



Agenzia Nazionale per le Nuove Tecnologie,  
l'Energia e lo Sviluppo Economico Sostenibile



*Ministero dello Sviluppo Economico*

## RICERCA DI SISTEMA ELETTRICO

# Report su test di ricarica rapida di batterie a litio

*G. Pede, V. Sglavo, F. Vellucci, C. Villante*

## REPORT SU TEST DI RICARICA RAPIDA DI BATTERIE AL LITIO

G. Pede, V. Sglavo, F. Vellucci, C. Villante (ENEA)

Settembre 2011

Report Ricerca di Sistema Elettrico

Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA

Area: Razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

Progetto: Studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: Nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

Responsabile Progetto: Giovanni Pede, ENEA

## Indice

Indice .....	iii
Indice delle figure.....	iv
Indice delle tabelle .....	v
Inquadramento programmatico .....	1
Inquadramento tecnico-scientifico.....	2
Acquisizioni sperimentali caratteristiche di ricarica di batterie litio .	8
Descrizione delle batterie in prova .....	8
Batteria Kokam .....	8
Batteria Thunder-Sky .....	9
Osservazioni datasheets Kokam e Thundersky .....	11
Descrizione della stazione di prova .....	11
Principali elementi della catena di misura .....	11
Metodologia utilizzata.....	16
Determinazione della capacità.....	16
Determinazione dell'energia .....	17
Caratteristiche di carica-scarica a corrente costante .....	17
Kokam .....	17
Thunder-sky .....	20
Determinazione del RPP (Potenza di picco rigenerativa) .....	22
Conclusioni .....	25
Riferimenti bibliografici.....	26

## Indice delle figure

Fig. 1 - BLUE MAP Scenario – Quote di mercato delle varie tecnologie nel settore dei trasporti.	2
Fig. 2 - BLUE MAP Scenario – Tassi di vendita di veicoli elettrici ed ibridi .....	3
Fig. 3 – Rappr. schematica della Roadmap IEA o per i veicoli elettrici ed ibridi plug-in .....	4
Fig. 4 – Confronto tra diverse tipologie di accumulo elettrico .....	5
Fig. 11 – Modulo e cella della Kokam.....	9
Fig. 12 – Modulo della Thunder-sky .....	10
Fig. 8 – Principali elementi della catena di misura .....	13
Fig. 9 – Disposizione degli strumenti di misura .....	14
Fig. 10 –Interfaccia grafica del software implementato per l’elaboraz.e la registraz. dei dati..	15
Fig. 11 –Prove carica-scarica a corrente costante - Kokam – V vs Ah .....	18
Fig. 12 –Prove carica-scarica a corrente costante - Kokam – V vs t.....	18
Fig. 13 –Prove carica-scarica a corrente costante - Kokam – V vs SOC.....	19
Fig. 14 –Prove carica-scarica a corrente costante – Thunder-Sky – V vs Ah .....	20
Fig. 15 –Prove carica-scarica a corrente costante – Thunder-Sky – V vs t.....	21
Fig. 16 –Prove carica-scarica a corrente costante – Thunder-Sky – V vs SOC .....	21
Fig. 17 –Procedura utilizzata per la prova RPP .....	22
Fig. 18 –Procedura utilizzata per la prova di ricarica rapida .....	24

## Indice delle tabelle

Tab. 1 – BLUE MAP Scenario – Tassi di vendita di veicoli elettrici ed ibridi.....	3
Tab. 2 – Confronto tra tecnologie di batterie diverse per tipo di chimica .....	6
Tab. 3 – Principali accordi commerciali e programmatici tra prod. auto e prod. di batterie.....	7
Tab. 4– Caratteristiche dichiarate per la singola cella Kokam .....	9
Tab. 5 – Caratteristiche dichiarate per la singola cella Thunder-sky .....	10
Tab. 6 –Prove carica-scarica a corrente costante - Kokam – Principali risultati.....	19
Tab. 7 –Prove carica-scarica a corrente costante – Thuder-sky – Principali risultati .....	22
Tab. 8 –Prove RPP – Kokam – Principali risultati .....	23
Tab. 9 –Prove RPP –Thunder-sky – Principali risultati .....	23
Tab. 10 –Prove Ricarica veloce – Kokam – Principali risultati .....	25
Tab. 11 –Prove Ricarica veloce – Thunder-sky – Principali risultati.....	25

## Inquadramento Programmatico

Il Presente Report si inquadra nella Ricerca di Sistema Elettrico svolta dall'ENEA nell'ambito del relativo Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA.

