



Ricerca di Sistema elettrico

Individuazione e valutazione delle possibili applicazioni degli accumulatori in ottica di second-life, definizione dei cicli di utilizzo e relativa analisi sperimentale

Massimo Ceraolo, Romano Giglioli, Giovanni Lutzemberger

INDIVIDUAZIONE E VALUTAZIONE DELLE POSSIBILI APPLICAZIONI DEGLI ACCUMULATORI IN OTTICA DI SECOND-LIFE, DEFINIZIONE DEI CICLI DI UTILIZZO E RELATIVA ANALISI SPERIMENTALE

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

Settembre 2016

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA

Piano Annuale di Realizzazione 2015

Area: Trasmissione e distribuzione dell'energia elettrica

Progetto: Sistemi di accumulo di energia per il sistema elettrico

Obiettivo: Definizione di procedure di prova e loro applicazioni per la caratterizzazione dei sistemi di accumulo per il sistema elettrico

Responsabile del Progetto: Pier Paolo Prosini, ENEA

Il presente documento descrive le attività di ricerca svolte all'interno dell'Accordo di collaborazione "Analisi prestazionale di celle al litio per applicazioni gestionali di second-life"

Responsabile scientifico ENEA: Natascia Andrenacci

Responsabile scientifico Università di Pisa - DESTEC: Romano Giglioli

Indice

SOMMARIO.....	4
1 INTRODUZIONE.....	4
2 LA SECOND LIFE DEGLI ACCUMULATORI.....	4
2.1 ANALISI DELLE POTENZIALI APPLICAZIONI PER L'UTILIZZO IN OTTICA SECOND-LIFE DEGLI ACCUMULATORI.....	4
2.2 DEFINIZIONE DEI CICLI-TIPO PER LA CARATTERIZZAZIONE SPERIMENTALE DEGLI ACCUMULATORI	6
3 ATTIVITÀ SPERIMENTALE	9
3.1 ATTIVITÀ SPERIMENTALE SU CELLE AL LITIO NUOVE	10
3.2 ANALISI DEI RISULTATI	12
3.3 ATTIVITÀ SPERIMENTALE SU CELLE AL LITIO INVECCHiate	14
3.4 ANALISI DEI RISULTATI	14
4 CONCLUSIONI.....	15
5 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI	16
6 CURRICULA DEL GRUPPO DI LAVORO	17

Sommario

La valutazione sperimentale della “second life” è da intendersi come potenzialità applicativa in molte applicazioni, in modo da ridurre il costo operativo degli accumuli prima del loro smaltimento. Per caratterizzare meglio l'utilizzo e la destinazione delle celle in “second life”, si rende necessaria l'analisi di cicli rappresentativi di impiego. A partire da questi ultimi sono stati costruiti dei cicli di laboratorio equivalenti su cui effettuare una valutazione sperimentale delle celle, anche attraverso una analisi e caratterizzazione di tipo termico. Sulla base dei risultati sperimentali, è possibile individuare punti di criticità, valutare situazioni di degrado/rischio e la riutilizzabilità delle celle elettrochimiche, attraverso una ridefinizione dei criteri di ritiro delle celle dalla prima applicazione. Si prevede inoltre lo studio sperimentale di degrado ed invecchiamento delle celle finalizzato a indagare gli effetti dei singoli fattori di stress per le batterie, che incide sulla durata delle stesse. I risultati saranno utilizzati per la validazione di opportuni modelli di invecchiamento e da un'analisi delle procedure di invecchiamento adottate.

1 Introduzione

Per quanto sia prevedibile una riduzione del costo degli accumulatori al Litio, questi ultimi rimangono onerosi per l'utilizzo in applicazioni stazionarie dove il differenziale di prezzo dell'energia prelevata dalla rete non permette di avere un ritorno economico adeguato. In questi casi l'impiego di accumulatori già usati, dunque ipotizzandone un impiego di second-life, potrebbe invece consentire ritorni economici più alti.

A questo riguardo, le applicazioni in cui gli accumuli possono svolgere un servizio di potenza con limitati scambi di energia sembrano le più candidabili. A tal fine è importante definire dei cicli-tipo per tali applicazioni sia analizzando i dati sperimentali disponibili da attività precedenti, che effettuando attività di simulazione numerica al computer. Quindi, a partire dai cicli-tipo, effettuare prove sperimentali su accumulatori alla fine della loro vita utile, in modo da stimare le prestazioni e la vita residua.

L'obiettivo è in particolar modo quello di identificare una serie di procedure idonee a valutare correttamente il livello di vita residuo dell'accumulo in esercizio. Una caratterizzazione completa, sia in termini di energia che di potenza, consente infatti di inquadrare le prestazioni dell'accumulo in esame, al fine di scegliere in maniera corretta le applicazioni di second-life nelle quali esso può essere impiegato.

La riutilizzabilità dell'accumulo deve poi essere attentamente valutata. In termini di integrazione, qualora si vogliano migliorare le caratteristiche dell'impianto in oggetto, o di sostituzione, qualora si proceda alla sostituzione di sistemi di accumulo danneggiati con accumuli usati. In questo caso i criteri guida saranno orientati o alla definizione di procedure idonee alla selezione di accumulatori il più possibile omogenei in termini di caratteristiche e invecchiamento residuo, in modo da facilitarne l'integrazione con il sistema di accumulo esistente, oppure alla ridefinizione di procedure di gestione nel caso di accumuli disomogenei, in cui cioè si introducano nell'accumulo di partenza sotto-sistemi dalle caratteristiche diverse.

