, ipotizzando lineare il trend di invecchiamento nella prima parte della curva, per arrivare all'80% di capacità residua.

3.2 Modellazione cella

Si modella la cella al litio mediante la rete elettrica di Figura 1. Tale modello viene poi implementato in linguaggio Modelica secondo lo schema di Figura 3.

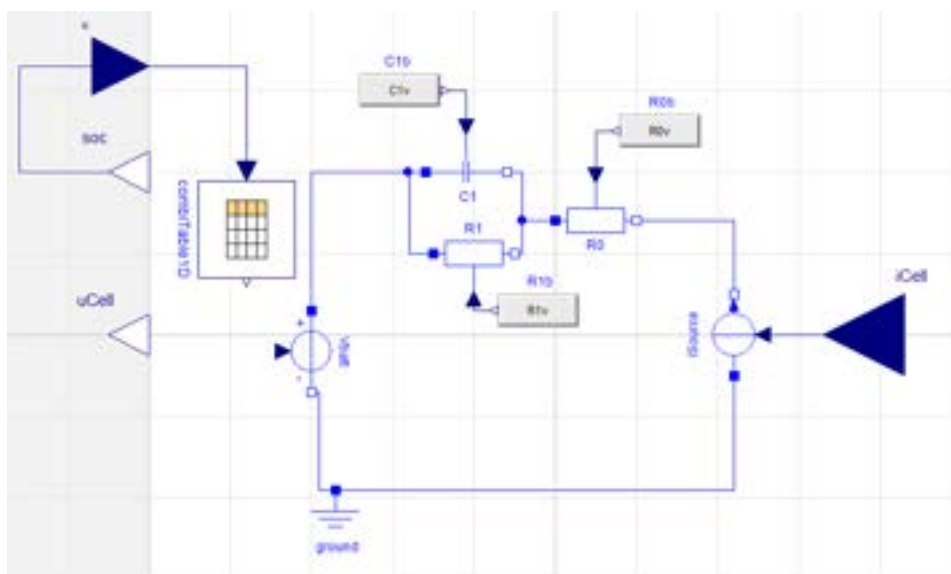


Figura 3. Modello di cella in Modelica

Il valore dello stato di carica (SOC) istante per istante nel modello di cella, viene determinato dalla somma del SOC iniziale (SOC_0) e dell'integrale della corrente (I_{CELL}) erogata o assorbita dal generatore di tensione secondo le equazioni:

$$\begin{aligned} \dot{SOC} &= \frac{I_{CELL}}{C_1} \\ SOC(t) &= SOC_0 + \int_0^t \frac{I_{CELL}}{C_1} dt \end{aligned} \quad (1)$$

Per convenzione il segno della corrente di cella è assunta positiva quando essa è assorbita, e viceversa negativa quando erogata, il sistema di equazioni appena esplicitato è implementato in forma di codice. Come valore C_1 si assume tipicamente il valore della capacità nominale di cella.

Il valore di tensione del generatore V_{batt} istante per istante tiene in considerazione il valore istantaneo di SOC, ed è determinato attraverso la correlazione tra la tensione a circuito aperto (OCV), che dipende dal tipo di cella e dal livello di invecchiamento, e lo stato di carica (SOC). Tale curva è contenuta nel blocchetto combiTable 1D di cui si riporta un esempio in Figura 4 valido per il caso specifico di una cella al litio nuova.

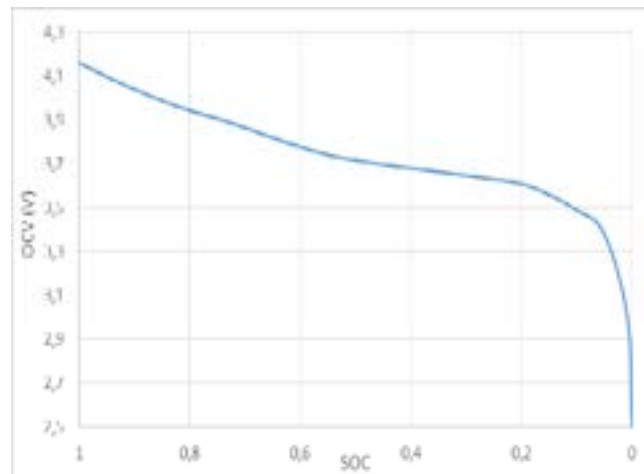


Figura 4. Curva OCV in funzione del SOC

Per i valori delle resistenze e della capacità del condensatore si è imposta una dipendenza lineare con il SOC, ed in particolare per i suddetti componenti vengono implementate le seguenti equazioni:

$$\begin{cases} R_{0(t)} = A_{R_0} + [B_{R_0}(SOC_{(0)} - SOC_{(t)})] = R_{0v} \\ R_{1(t)} = A_{R_1} + [B_{R_1}(SOC_{(0)} - SOC_{(t)})] = R_{1v} \\ C_{1(t)} = B_{C_1} + [A_{C_1}(SOC_{(0)} - SOC_{(t)})] = C_{1v} \end{cases} \quad (2)$$

Dove il parametro $SOC_{(t)}$ è il valore di SOC all'istante t , $SOC_{(0)}$ è il SOC all'istante iniziale. I parametri incogniti A_{R_i} , B_{R_i} , A_{C_1} e B_{C_1} saranno determinati con il procedimento descritto nel paragrafo 3.3.

La grandezza u_{Cell} (schema in Figura 3) è pari alla tensione misurata a valle della resistenza R_0 , rappresenta quindi la variabile che esprime la tensione istantanea di cella del modello.

Il generatore di corrente, visibile nel medesimo schema in Figura 3, schematizza all'interno del modello l'erogazione o l'assorbimento della corrente i_{Cell} da parte della cella. Il valore della corrente erogata o assorbita è imposta al generatore tramite un componente (non visibile in figura) che contiene i valori di corrente misurata nel corso delle prove sperimentali in funzione del tempo.

Riassumendo quindi il funzionamento in generale, il modello all'istante iniziale è caratterizzato da un valore di SOC imposto dall'utente, a cui è associato in accordo con la curva OCV-SOC il valore della tensione ai

morsetti e per effetto delle relazioni (2) i valori delle resistenze e delle capacità. Nel passo successivo conoscendo il valore della corrente e dell'intervallo di tempo si determina il nuovo valore del SOC, in accordo con la (1). Tramite la relazione OCV-SOC è inoltre possibile aggiornare la tensione del generatore ed i valori delle resistenze e della capacità del condensatore. Questa procedura è ripetuta per ogni intervallo temporale fino al termine della simulazione.

3.3 Calibrazione parametri modello

Per quanto concerne la calibrazione dei parametri del circuito, come già anticipato è stato deciso di considerare ogni scarica singolarmente ed in particolare per ognuna si è considerata soltanto la prima parte della scarica a corrente costante, ovvero quella caratterizzata da una riduzione del SOC pari al 10%, allo scopo di eliminare la scarica-carica rapida di 15 s. Ogni scarica è stata considerata singolarmente per facilitare alla procedura di calibrazione la determinazione dei parametri. Al termine di ogni procedura si è verificato che la tensione di rilassamento simulata coincidesse con quella misurata sperimentalmente. Evidentemente dovrà anche porsi che i valori dei parametri elettrici all'inizio della n -esima siano uguali a quelli ottenuti al termine della scarica immediatamente precedente, ovvero ricordando la (2):

$$\begin{aligned} R_{t_f}(n-1) &= A_{t_f}(n) \\ R_{t_f}(n-1) &= A_{t_f}(n) \\ C_{t_f}(n-1) &= B_{t_f}(n) \end{aligned} \quad (3)$$

Dove t_f indica il valore della grandezza elettrica all'istante finale, n indica la generica scarica ennesima ($1 < n < 10$), e $n-1$ indica la scarica precedente.