La Ricerca di Sistema ha come obiettivo l'innovazione del Sistema Elettrico per migliorarne l'economicità, la sicurezza e la compatibilità ambientale, assicurando al Paese le condizioni per uno sviluppo sostenibile.

Per lo svolgimento delle attività di ricerca e sviluppo previste dal Piano Triennale della Ricerca di Sistema Elettrico il Ministero dello Sviluppo Economico ha stipulato Accordi di Programma con ENEA, CNR ed ERSE.

Le attività sono finanziate attraverso un fondo alimentato dalla componente A5 della tariffa di fornitura dell'energia elettrica, il cui ammontare viene stabilito dall'Autorità per l'Energia Elettrica e il Gas.

Nell'Accordo di Programma sono previsti temi di ricerca fondamentale e studi di carattere sistemico e prenormativo a totale beneficio dell'utente di sistema elettrico nazionale.

Le ricerche sono condotte dall'ENEA in collaborazione con le principali Istituzioni universitarie nazionali (oltre 28 Atenei e 65 diversi Dipartimenti coinvolti) e con le partecipate SOTACARBO e FN Nuove Tecnologie Avanzate. Nell'ambito dell'Accordo di Programma Triennale, l'ENEA ha terminato le attività terzo anno di attività.

L'accordo è meglio definito da un piano annuale di realizzazione, suddiviso in Attività. Ogni attività ha un contesto scientifico-programmatico di riferimento, suddiviso in aree e tematiche di ricerca, in ognuna delle quali sono definiti specifici progetti di ricerca, a loro volta suddivisi in obiettivi da perseguire.

Nel dettaglio, l'inquadramento programmatico completo del presente report è il seguente:

**Accordo di Programma MSE-ENEA:** Attività di ricerca e sviluppo di interesse generale per il sistema elettrico nazionale

**Piano Triennale 2006-2008**

**Piano annuale di realizzazione Terza annualità (2008-2009):** da realizzarsi tra l'ottobre 2010 ed il settembre 2011

**Attività:** Risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

**Area di riferimento:** razionalizzazione e risparmio nell'uso dell'energia elettrica

**Tematica di ricerca:** risparmio di energia elettrica nei mezzi di trasporto elettrici

**Progetto 3.5:** studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto

**Obiettivo C:** Adattamento di convertitori di piccola potenza ad alto rendimento all'uso nei veicoli elettrici leggeri, e sperimentazione di sistemi di ricarica rapida

## Inquadramento Tecnico-Scientifico

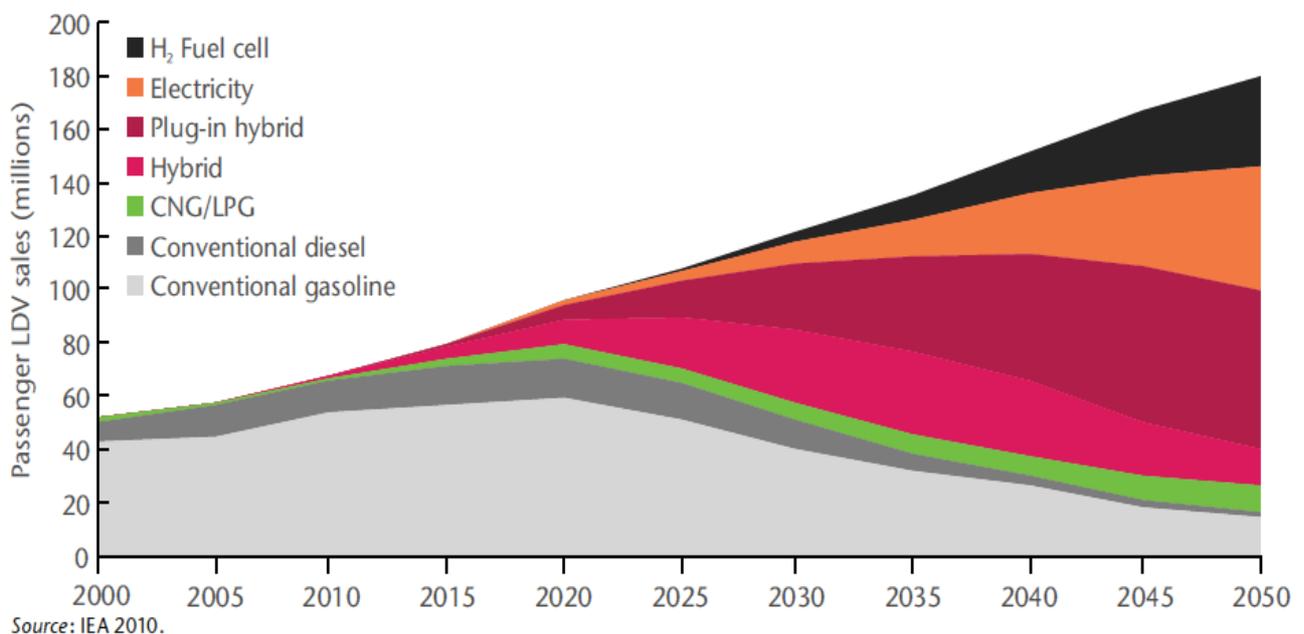
La IEA (Internation Energy Agency) ha recentemente diffuso un documento di sintesi del panorama tecnologico nel settore dei veicoli elettrici ed ibridi plug-in.