2 La second life degli accumulatori

2.1 Analisi delle potenziali applicazioni per l'utilizzo in ottica second-life degli accumulatori

Una possibilità per ridurre l'elevato costo delle batterie è come ipotizzato quello di estendere la loro vita utile prevedendone un reimpiego in applicazioni differenti da quella originaria. Applicazioni preferite per il secondo impiego sono quelle in cui gli accumuli debbano svolgere un servizio di potenza con limitati scambi di energia. Ciò può valere per applicazioni stazionarie o mobili, con particolare riferimento a sistemi a

propulsione ibrida. La "second life" dei sistemi di accumulo deve necessariamente essere inquadrata in riferimento all'intero ciclo vita, suddivisibile nelle seguenti fasi:

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

La "second life" entra dunque in gioco al termine della seconda fase. Chiaramente, diversi aspetti sono da tenere nella dovuta considerazione: l'impossibilità di prevedere la vita residua al momento del riutilizzo, il costo di assemblaggio e reintegrazione in nuovi dispositivi, la mancanza di una regolamentazione all'interno del mercato, L'avversità di alcune fasce di utenti ad impiegare accumulatori usati [1].

Il punto di partenza in questo tipo di analisi è legato all'individuazione del settore di riutilizzo. Tali valutazioni vengono effettuate anche prendendo in esame diversi scenari, alcuni raffigurati nelle figure seguenti [2] [3].

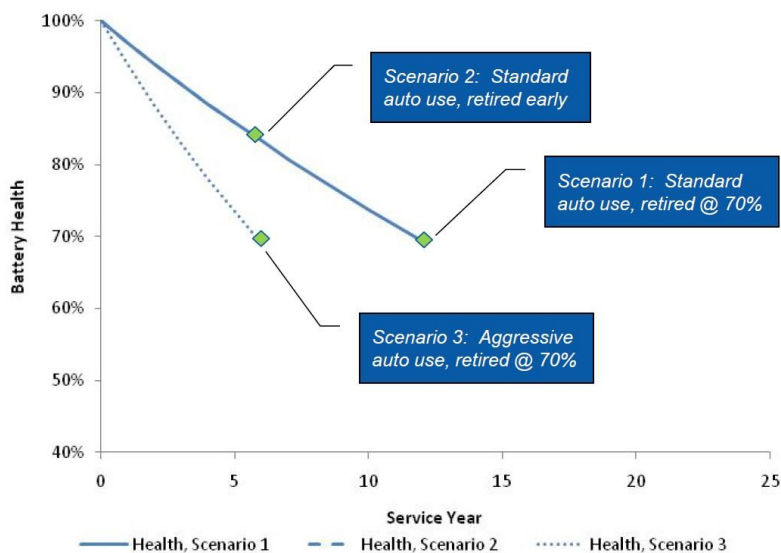


Figura 1: Scenari di riutilizzo di sistemi di accumulo, scenario A

Come è possibile osservare in questo caso la fase di primo utilizzo termina quando la capacità erogata non supera il 70-80% del valore nominale. In taluni casi è peraltro possibile prevedere il ritiro anticipato dell'accumulo.

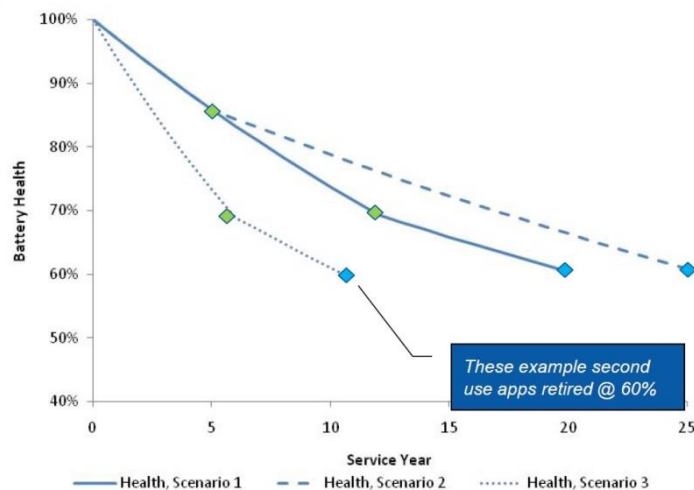


Figura 2: Scenari di riutilizzo di sistemi di accumulo, scenario B

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

In aggiunta all'analisi dei costi appare di un certo interesse effettuare anche una valutazione di impatto ambientale: ciò può effettuarsi attraverso una analisi completa del ciclo vita del sistema di accumulo, dalla costruzione, all'utilizzo fino alla fase di smantellamento. Un esempio di LCA (Life Cycle Analysis) al riguardo è riportato in [1]. L'impatto ambientale è stato poi valutato prendendo a riferimento l'influenza delle diverse fasi del ciclo vita sui fenomeni di riscaldamento globale, piogge acide ed eutrofizzazione: è stato così definito un punteggio finale complessivo, confrontato poi con quello ottenuto nell'ipotesi di non riutilizzo dell'accumulo. La possibilità di una "second life" per gli accumulatori comporta del resto un significativo risparmio sulla costruzione di nuove celle, in parte controbilanciato dall'utilizzo di accumulatori più scadenti, dal punto di vista dell'efficienza, durante la fase di vita utile. I risultati sono riassunti in [1], e mostrano una riduzione dell'indicatore di impatto ambientale attorno al 25% nel caso di riutilizzo dell'accumulo in un'applicazione stazionaria, al termine della prima fase di impiego automotive.