Passiamo adesso alla descrizione operativa della procedura di calibrazione, ma prima è necessario dire che per portare a termine la procedura è necessario preliminarmente creare un file in formato .csv che contenga l'andamento della tensione sperimentale della cella in funzione del tempo.

La calibrazione dei parametri (A e B) per i vari componenti elettrici è stata portata a termine con l'aiuto del programma Dymola Modelica, nello specifico è stata utilizzato l'ambiente di lavoro Calibrate contenuto all'interno della libreria denominata Calibration che è ubicata all'interno di Design .

Si mostra nella Figura 5 l'interfaccia utente per la programmazione della calibrazione: è possibile individuare in corrispondenza parte sinistra della figura un menù con diversi voci che saranno utilizzate per la programmazione della procedura.

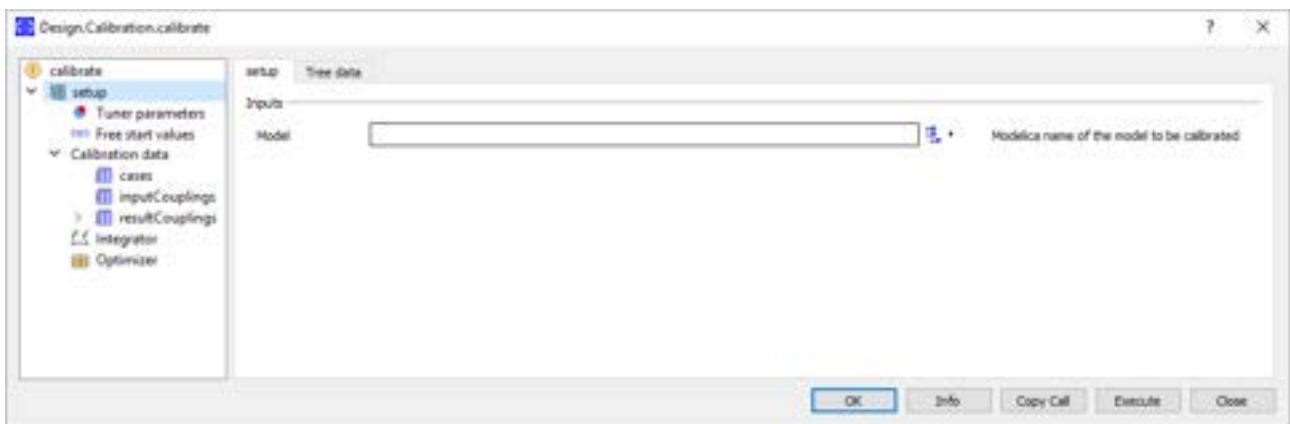


Figura 5. GUI per impostazione procedura di calibrazione

Il primo ambiente, `setup` visibile in Figura 5, richiede la selezione del modello che vogliamo calibrare, nel nostro caso verrà selezionato il modello della cella analizzato nel par. 3.2.

Passando al sottomenù successivo, denominato **Tuner Parameters** che richiede la selezione dei parametri incogniti che si vogliono determinare, in particolare ricordando le equazioni del sistema (2) sarà necessario selezionare:

- A_{R0} , B_{R0}
- A_{R1} , B_{R1}
- A_{C1} , B_{C1}

E anche possibile per questi parametri imporre dei vincoli sotto forma di valori massimi e minimi accettabili. Passiamo adesso a caricare nella procedura il file di estensione **.csv**, all'interno del quale sono stati salvati i dati della tensione di cella ottenuti sperimentalmente in funzione del tempo, questa operazione è richiesta nel menù **cases** contenuto in **Calibration data** la cui interfaccia grafica è visibile in **Figura 6**.



Figura 6. Interfaccia grafica del menù calibrate

All'interno del suddetto menù è anche richiesto di selezionare la funzione **Calibrate** tramite il menu a tendina **Task** visibile in **Figura 6**, ed è inoltre necessario stabilire l'intervallo di tempo dei dati caricati che deve essere preso in considerazione per la procedura.

Un'ulteriore operazione che può essere fatta su questo menù qualora se ne abbia necessità è quella di imporre i valori per alcune costanti, questa operazione è resa possibile tramite la selezione dello specifico parametro per mezzo della funzione **Select case parameters** (visibile in **Figura 6**). In particolare nell'attività in oggetto per ognuna delle scariche calibrate abbiamo imposto il valore di OCV iniziale, ed inoltre per tutte le scariche successive alla prima, si è anche imposto l'uguaglianza tra i valori alla fine del tempo di rilassamento della scarica precedente di R_0 , R_1 , C_1 e rispettivamente A_{R0} , A_{R1} , B_{C1} in accordo con la (3).

L'ultimo menù che è rimasto da compilare è **Result Couplings**, che permette di selezionare la variabile del modello di cella che desideriamo far corrispondere ai dati sperimentali, che nel nostro caso ovviamente la è tensione di cella. La corrispondenza è imposta tramite un menu a tendina all'interno del quale è possibile selezionare le due tensioni da far coincidere.

Si avvia infine la procedura automatica che dopo una serie di iterazioni in qualche decina di secondi determina in maniera automatica i vari A e B che permettono di ottenere una tensione in funzione del tempo ai capi della cella modellizzata, analoga a quella contenuta nei risultati sperimentali.

3.4 Risultati calibrazione

Per quanto riguarda i risultati ottenuti con la presente attività, in Figura 7 viene mostrata l'evoluzione ricavata sperimentalmente delle curve OCV - SOC in funzione dell'invecchiamento della cella. Come si può vedere, in accordo con quelle che erano le aspettative supportate da considerazioni di tipo teorico, a parità di SOC passando dalla cella nuova a quella caratterizzata da 3200 cicli di invecchiamento la tensione ai morsetti della cella si riduce, in particolare in corrispondenza di SOC pari a 0.2 passa rispettivamente da 3.61 V a 3.45 V. Il SOC è stato calcolato secondo quanto riportato in (1), ovvero considerando per la capacità il valore di capacità nominale della cella.