In particolare, il lavoro fa uso di uno scenario di riferimento al 2050 ormai consolidato in ambito Europeo, chiamato ETP (Energy Technology Perspectives) BLUE Map Scenario, che descrive come le tecnologie energie possano essere sviluppate entro il 2050 per raggiungere il target emissivo di CO<sub>2</sub> dell'UE fissato al dimezzamento degli standard di emissione del 2005. Il target per il settore dei trasporti è fissato al 70% dei valori del 2005.

Per il settore dei trasporti, l'obiettivo è raggiungibile, in accordo con lo scenario, tramite la messa in produzione su scala mondiale di 50 milioni di veicoli elettrici e 50 milioni di veicoli ibridi plug-in all'anno nel mercato light-duty. Ciò rappresenterebbe una quota di mercato di circa il 50% delle nuove immatricolazioni di veicoli leggeri.

Il raggiungimento degli obiettivi della BLUE Map richiede pertanto una evoluzione tecnologica che permetta l'introduzione sul mercato delle tecnologie ad un costo sostenibile per la collettività. E' auspicabile infatti che le tecnologie rendano possibile una politica di introduzione di veicoli elettrici ed ibridi particolarmente intensa, come rimarcato anche dell'evoluzione temporale dello scenario di riferimento del settore dei trasporti riportato nella figura seguente.

### Annual light-duty vehicle sales by technology type, BLUE Map scenario



**KEY POINT:** This roadmap sees rapid light-duty vehicle technology evolution over time.

Figura 1 - BLUE MAP Scenario - Quote di mercato delle varie tecnologie nel settore dei trasporti.

In termini numerici, le quote di mercato riportate in figura si traducono nei trend di crescita del numero di veicoli elettrici e d ibridi di nuova generazione riportati nella tabella e nella figura seguenti. Tali numeri sono di estremo interesse perché permettono di definire l'ampiezza del mercato di riferimento e, corrispondentemente, la dimensione degli investimenti pubblici e privati richiesti per il raggiungimento dell'obiettivo di scenario.

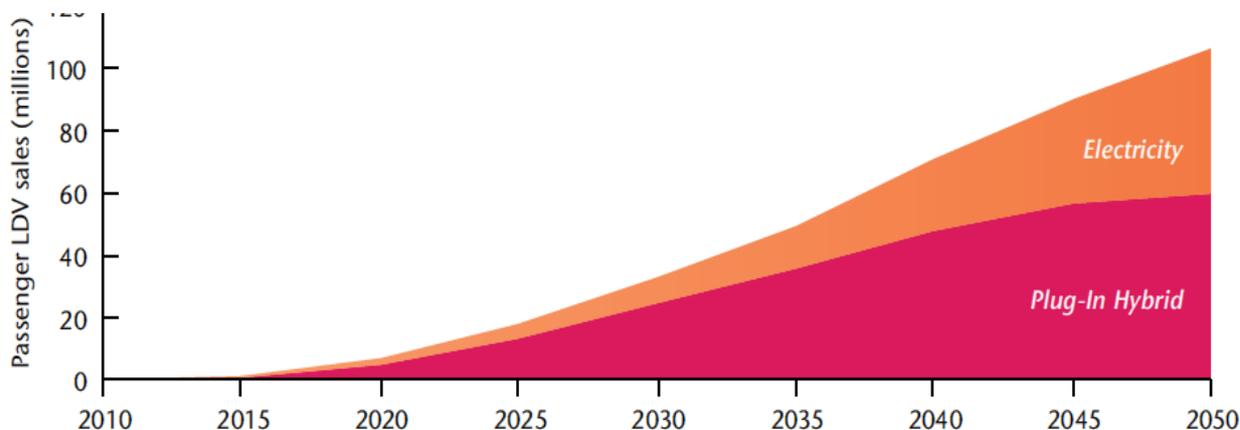
### Global EV and PHEV sales in BLUE Map, 2010–2030 (millions per year)