2.2 Definizione dei cicli-tipo per la caratterizzazione sperimentale degli accumulatori

Come anticipato, l'idea è di valutare il riutilizzo dell'accumulo in applicazioni caratterizzate dalla richiesta di cariche/scariche dell'accumulo aventi durate brevi, dunque con limitati scambi in energia. Tale sollecitazione dovrebbe dunque riprodurre la sollecitazione tipica per applicazioni orientate alla potenza. In quest'ottica sono stati definiti diverse tipologie di cicli, alcuni di carattere più generalizzato possibile, altri più orientati ad una specifica applicazione:

Cicli generalizzati

- A. Cicli ripetuti a ridotta profondità di scarica, effettuati a corrente costante senza oltrepassare i limiti di temperatura del dispositivo. Questa è la condizione più generale possibile per applicazioni ad alta potenza.
- B. Cicli ripetuti a ridotta profondità di scarica, effettuati a corrente variabile linearmente. Questa sollecitazione è assai più rappresentativa degli stress cui è effettivamente sottoposto l'accumulo per applicazioni veicolari.

A questo proposito, un singolo ciclo di tipo A (corrente costante) è mostrato in Figura 3: esso è costituito da una fase di carica a corrente costante, una fase di pausa, una fase di scarica sempre a corrente costante, con i seguenti vincoli:

- Durata e ampiezza delle fasi di carica (ab) e scarica (cd) sono le stesse. I valori sono stati scelti per mantenere la cella al litio all'interno dei valori di tensione limiti ammessi (4.2-2.7 V). Le ampiezze sono scelte in funzione delle prestazioni dichiarate dal costruttore dell'accumulo, riportate tipicamente in multipli della capacità nominale, mentre le durate corrispondenti sono pari a 30, 20, 10 secondi.
- La fase di pausa ha durata fissa di 20 secondi.

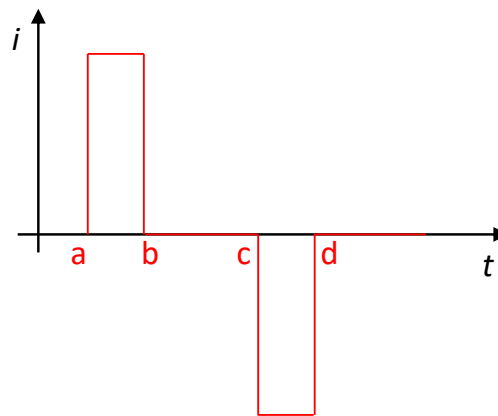


Figura 3: Sollecitazione di tipo A

Per quanto riguarda il test di tipo B invece, sia la fase di carica che quella di scarica sono variabili linearmente, sempre distanziate da una fase di pausa. Un singolo ciclo di tipo B è mostrato in Figura 4. In particolare:

- Durata e valori di picco delle fasi di carica (ab) e scarica (cd) sono le stesse. I valori sono stati scelti per mantenere la cella al litio all'interno dei valori di tensione limiti ammessi (4.2-2.7 V). Le correnti di picco vengono scelte sempre nei limiti prestazionali suggeriti dal costruttore, mentre le durate corrispondenti sono pari a 20 e 10 secondi.
- La fase di pausa ha durata fissa di 20 secondi.

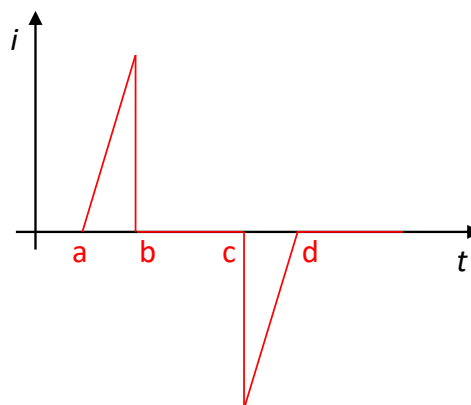


Figura 4: Sollecitazione di tipo B

Il test di tipo B è maggiormente rappresentativo del tipo A ai fini di una caratterizzazione realistica per applicazioni di tipo veicolare. In effetti, ipotizzando fasi ad accelerazione costante, la potenza valutata alla ruota (o al cerchione nel caso ferroviario) ha andamento triangolare. Risalendo nella catena dell'apparato di propulsione dunque, il medesimo profilo di potenza caratterizzerà l'azionamento e, più a monte, eventuali dispositivi di accumulo. In prima approssimazione, per risalire dal profilo di potenza al profilo di corrente, si considera un valor medio di tensione costante.

A partire dai test generalizzati sopra descritti, relativamente ai quali ulteriori dettagli sono rintracciabili in [4], è possibile definire test maggiormente rappresentativi dell'applicazione in esame. Si riportano di seguito due esempi. Il primo, riferito all'utilizzo di un accumulo stazionario per una applicazione tramviaria, il secondo, riferito all'utilizzo di un accumulo a bordo per una applicazione veicolare.