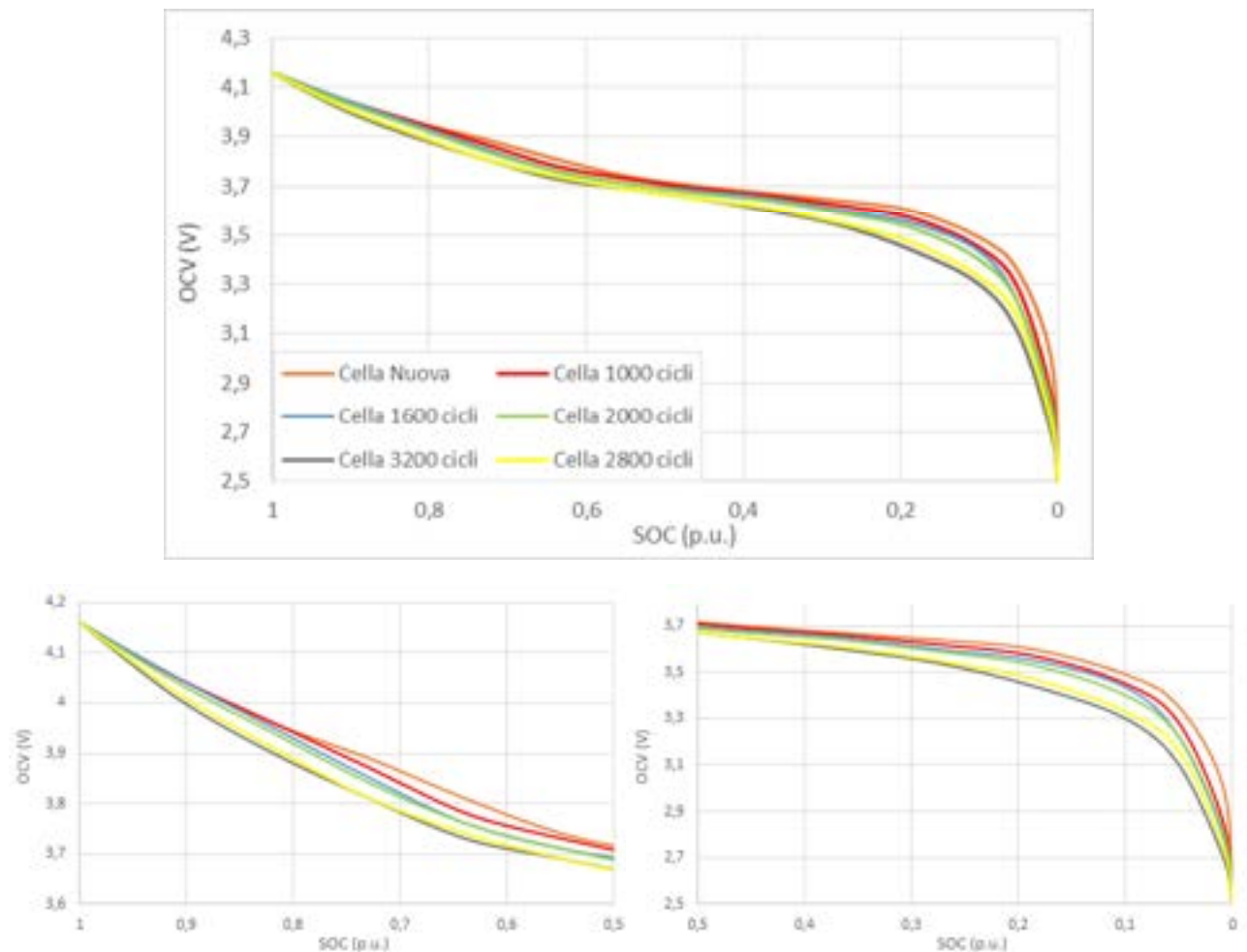


Figura 7. Evoluzione della dipendenza tra OCV e SOC in funzione dell'invecchiamento della cella (in alto); zoom della prima (in basso, a sinistra) e della seconda parte (in basso, a destra) della curva.

In Figura 8 è riportato l'andamento ottenuto sperimentalmente della carica estratta, caratterizzato da una corrente di scarica pari a 0.5C, in funzione dell'invecchiamento della cella. È facile notare che l'invecchiamento della cella risulta maggiore di quello ipotizzato partendo dai dati forniti dal costruttore ed ipotizzando un trend di invecchiamento lineare. La riduzione del 20% della carica estratta si raggiunge in corrispondenza di un invecchiamento di 3200 cicli, decisamente inferiore ai 4000 ipotizzati inizialmente.

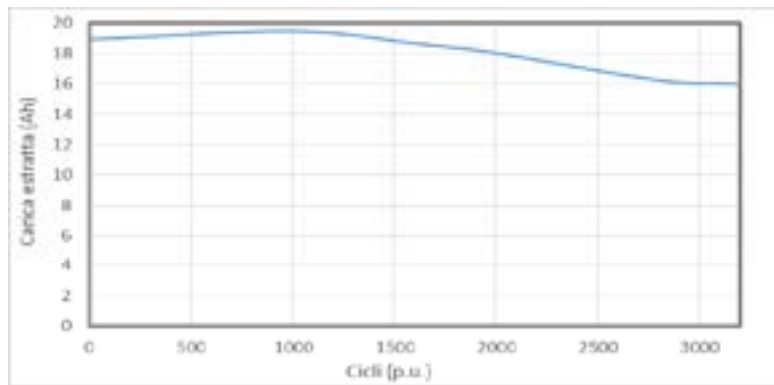


Figura 8. Carica estratta in funzione dell'invecchiamento a numero di cicli

I risultati per la cella NMC considerata sono riassunti nelle figure seguenti. Per la cella nuova si riporta in Figura 9 la tensione di cella ottenuta con il modello sovrapposta alla tensione di cella determinata con le prove sperimentali. Si nota immediatamente, come peraltro si era già evidenziato, che nelle prove di calibrazione per ognuna delle nove scariche sono state eliminate le due rapide fluttuazioni della tensione che seguono la forte scarica iniziale, queste infatti fanno riferimento alle fasi di scarica-carica rapide (15 s) che si è deciso di non considerare.

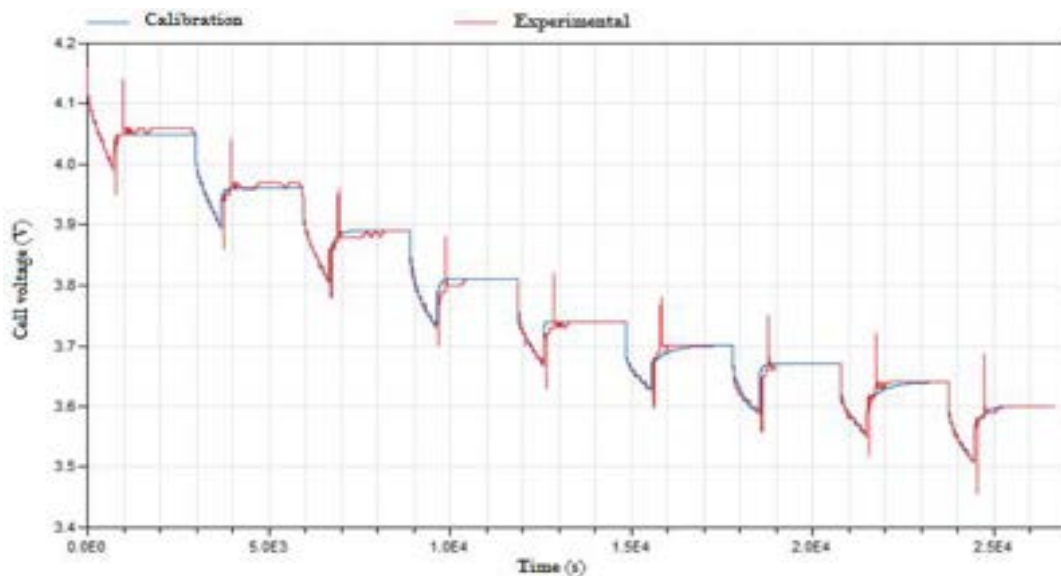
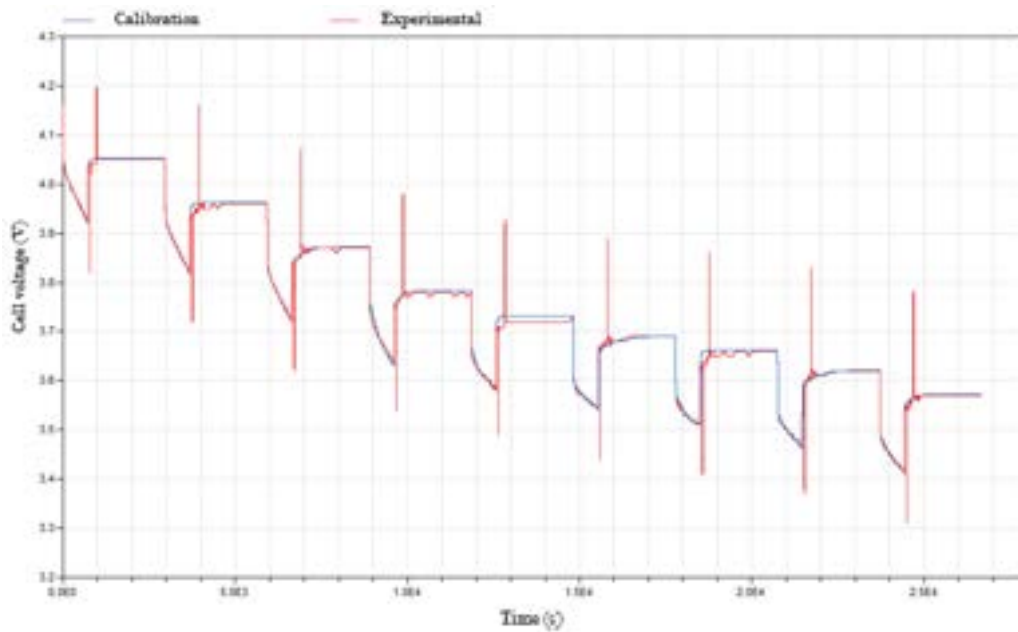