	2010	2015	2020	2025	2030	2035	2040	2045	2050
PHEV	0.0	0.7	4.9	13.1	24.6	35.6	47.7	56.3	59.7
EV	0.0	0.3	2.0	4.5	8.7	13.9	23.2	33.9	46.6
Total	0.0	1.1	6.9	17.7	33.3	49.5	70.9	90.2	106.4

Source: IEA 2010.

Tabella 1 - BLUE MAP Scenario - Tassi di vendita di veicoli elettrici ed ibridi

### Annual global EV and PHEV sales in BLUE Map scenario



Source: IEA 2010.

**KEY POINT:** EV/PHEV sales must reach substantial levels by 2015 and rise rapidly thereafter.

Figura 2 - BLUE MAP Scenario - Tassi di vendita di veicoli elettrici ed ibridi

In questo contesto il rapido sviluppo delle tecnologie chiave è cruciale. Tra di essi i sistemi di accumulo elettrico rivestono la massima importanza, come evidenziato anche dalla rappresentazione sintetica della roadmap proposta dalla IEA riportata nella figura seguente

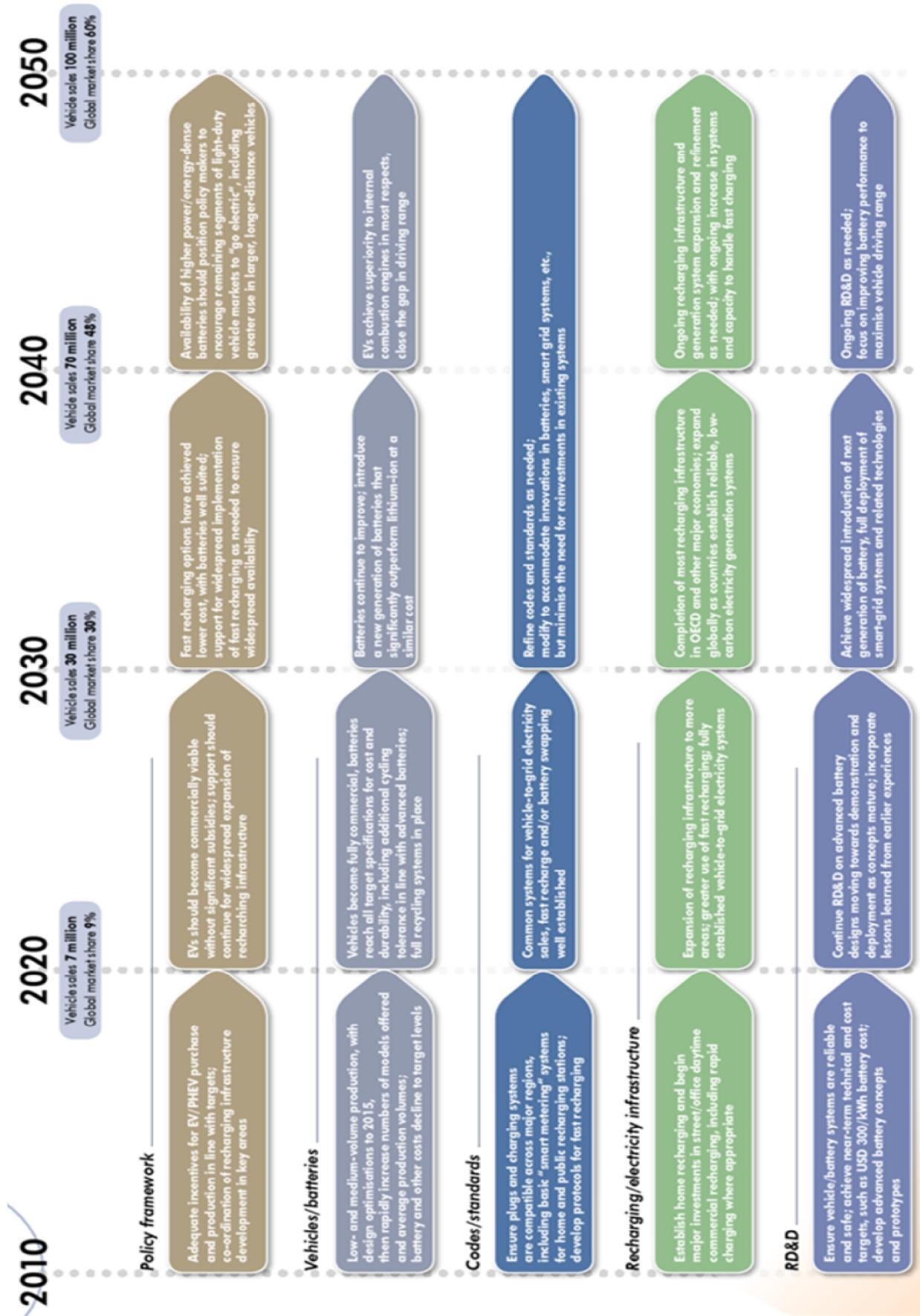
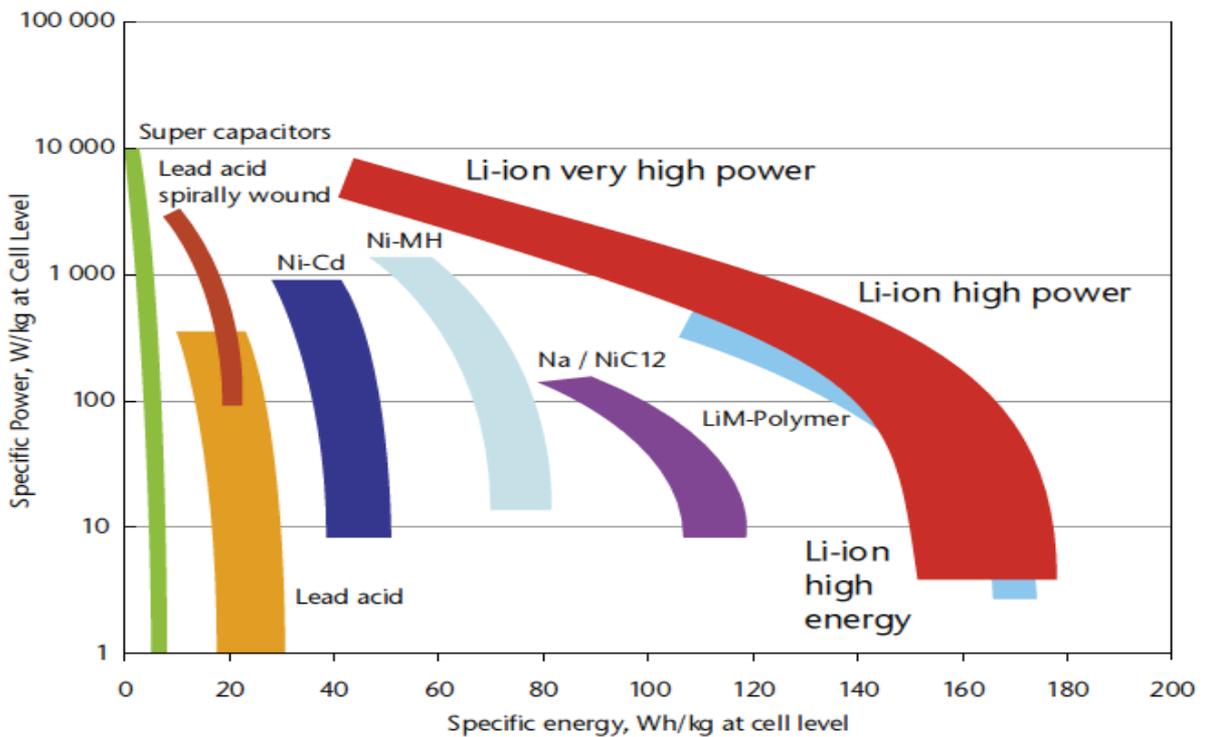


Figura 3 – Rappresentazione schematica della Roadmap IEA o per i veicoli elettrici ed ibridi plug-in

La tecnologia delle batterie è parte fondante per questa tipologia di veicoli e ancora richiede significativi passi avanti tecnologici. Le batterie litio attuali e quelli che saranno disponibili nel breve periodo, infatti, ancora hanno una serie di aspetti che necessitano un rilevante sviluppo per migliorare le performance del veicolo e ridurre i costi dello stesso permettendo una reale penetrazione nel mercato. Gli aspetti principali riguardano.