Ciclo per applicazione tramviaria

Diversi studi sono stati effettuati sulle tramvie e sull’installazione di sistemi di accumulo stazionario per recuperare l’energia di frenatura [5] [6] [7]. Dall’analisi di una intera giornata di esercizio della linea è stato possibile analizzare, sempre mediante software di simulazione, le sollecitazioni in corrente riguardanti uno o più accumuli stazionari installati in corrispondenza delle sottostazioni elettriche di alimentazione (SSE). A partire dagli andamenti simulati, simili ma non equivalenti tra loro, è stato definito un ciclo tipo volto a massimizzare le sollecitazioni cui le batterie sono sottoposte. In particolare il ciclo di prova, come dettagliatamente riportato in [8], deve presentare: lo stesso numero di picchi di corrente a cui sono sottoposte le batterie o un numero maggiore, la corrente massima uguale o superiore alla massima erogata dalle batterie, la stessa variazione di stato di carica o una maggiore, la stessa potenza dissipata o una maggiore. Il ciclo che si vuole proporre è costituito da una serie di scariche e cariche a gradino, costruite in modo da rappresentare delle correnti di picco ed una corrente continuativa di carica/scarica, come riportato in Figura 5. Come osservabile, le componenti di picco rappresentano la parte di potenza del ciclo originale, mentre la componente continuativa viene utilizzata per variare lo stato di carica delle celle: il ciclo può essere ripetuto periodicamente in quanto lo stato di carica iniziale e finale della batteria coincidono tra di loro. Ulteriori dettagli sono riportati in [8].

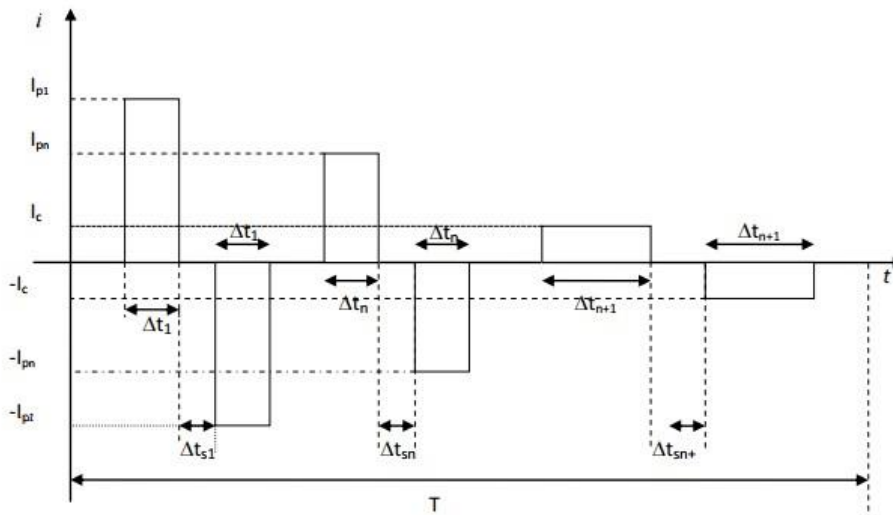


Figura 5: Sollecitazione per convoglio tramviario, struttura base [8]

Ciclo per applicazione veicolare

Per la definizione di un ciclo caratteristico per applicazione veicolare si è fatto riferimento ad un powertrain di tipo ibrido serie impegnato in un ciclo standard NEDC [9], tipicamente utilizzato per procedure di omologazione e rilevamento consumi/emissioni di veicoli stradali e composto da quattro ripetizioni di micro-ciclo urbano, più un micro-ciclo extra-urbano. Rispetto alla versione standard, la parte extra-urbana in questi casi viene limitata a 90 km/h.

Al fine di definire il ciclo di utilizzo della batteria, è stato ipotizzato l’utilizzo di una tipica gestione dell’energia a bordo, in cui il convertitore primario eroga il valor medio della potenza di propulsione richiesta [4], mentre la batteria eroga o assorbe gli scostamenti rispetto al valor medio. Il profilo di corrente simulato, ottenuto mediante simulazioni numeriche, in una porzione di ciclo NEDC è riportato in Figura 6 (in alto). Si riporta sotto per chiarezza anche il corrispondente profilo di velocità (in basso).