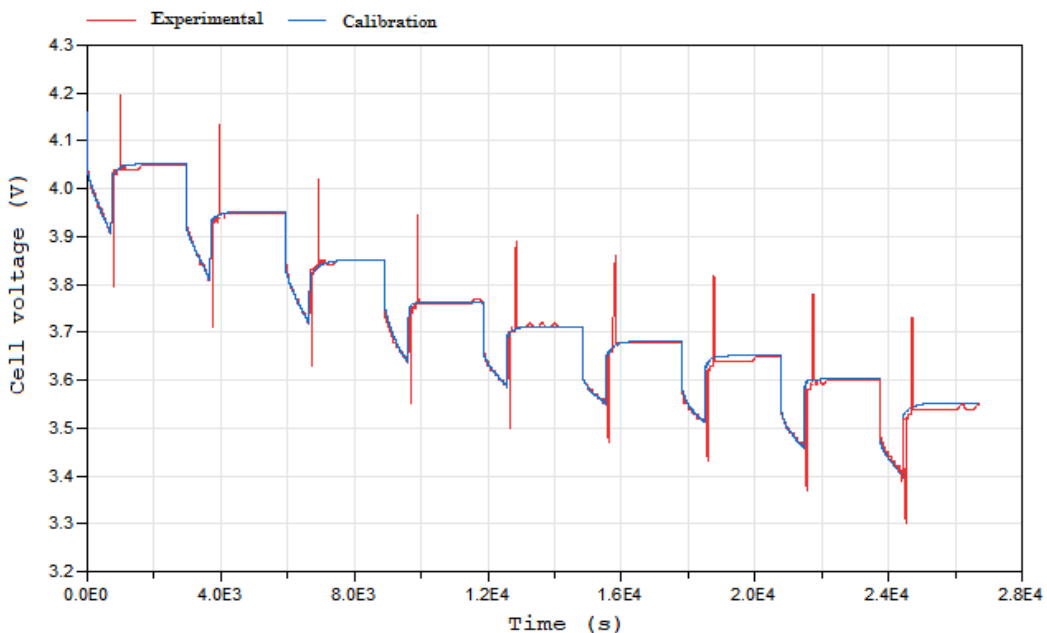
Figura 9. Tensione di cella sperimentale (in rosso) e tensione risultato della calibrazione (in blu) in funzione del tempo, cella nuova

Nel caso della cella invecchiata di 1000 cicli si riporta in Figura 10 l'andamento della tensione di cella ottenuta dopo la calibrazione dei parametri, sovrapposta a quella dei risultati sperimentali. Dalle prime due figure si osserva che gli andamenti delle tensioni, fatta eccezione per alcuni tratti all'interno dei tempi di rilassamento, sono piuttosto coerenti.



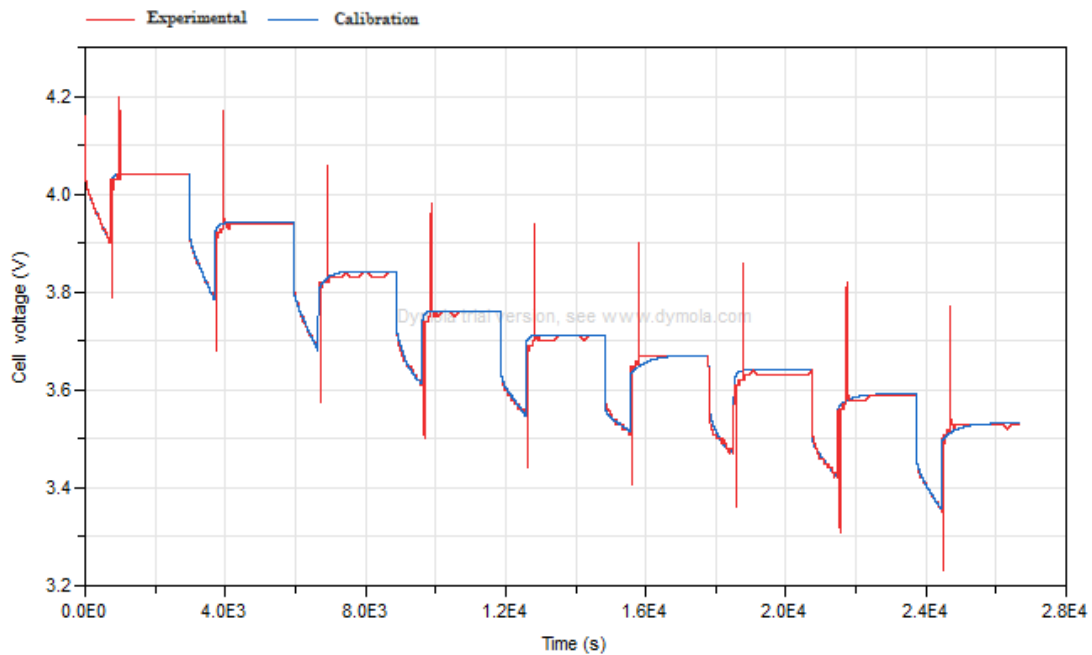
**Figura 10. Tensione di cella del modello (in blu), tensione di cella sperimentale (in rosso);
invecchiamento pari a 1000 cicli**

In Figura 11 sono mostrati i risultati della cella con 1600 cicli, per quanto riguarda la tensione di cella ed in questo caso si riscontrano andamenti delle tensioni ancor più coerenti, soprattutto nelle prime 6 scariche parziali.



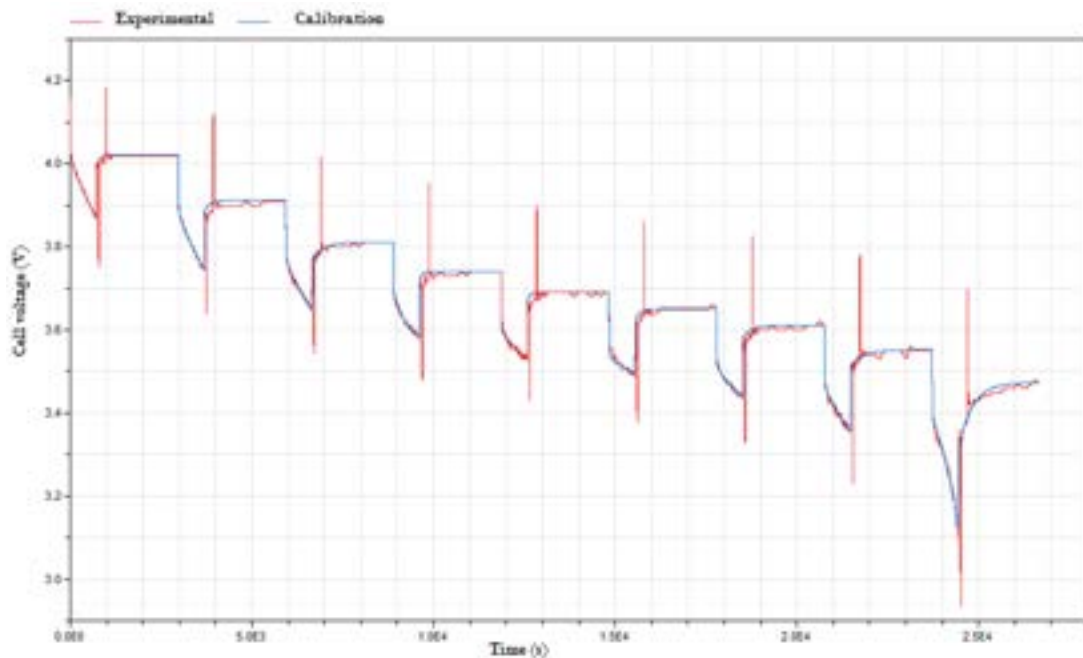
**Figura 11. Tensione di cella del modello (in blu), tensione di cella sperimentale (in rosso);
invecchiamento pari a 1600 cicli**

In Figura 12 sono mostrati i risultati in caso di invecchiamento pari a 2000 cicli. Anche in questo caso, come nei primi due analizzati, si osserva qualche scostamento in particolare durante la fase di rilassamento.



**Figura 12. Tensione di cella del modello (in blu), tensione di cella sperimentale (in rosso);
invecchiamento pari a 2000 cicli**

Analizzando i risultati per la cella invecchiata di 2800 cicli otteniamo andamenti delle tensioni nel modello e nei risultati sperimentali visibili in Figura 13, si nota immediatamente una differenza per quanto riguarda l'ultima scarica, in particolare un andamento diverso da tutte le altre scariche ed una maggior riduzione del valore di tensione. Le altre scariche mostrano un andamento equivalente.



**Figura 13. Tensione di cella del modello (in blu), tensione di cella sperimentale (in rosso);
invecchiamento pari a 2800 cicli**

Per concludere, le tensioni per la medesima cella invecchiata di 3200 cicli sono riportate in Figura 14; si evidenzia durante l'ultimo tempo di rilassamento un andamento delle tensioni caratterizzato da differenze significative oltre che, come nel caso precedente, una maggiore riduzione della tensione di cella nel corso dell'ultima scarica.

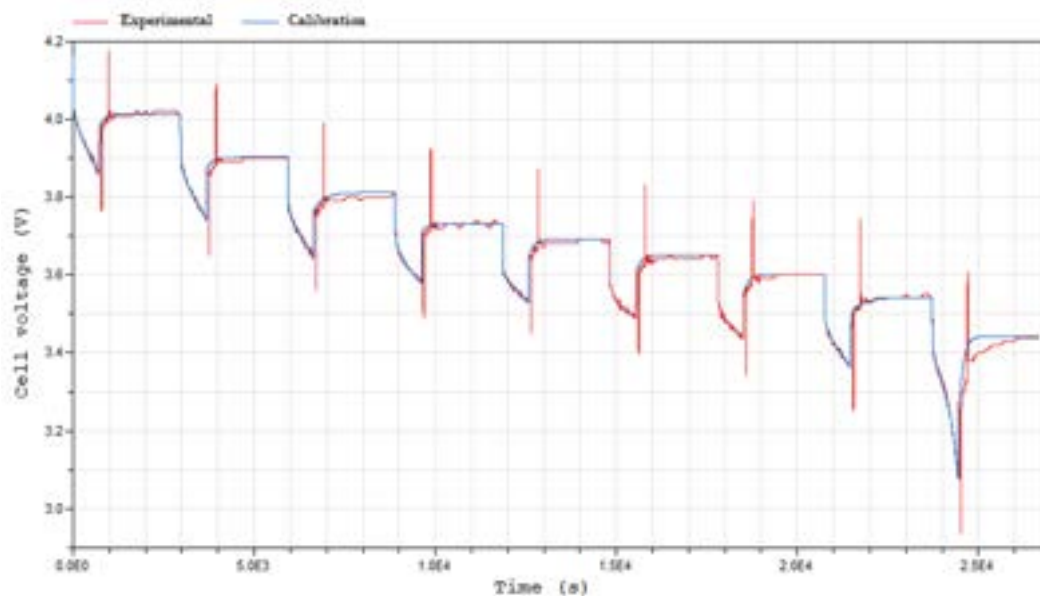


Figura 14. Tensione di cella del modello (in blu), tensione di cella sperimentale (in rosso); invecchiamento pari a 3200 cicli

In generale si può concludere, analizzando le figure appena mostrate, che l'andamento delle tensioni simulate del modello calibrato è allineato ai valori di tensione misurati per via sperimentale. E comunque interessante notare che le maggiori differenze tra i due valori di tensione si possono riscontrare proprio durante il tempo di rilassamento. Passiamo ad analizzare i risultati delle grandezze elettriche del modello di cella in funzione del SOC dopo le calibrazioni; lo scopo è quello di presentare un'analisi globale delle evoluzioni delle grandezze elettriche in funzione del tempo. In Figura 15 R_0 ed in Figura 16 (R_1C_1) riportiamo i risultati delle grandezze elettriche del modello di cella in funzione del SOC per i vari livelli di invecchiamento considerati.

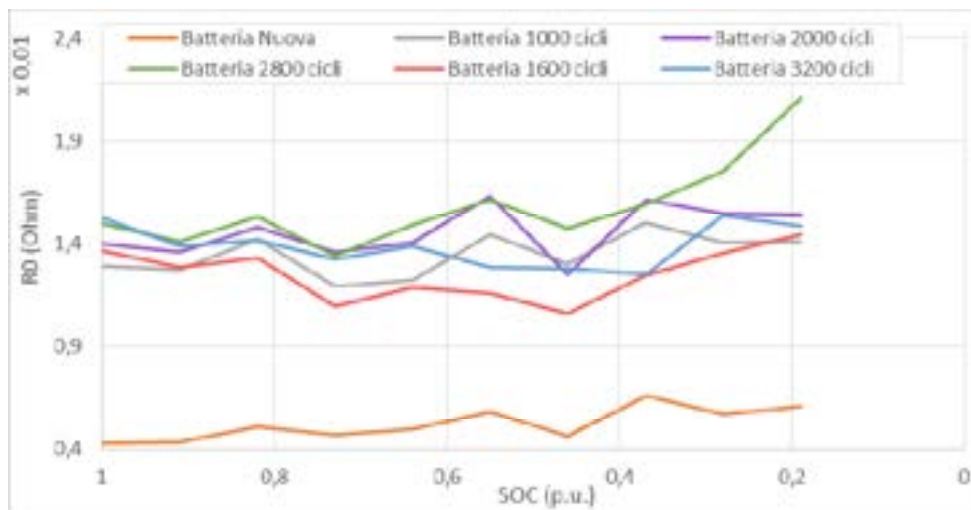


Figura 15. R_0 in funzione del SOC

Dagli andamenti della R_0 , si può individuare una tendenza abbastanza generalizzata per la grandezza in oggetto ad aumentare il proprio valore al crescere dell'invecchiamento. Questo trend non è invece rispettato nelle prove caratterizzate da un invecchiamento di 3200 e 1600 cicli.