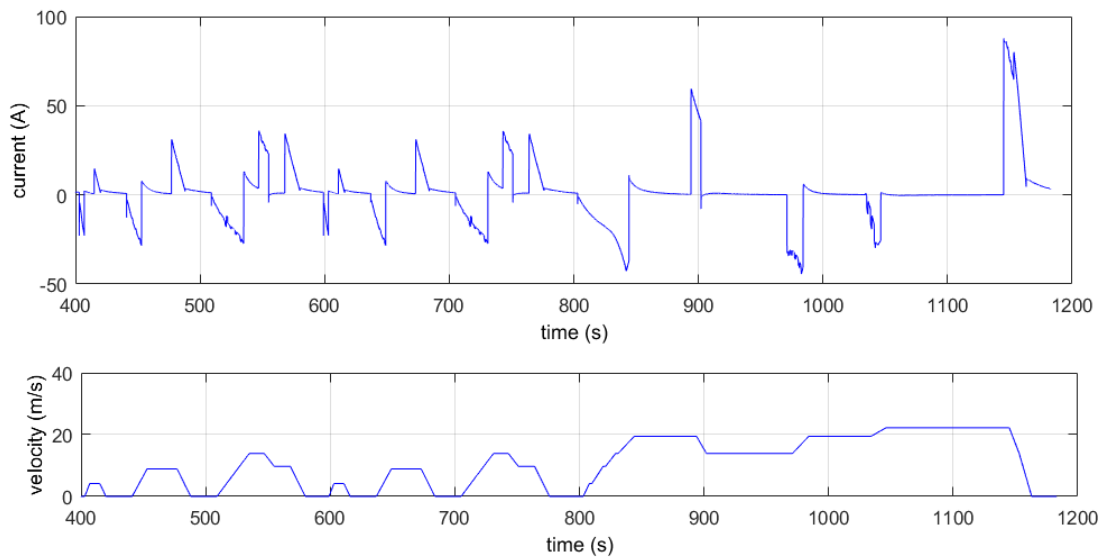


Figura 6: Sollecitazione per veicolo stradale, porzione ciclo NEDC

A partire dall'andamento della corrente simulata, è stato possibile idealizzarne gli andamenti attraverso una serie ripetuta di profili del tipo A e B prima descritti, ovvero a corrente costante o linearmente variabile. I valori di picco possono essere scelti come al solito a partire dalle indicazioni del costruttore dell'accumulo, rispettando i valori massimi di corrente indicati. Da precisare che in molte occasioni il costruttore non fornisce indicazioni precise, in tal caso tali limiti possono essere interpretati in maniera flessibile, con riferimento a prove sperimentali rintracciabili in letteratura sulla cella in questione. Altri esempi sono riportati in [10].

3 Attività sperimentale

L'attività sperimentale svolta ha avuto due principali filoni di attività. Il primo, inerente una completa caratterizzazione di una cella al litio nuova. In collaborazione con ENEA è stata scelta una cella al litio di tipo NMC, le cui caratteristiche sono riportate al paragrafo 3.1. Tale cella è stata testata in diverse condizioni di utilizzo, al fine di verificarne il comportamento per diverse temperature, e per diverse correnti erogate o assorbite. Presso i laboratori ENEA una cella identica è in fase di invecchiamento: l'obiettivo, una volta effettuati un numero di cicli completi di carica-scarica tali da ottenere una capacità residua pari all'80% di quella iniziale, è quello di effettuare i medesimi test di caratterizzazione, al fine di verificare le differenze di comportamento della cella invecchiata rispetto a quella nuova. Non essendo al termine del primo anno di attività la cella NMC disponibile, la seconda attività svolta si è basata su un confronto tra due celle LFP aventi diversi livelli di invecchiamento, disponibili presso i laboratori dell'Università di Pisa, al fine di dimostrare in via esemplificativa alcune diversità significative di comportamento, specie in relazione a test orientati all'erogazione o assorbimento di elevate potenze.

3.1 Attività sperimentale su celle al litio nuove

Come detto l'attività sperimentale su celle al litio nuove 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, 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.

Al fine di caratterizzare la nuova cella sono state effettuate tre tipologie di test:

- Energy test: si tratta di un test orientato alla verifica dell'energia che può essere estratta dalla cella. Sono stati dunque effettuati cicli completi di carica-scarica nei limiti di tensione suggeriti dal costruttore per tre diverse temperature, pari rispettivamente a 5°C, 20°C e 35°C. La corrente di carica è stata limitata a 1C_n mentre quella di scarica a 3C_n. L'andamento di tensione e corrente di cella durante la ripetizione di alcuni cicli di carica-scarica è rappresentata in Figura 7.

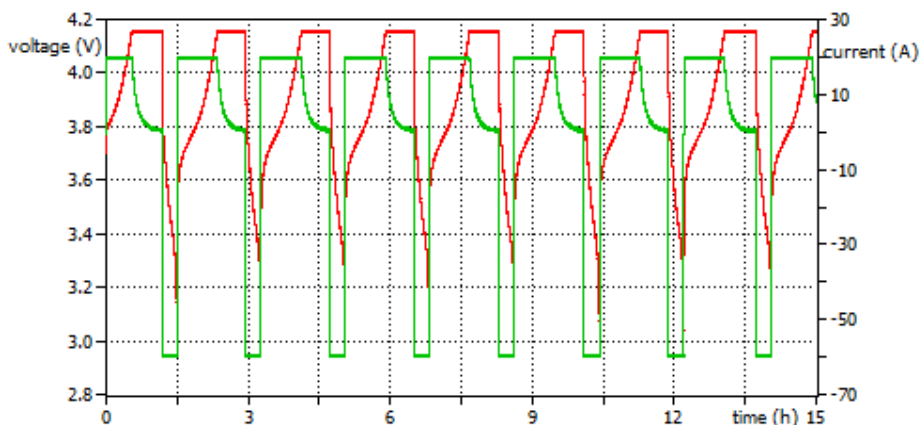


Figura 7: energy test

- Power test: si tratta di un test orientato ad una verifica di tipo termico, misurando cioè la differenza di temperatura tra l'involucro della cella in prova e quella ambiente, sottoposta a un test come quello descritto al paragrafo 2.2, ovvero cicli a ridotta profondità di carica/scarica effettuati a corrente

costante. Per ciascun ciclo le durate di carica e scarica sono imposte pari a 30 s, quella di pausa pari a 20 s, analogamente a quanto realizzato anche in [4] [10]. La differenza di temperatura è stata registrata a transitorio stabilizzato, ovvero dopo circa 2 ore. La prova completa e un suo ingrandimento sono riportati in Figura 8 e Figura 9.