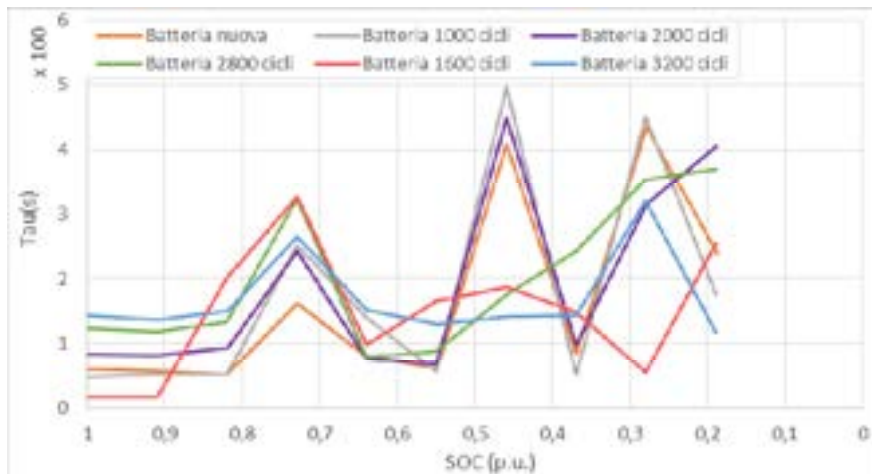


Figura 16. Costante di tempo in funzione del SOC

Anche riguardo alla costante di tempo il trend qualitativo accomuna gli andamenti per tutti i diversi gradi di invecchiamento. Nella Figura 17 si visualizzano i parametri del circuito in funzione dell'invecchiamento della cella per tre diversi valori di SOC. Oltre a una riduzione della capacità utile, come anche riportato in [6] [7], vi è una evoluzione dei diversi parametri circuitali, per i diversi SOC iniziali.

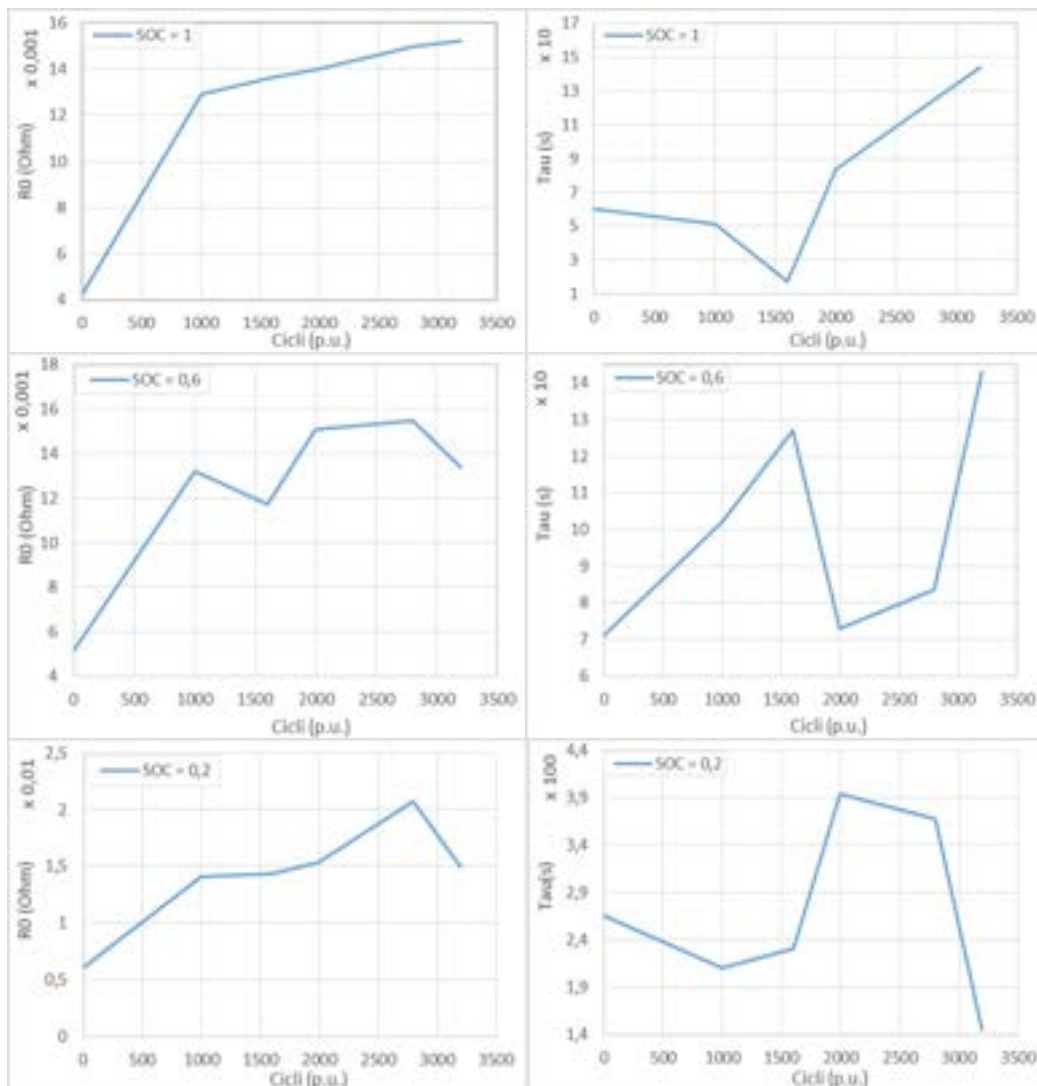


Figura 5. R_0 e τ in funzione del numero di cicli

Osservando gli andamenti dei parametri elettrici si può evidenziare che l'andamento della R_0 è sostanzialmente crescente, pur con alcuni tratti moderatamente decrescenti (1600 e 3200 cicli). Si può anche notare che la costante di tempo è caratterizzato da andamenti maggiormente variabili e profondamente diversi tra loro, con un range di oscillazione che va da un minimo di 70 s ad un massimo di circa 250 s. Poiché, sulla base di quanto mostrato anche in Figura 8, la capacità varia con l'invecchiamento, può essere di interesse riferire la dipendenza dei parametri dal SOC calcolato avendo a riferimento la capacità effettiva, e non quella nominale. Così facendo è possibile calcolare nuove curve del tipo già mostrato in Figura 7, Figura 15 e Figura 16. Per non appesantire troppo la presente trattazione, si riportano di seguito i soli valori di R_0 e τ calcolati con la nuova definizione di SOC.

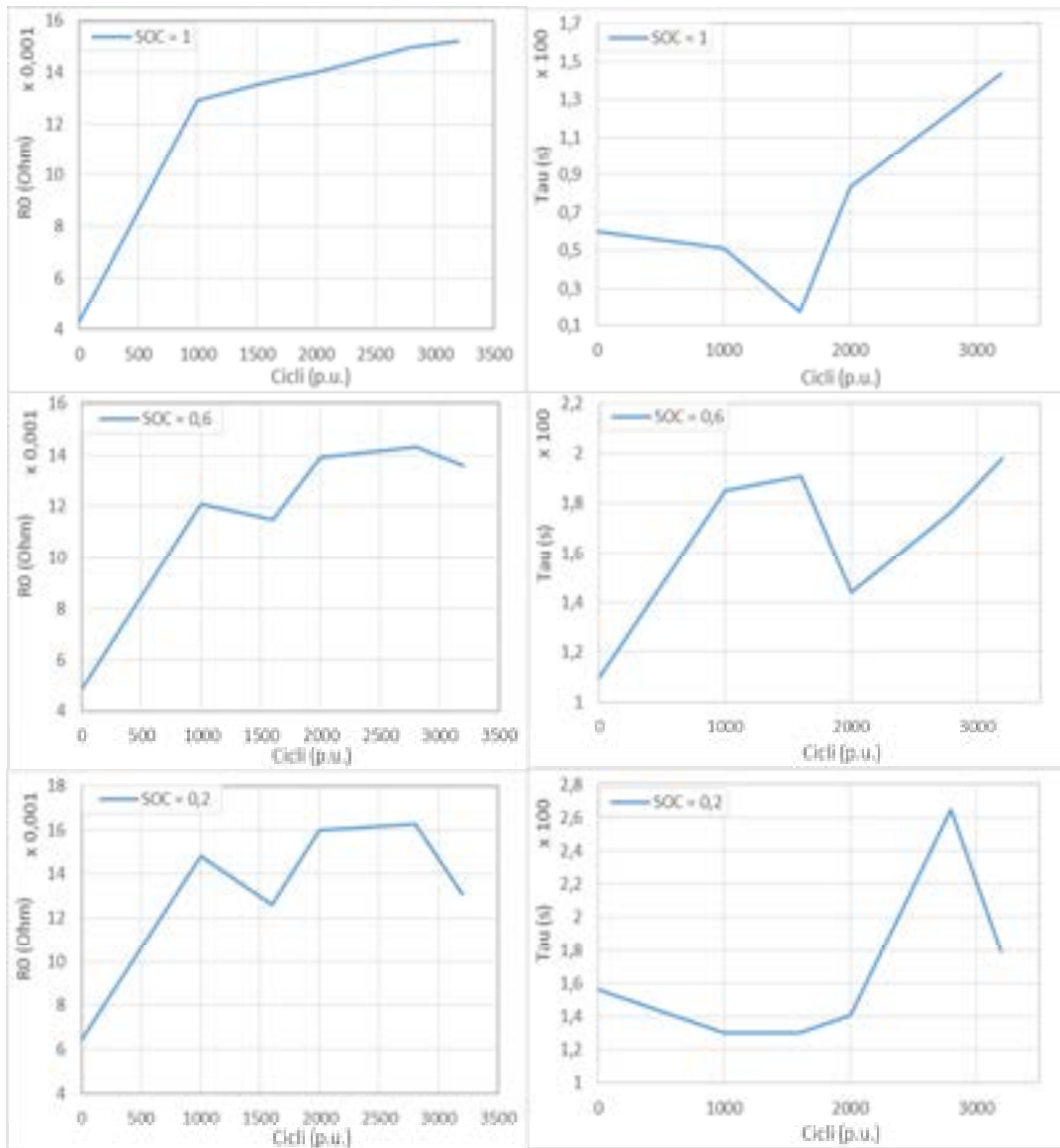


Figura 6. R_0 e τ in funzione del numero di cicli, SOC funzione della capacità effettiva

Come è possibile osservare l'andamento dei parametri differisce, specie ai SOC intermedi, rispetto al caso precedente avendosi un riferimento, appunto quello della capacità effettiva, in questo caso variabile con l'invecchiamento. Si ritiene tale approccio utile in particolare per variazioni più ampie della capacità, mentre nel caso in esame (range di variazione 15%) il riferirsi al valore della capacità nominale appare una approssimazione accettabile, garantendo peraltro un riferimento maggiormente pratico nel calcolo dei parametri.

4 Conclusioni

Il presente documento ha dunque descritto diverse fasi dell'attività inerenti il raggiungimento dei seguenti obiettivi:

- Realizzazione di un modello di cella tramite circuito elettrico equivalente, con implementazione di grandezze elettriche caratterizzate da una dipendenza lineare col SOC
- Individuazione di una metodologia automatica per la determinazione dei parametri elettrici del circuito equivalente tramite simulatore.
- Determinazione dei parametri elettrici e caratterizzazione della cella al litio per valori progressivi di invecchiamento. La caratterizzazione ha riguardato, in riferimento al circuito equivalente individuato:
 - Carica erogata.
 - Curva OCV-SOC.
 - Resistenza interna.
 - Costante di tempo.

5 Riferimenti bibliografici

1. M. Ceraolo, R. Giglioli: Procedure di prova per la determinazione delle capacità residua in termini di second life degli accumulatori al Li delle auto elettriche , RdS/PAR2012/252.
2. J. Neubauer, A. Pesaran: NREL s PHEV/EV Li-ion Battery Secondary-Use Project , *Advanced Automotive Batteries Conference (AABC) 2010*, Orlando, Florida.
3. J. Neubauer, A. Pesaran: The Ability of Battery Second Use Strategies to Impact Plug-in Electric Vehicle Prices and Serve Utility Energy Storage Applications *Journal of Power Sources*, 196, pp. 10351-10358, 2011.
4. M. Ceraolo, G. Lutzemberger, T. Huria: Experimentally-Determined Models for High-Power Lithium Batteries , SAE Technical Paper 2011-01-1365, 2011.
5. T. Huria, G. Ludovici, G. Lutzemberger: State of charge estimation of high power lithium iron phosphate cells , *Journal of Power Sources*, vol. 249, pages 92-102, 2014, issn: 0378-7753, doi: 10.1016/j.jpowsour.2013.10.079.
6. M. Ceraolo, G. Lutzemberger, M. Marracci: High power Lithium Batteries usage in hybrid vehicles , *Vehicle Power and Propulsion Conference (VPPC)*, 2010 IEEE, 1-3 Sept. 2010, Lille.
7. M. Ceraolo, G. Lutzemberger, D. Poli: Aging evaluation of high power lithium cells subjected to micro-cycles , *Journal of Energy Storage*, vol. 6, pages 116-124, 2016.

6 Curricula del gruppo di lavoro

Stefano Barsali (1969)

Ha conseguito laurea e dottorato di ricerca in Ingegneria Elettrica presso l'Università di Pisa nel 1994 e 1998 rispettivamente. Dal 2000 è stato ricercatore dall'ottobre 2006 è professore associato presso l'Università di Pisa dove è attualmente titolare degli insegnamenti di Sistemi di produzione dell'energia elettrica e Dinamica e controllo dei sistemi elettrici per l'energia del corso di laurea magistrale in Ingegneria Elettrica. Dal dicembre 2012 è presidente del Consiglio di Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria Elettrica. Nel dicembre 2013 ha conseguito l'abilitazione scientifica nazionale alle funzioni di professore universitario di prima fascia nel settore concorsuale 09/E2 Ingegneria dell'Energia Elettrica. Svolge la propria attività di ricerca presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi del Territorio e delle Costruzioni (DESTEC) dell'Università di Pisa. Dal 2004 al 2008 ha svolto la funzione di segretario dello Study Committee C6 CIGRÉ su Distribution Systems and Dispersed Generation ed è stato membro di due task force CIGRÉ ed attualmente partecipa ai lavori del WG C6.30 Impact of battery energy storage systems on distribution networks. I principali temi della ricerca svolta più di recente sono:

Generazione distribuita dell'energia elettrica e fonti rinnovabili.

Sistemi di accumulo elettrochimico ed applicazioni in veicoli a propulsione ibrida.

Riacensione del sistema elettrico a seguito di black-out.

Tale attività è stata condotta sia in collaborazione con altre Università (anche nell'ambito di progetti PRIN) che con enti esterni (ENEL, CESI, AEI, GRTN/TERNA, CIGRÉ, ecc.).