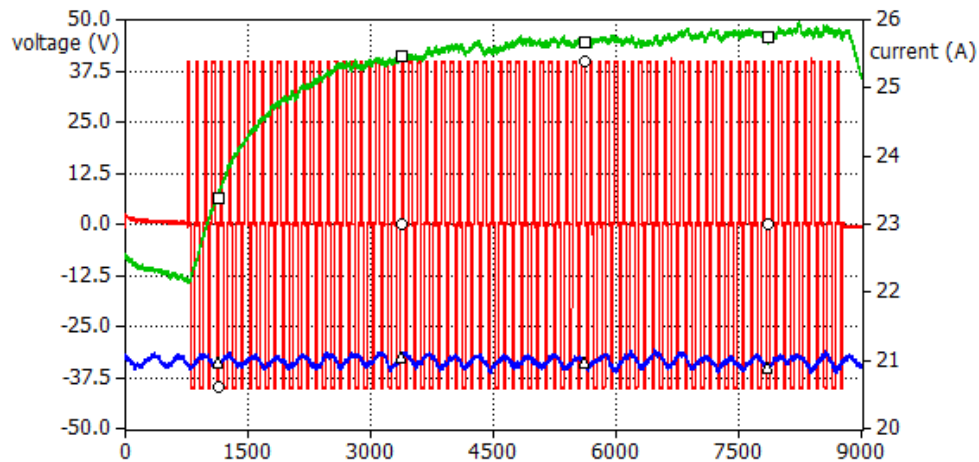


Figura 8: power test, prova completa

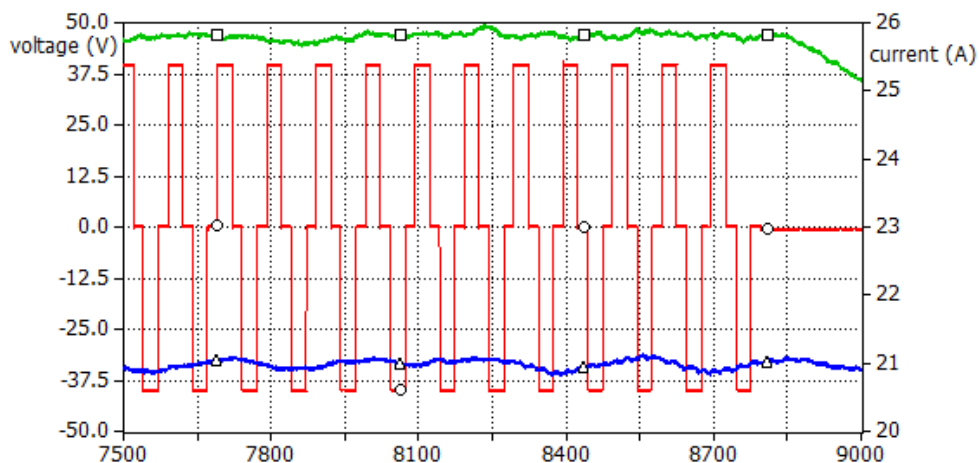


Figura 9: power test, dettaglio

- OCV test: si tratta di un test basato sulla ripetizione di una serie di scariche parziali, al fine di caratterizzare la cella misurando una serie di parametri caratteristici quali tensione a circuito aperto (Open Circuit Voltage), resistenza interna, altri parametri di rappresentazioni circuitali equivalenti. Tali parametri sono funzione dello Stato di Carica (SOC) e della temperatura, e ricavabili dalla singola scarica parziale come riportato in [11]. Il test OCV è stato dunque effettuato per le consuete tre diverse temperature di 5°C, 20°C e 35°C. La Figura 10 mostra un tipico test OCV, composto da 10 scariche parziali. In Figura 11, un dettaglio di una scarica parziale.

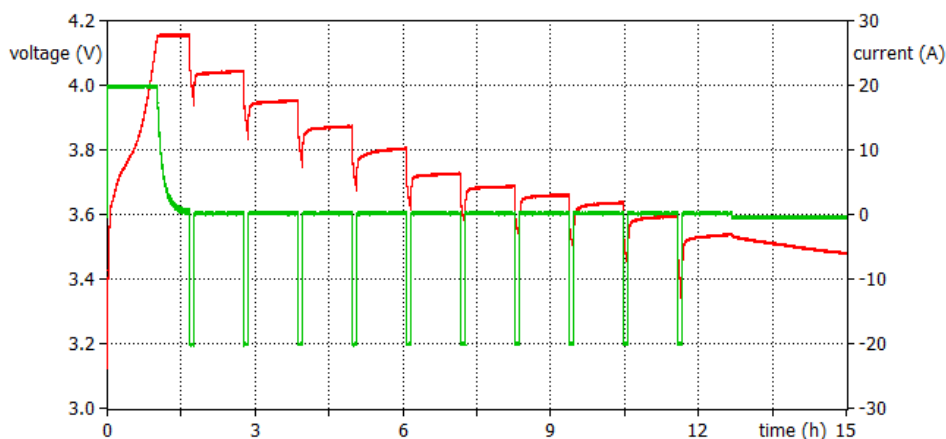


Figura 10: OCV test

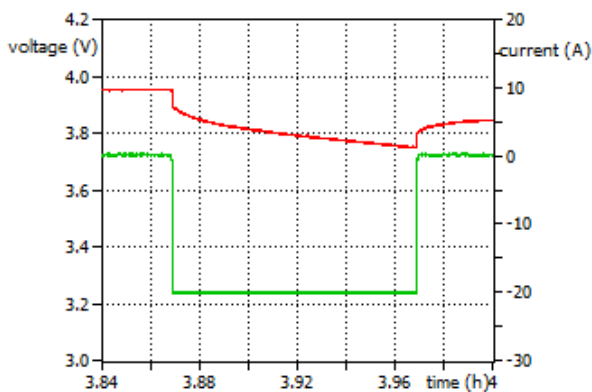


Figura 11: OCV test, dettaglio

3.2 Analisi dei risultati

I risultati della cella NMC utilizzata sono riassunti nelle tabelle seguenti. In particolare la Tabella 2 riporta i risultati dell'energy test, nel quale sono state valutate capacità ed energia estraibili in una serie di cicli di carica scarica, come descritti al paragrafo precedente.

Tabella 2: energy test

Temperatura ambiente (°C)	Capacità estratta (Ah)	Energia estratta (Wh)
5	17.7	60.5
20	19.3	67.9
35	20.7	73.9

I risultati hanno mostrato una ridotta dipendenza della capacità erogata con la temperatura. Come si vede, si è assistito a una riduzione di capacità attorno all'8% per la temperatura più bassa considerata (5°C), rispetto a quella ambiente (20°C).

La Tabella 3 riporta i risultati del power test. Come osservabile il salto termico ΔT rimane confinato entro i 15°C per temperature ambiente pari a 5°C e 20°C. Più ridotti i salti termici alla temperatura più alta. Si

osservi come in carica siano state considerate correnti piuttosto elevate per la carica. In scarica invece, il valore massimo coincide con il massimo valore continuativo suggerito dal costruttore, pari a 5C_n.

Tabella 3: power test

Temperatura ambiente (°C)	Corrente di carica (A)	Corrente di scarica (A)	ΔT (°C)
5	20	20	4.5
5	40	40	8.0
5	60	60	12.4
5	60	100	14.7
20	20	20	2.0
20	40	40	4.8
20	60	60	8.4
20	60	100	14.6
35	20	20	0.1
35	40	40	1.9
35	60	60	4.6
35	60	100	10.8

In tutti i casi trattati il salto termico appare comunque distante dalla massima temperatura operativa prevista, pari a 55°C.

Infine, dalla prova OCV è possibile risalire alla tipica curva che pone in relazione la tensione a circuito aperto (Open Circuit Voltage) alla capacità estratta. Di seguito, si riportano le curve OCV riferite alle tre temperature rilevate. Da precisare che tali curve possono essere utilizzate al fine di valutare correttamente anche il livello dello Stato di Carica dell'accumulo, secondo quanto già descritto anche in [11]. La Figura 12 riporta le correlazioni OCV-capacità estratta ottenuta alle temperature di 5°C, 20°C e 35°C.

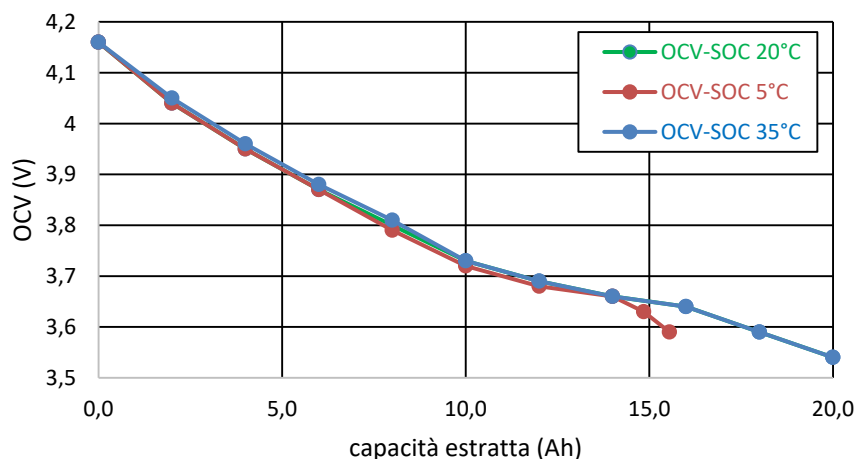


Figura 12: curva OCV-capacità estratta, temperatura 5°C, 20°C, 35°C

Come osservabile le curve a 20°C e 35°C sono perfettamente sovrapponibili. Anche la curva a 5°C non presenta scostamenti significativi nella prima parte, a meno di una riduzione della capacità estratta nell'ultimo tratto della curva.

3.3 Attività sperimentale su celle al litio invecchiate

Come già precisato, non essendo disponibili celle EIG invecchiate al termine del primo anno di attività, al fine di esemplificare la procedura di confronto seguita sono state individuate due celle invecchiate, caratterizzate da un diverso grado di invecchiamento, e alcuni test effettuati al fine di verificarne le differenze di comportamento. Le celle prese a riferimento sono di tipo LFP, le cui caratteristiche sono riportate in

Tabella 4.