Fabio Bonsignori (1960)

Fabio Bonsignori ha conseguito il diploma di perito industriale, specializzazione Elettrotecnica, presso l'I.T.I.S. L. da Vinci Pisa, nell'a.s. 1978/79. Dal 1/06/1980 al 31/12/1988 ha lavorato come dipendente della ditta Montesi snc, settore impianti elettrici, con la qualifica di operaio. Dal 2/01/1989 è in servizio presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni-DESTEC (ex Dipartimento dei Sistemi Elettrici e dell'Automazione DSEA) dell'Università di Pisa, con la qualifica di dipendente tecnico di Livello D1. Successivi corsi frequentati: Sicurezza, prevenzione e formazione sul luogo di lavoro, presso Università di Pisa, Corso di Lingua inglese (Livello elementare e pre-intermedio).

Massimo Ceraolo (1960)

Ricercatore universitario dal 1992 professore Ordinario di Sistemi Elettrici per l'Energia dal 2002 presso la Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa. E docente degli insegnamenti di Sistemi Elettrici di Bordo presso l'Università di Pisa e presso l'Accademia Navale di Livorno. La sua attività di ricerca nell'ultimo decennio si è prevalentemente sviluppata nel settore dell'accumulo elettrochimico dell'energia, e dei veicoli a propulsione elettrica e ibrida. Su questi ultimi temi stato autore negli ultimi 10-15 anni di oltre 40 pubblicazioni, prevalentemente a carattere internazionale, di cui si allegano i riferimenti. Attualmente coordina lo sviluppo di un veicolo a propulsione elettrica alimentato a fuel-cell ad idrogeno. E presidente del Corso di Dottorato in Veicoli Terrestri e Sistemi di Trasporto e membro del Comitato di Presidenza della Commissione Veicoli Elettrici Stradali.

Romano Giglioli (1951)

Laureato con lode in Ingegneria Elettrotecnica nel 1976, nello stesso anno ha ricevuto il premio di Economia e Tecnica dell'Energia G. Levi Cases .

Dal 1994 è Professore Ordinario e ricopre le cattedre di Sistemi Elettrici per l'Energia e Tecnica ed Economia dell'Energia .

In collaborazione con strutture di ricerca pubbliche e private, sia nazionali che internazionali, ha contribuito, con studi teorici e sperimentali, all'innovazione e allo sviluppo di sistemi e dispositivi per la produzione, trasporto ed accumulo (in particolare elettrochimico) dell'energia elettrica e dei sistemi di conversione energetica, nonché dei sistemi di trasporto con propulsione elettrica ed ibrida. Sta inoltre promuovendo e sviluppando attività di ricerca nei settori della Smart grids, Smart Cities e Smart Communities. L'attività di ricerca è testimoniata da oltre un centinaio di pubblicazioni, dalla titolarità di alcuni brevetti utilizzati nell'ambito dei sistemi elettrici per l'energia ed in quelli di conversione energetica e dalla realizzazione di numerosi sistemi e dispositivi prototipali.

Ha assunto nel tempo incarichi direzionali nell'Ateneo di Pisa e in strutture pubbliche. Inoltre è esperto tecnico scientifico per la valutazione per il MIUR dei progetti PRIN e dei progetti PON e incaricato dal Ministro della Ricerca (MIUR) quale esperto italiano nel Comitato di programma Horizon 2020, nell'ambito della configurazione denominata Secure, Clean and Efficient Energy e membro del comitato CIACE (Dipartimento delle Politiche Europee della Presidenza del Consiglio).

Giovanni Lutzemberger (1981)

Nato a Pisa il 31/12/1981, ha conseguito il Diploma di Maturità classica nel Luglio dell'anno 2000. Ha conseguito la Laurea Specialistica in Ingegneria dei Veicoli Terrestri nel 2007 presso l'Università di Pisa, ed è risultato tra i vincitori con borsa del Concorso di ammissione al Dottorato di Ricerca in Veicoli Terrestri e Sistemi di Trasporto (Ciclo 2008-2010) presso la Scuola di Dottorato Leonardo da Vinci.

Nel 2011 ha conseguito il titolo di Dottore di Ricerca discutendo la tesi dal titolo Battery, Hybrid and Fuel Cell vehicle propulsion systems . Nel 2011 è risultato vincitore della Selezione pubblica per il conferimento di un assegno di ricerca di durata biennale sul tema Modellazione e sperimentazione di batterie al litio per applicazioni veicolari , presso il Dipartimento di Ingegneria dell'energia e dei sistemi (Università di Pisa), di cui ha ottenuto il rinnovo nel 2013. Nel 2014 è risultato vincitore della Selezione pubblica per l'assunzione di un Ricercatore a tempo determinato L.240/2010 di tipo junior (RTD-A) presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (Università di Pisa), Settore concorsuale 09/E2 Ingegneria dell'energia elettrica , Settore scientifico-disciplinare ING-IND/33 Sistemi elettrici per l'energia . Nel 2016 è risultato vincitore della Selezione pubblica per l'assunzione di un Ricercatore a tempo determinato L.240/2010 di tipo senior (RTD-B) presso il Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni (Università di Pisa), Settore concorsuale 09/E2 Ingegneria dell'energia elettrica , Settore scientifico-disciplinare ING-IND/33 Sistemi elettrici per l'energia . La sua attività di ricerca si è prevalentemente sviluppata nel settore dei veicoli a propulsione elettrica e ibrida e dell'accumulo elettrochimico dell'energia. Su questi ultimi temi è stato autore di 22 pubblicazioni, prevalentemente a carattere internazionale.

Davide Poli (1972)

Nel luglio 1991 ha ottenuto la maturità scientifica a pieni voti presso il Liceo Statale Giosuè Carducci di Volterra. Durante il periodo 1994-96 ha ricevuto una borsa di studio Siemens per studenti della Facoltà di Ingegneria dell'Università di Pisa, su base di merito; tale borsa gli ha permesso vari soggiorni di studio e tirocinio in Germania. Nel luglio 1997 si è laureato con lode in Ingegneria Elettrica presso l'Università di Pisa, con una tesi dal titolo Simulazione tecnico-economica di un parco di generazione idro-termoelettrico: una tecnica per la messa a punto di contratti tra Utility e Produttori Indipendenti , con relatori i professori Luigi Paris e Paolo Pelacchi. Dal 1998 al 2001 ha frequentato presso la stessa Università il corso di Dottorato di Ricerca in Ingegneria Elettrotecnica (XIV ciclo). In tale ambito si è occupato dell'analisi di sistemi elettrici liberalizzati (California, Spagna, Inghilterra, PJM, Italia) e di problematiche di tariffazione per clienti idonei e vincolati. Ha concluso il corso di dottorato con una tesi dal titolo: Mercati elettrici liberalizzati Analisi del

funzionamento e tecniche di simulazione . Il 1° agosto 2001 è diventato ricercatore universitario nel settore scientifico disciplinare INGIND/33 Sistemi Elettrici per l'Energia , con afferenza al Dipartimento di Sistemi Elettrici e Automazione dell'Università di Pisa, poi divenuto DESE e infine DESTEC (Dipartimento di Ingegneria dell'Energia, dei Sistemi, del Territorio e delle Costruzioni). È stato confermato in ruolo nel 2004. È abilitato alla professione di ingegnere. Nel dicembre 2013 ha ottenuto l'Abilitazione Scientifica Nazionale (ASN 2012) al ruolo di professore di seconda fascia nel Settore Concorsuale 09/E2 "Ingegneria dell'energia elettrica". A fine ottobre 2014 è risultato vincitore di procedura selettiva ex art.18 legge 240/2010 per Professore di seconda fascia (professore associato) nel Settore Concorsuale 09/E2 "Ingegneria dell'energia elettrica" Settore Scientifico Disciplinare ING-IND/33 Sistemi Elettrici per l'Energia ed è stato chiamato in ruolo dal DESTEC il 13 novembre 2014.