Tabella 4: caratteristiche della cella Winston

Modello	WB-LYP40AHA
Massa (kg)	1.6
Dimensioni (mm)	115x47x183
Tensione max/nom/min (V)	4.0/3.2/2.8
Corrente max continuativa carica/scarica (A)	0.5C _n /3C _n
Capacità nominale (Ah)	40
Energia specifica (Wh/kg)	80
Densità di energia (Wh/L)	129
Potenza specifica (W/kg)	240
Densità di potenza (W/L)	388

Come visibile dalla tabella si tratta di una cella dalle caratteristiche significativamente diverse rispetto al caso precedente, maggiormente orientate all'energia e alla densità di energia, comunque aventi prestazioni inferiori rispetto al caso della cella NMC, bilanciate da un prezzo solitamente più contenuto.

Le due celle in questione sono state inizialmente sottoposte a un test "energy", del tipo descritto al paragrafo precedente, al fine di verificarne la capacità erogata alla temperatura ambiente.

Successivamente si è passati a un test di tipo "power", al fine di verificare il salto termico per le due celle sottoposte ai consueti profili di corrente di carica/scarica costante.

3.4 Analisi dei risultati

I risultati sono riassunti di seguito. Come è possibile osservare, dalla riduzione di capacità estratta è effettivamente possibile desumere un grado di invecchiamento differente per le due celle in esame. Come visibile in Tabella 5, la cella #1 ha erogato 35.6 Ah contro i 30 Ah della cella #2. Ipotizzando una vita pari a 5000 cicli all'80% di profondità di scarica, si può dunque ipotizzare la cella #1 a metà vita, avendo una capacità residua pari al 89% di quella nominale iniziale, e la cella #2 a fine vita, avendo una capacità residua circa pari al 77% di quella nominale iniziale. Estrapolando i dati forniti dal costruttore, si può quindi desumere un invecchiamento pari a 2-3000 cicli per la cella #1 e 5000 cicli per la cella #2.

Tabella 5: energy test

Cella	Temperatura ambiente (°C)	Capacità estratta (Ah)	Energia estratta (Wh)	Coeff. capacità residua
#1	20	35.6	108.6	0.89
#2	20	30.8	95.2	0.77

Una volta desunti livelli diversi di invecchiamento per le due celle, è stato effettuato il test di tipo “power”, al fine di verificare i salti di temperatura ΔT . Come possibile osservare analizzando la Tabella 6, i salti di temperatura sono analoghi a quelli rilevati per l'altro tipo di cella, pur precisando che per le LFP è diverso l'involucro.

Tabella 6: power test

Cella	Temperatura ambiente (°C)	Corrente di carica (A)	Corrente di scarica (A)	ΔT (°C)
#1	20	40	40	3.8
	20	80	80	8.6
	20	120	120	13.9
#2	20	40	40	4.1
	20	80	80	9.7
	20	120	120	15.0

La cosa più significativa però è che si notano differenze sensibili tra la cella meno invecchiata (#1) e quella più invecchiata (#2). Se a ridotte correnti ($1C_n$) tale differenza è di 0.3°C , per correnti più elevate rispettivamente pari a $2C_n$ e $3C_n$ tale differenza sale a 1.1°C , mostrando dunque una modificazione del comportamento della cella invecchiata a parità di sollecitazione.

4 Conclusioni

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

- L'analisi delle potenziali applicazioni e la definizione dei cicli tipo per la caratterizzazione sperimentale degli accumulatori in ottica di utilizzo in “second life”.
- La caratterizzazione sperimentale di una cella al litio nuova, sottoposta a una serie di test in particolare al fine di verificarne la capacità effettivamente erogabile e il comportamento termico in risposta a impulsi a corrente costante.
- Un confronto tra due celle al litio invecchiate, caratterizzate da diversi livelli di invecchiamento, al fine di verificarne alcune significative diversità di comportamento, specie dal punto di vista termico.

5 Riferimenti bibliografici

I riferimenti bibliografici devono essere richiamati nel testo con numeri progressivi tra parentesi quadre e riportati a fine testo con il seguente formato:

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, D. Poli: "Aging evaluation of high power lithium cells subjected to micro-cycles", *Journal of Energy Storage*, vol. 6, pages 116-124, 2016.
5. M. Ceraolo, M. Conte, R. Giglioli, G. Lutzemberger, M. Pasquali: "Use of electrochemical storage in substations to enhance energy and cost efficiency of tramways", *AEIT Annual Conference*, 3-5 Oct. 2013, Mondello (Palermo).
6. M. Ceraolo, G. Lutzemberger: "Stationary and on-board storage systems to enhance energy and cost efficiency of tramways", *Journal Of Power Sources*, vol. 264, pp. 128-139, 2014.
7. M. Ceraolo, R. Giglioli, G. Lutzemberger, A. Bechini: "Cost effective storage for energy saving in feeding systems of tramways", *IEEE International Electric Vehicle Conference (IEVC 2014)*, 17-19 Dec. 2014, Firenze.
8. M. Pasquali: "Costruzione di un ciclo di prova per il test di vita di un accumulo per la metropolitana di Bergamo e sua esecuzione", Rds/PAR2013/189.
9. Standardised driving cycles documentation: <http://www.dieselnet.com/standards/cycles>
10. 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.
11. M. Ceraolo, G. Lutzemberger, T. Huria: "Experimentally-Determined Models for High-Power Lithium Batteries", *SAE Technical Paper 2011-01-1365*, 2011.

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.
- Riaccensione 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 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). E' stato confermato in ruolo nel

2004. E' 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.