- La quantità di energia immagazzinabile: le batterie per i veicoli elettrici devono essere progettate per ottimizzare l'energia disponibile per unità di peso e volume, mentre spesso per i veicoli ibridi e plug-in, in funzione del grado di ibridizzazione, le batterie sono ottimizzate per fornire elevate potenze specifiche. Ciò porta allo sviluppo di differenti tipologie di prodotto. Ad ogni modo, le economie di scala favorirebbero l'integrazione di tali caratteristiche in prodotti il più possibile tecnologicamente simile.
- Cicli di scarica delle batterie: Le batterie per veicoli elettrici ed ibridi possono avere ciclicità e caratteristiche dei processi di carica e scarica molto differenti. Le batterie per veicoli Plug-in sono soggette, ad esempio, a cicli di scarica profondi (in modalità pura-elettrica) ed a cicli più ridotti in ampiezza per le fasi di assistenza alla trazione e frenatura rigenerativa (in modalità ibrida). Le batterie per i veicoli elettrici, invece, sono soggette a cicli ripetuti di scarica profonda. In entrambi i casi, l'utilizzo dell'accumulo è molto diverso se paragonato a quello effettuato nei veicoli ibridi convenzionali a MCI, che sono soggette tipicamente a moltissimi cicli di piccola ampiezza: la sopportabilità di cicli di scarica profonda deve quindi essere significativamente aumentata per aumentare l'autonomia dei veicoli elettrici e plug-in.
- Durata, aspettativa di vita ed altri aspetti: esistono una gran varietà di ulteriori aspetti che devono essere migliorati per le batterie. Non sono quelli appena citati, ma anche sensibilità alla temperatura, durata dei processi ricarica, costi di produzione.



Source: Johnson Control – SAFT 2005 and 2007.

**KEY POINT:** Among battery technologies, lithium-ion batteries have a clear edge over other approaches when optimised for both energy and power density.

Figura 4 – Confronto tra diverse tipologie di accumulo elettrico

La figura mostra un confronto generale tra i possibili sistemi di accumulo elettrico in termini di Potenza ed energia specifiche (x unità di massa) al variare della chimica fondante della cella elettrochimica elementare. Sebbene ci sia chiaramente una correlazione inversa tra le due prestazioni, allo stato attuale di sviluppo le batterie litio sembrano avere un chiaro vantaggio prestazionale rispetto a molti dei prodotti concorrenti nella maggior parte dei range richiesti dalle possibili applicazioni.

All'interno della famiglia di prodotto delle batterie litio, ad ogni modo, esistono una certa varietà di sottoprodotti, caratterizzati da una diversa chimica di cella elettrolitica, così come dettagliato dalla seguente tabella. La tabella si limita alle chimiche principalmente utilizzate, che saranno oggetto delle applicazioni di breve periodo. E' da ritenersi, ad ogni modo, che i problemi tecnologici sopra evidenziati saranno superabili con l'adozione di chimiche di cella modificate che riescano ad integrare gli aspetti positivi delle tecnologie fin qui in esercizio.

	Lithium cobalt oxide (LiCoO <sub>2</sub> )	Nickel, cobalt and aluminum (NCA)	Nickel-manganese-cobalt (NMC)	Lithium polymer (LiMn <sub>2</sub> O <sub>4</sub> )	Lithium iron phosphate (LiFePO <sub>4</sub> )
Energy Wh/kg or L	Good	Good	Good	Average	Poor
Power	Good	Good	Good	Good	Average (lower V)
Low T	Good	Good	Good	Good	Average
Calendar life	Average	Very Good (if charge at 4.0 V)	Good	Poor	Poor above 30°C
Cycle life	Average	Very good (if charge at 4.0 V)	Good	Average	Average
Safety*	Poor	Poor	Poor	Average	Good
Cost/kWh	Higher	High	High	High	High
Maturity	High	High	High	High	Low

Source: Guibert, Anne de (2009), "Batteries and supercapacitor cells for the fully electric vehicle", Saft Groupe SA.

Tabella 2 – Confronto tra tecnologie di batterie diverse per tipo di chimica

Data l'importanza del componente, la maggior parte delle case costruttrici di veicoli hanno annunciato partnership con le case costruttrici di batterie detentrici dei principali brevetti. Queste partnership aiutano i gruppi a difendere la loro posizione di mercato in vista della transizione al mercato della trazione elettrica e forniscono un grande impulso alle case costruttrici verso il raggiungimento di una maggiore qualità ed affidabilità dei propri prodotti.

La seguente tabella riporta a titolo esemplificativo i maggiori accordi ad oggi siglati tra le case costruttrici. E' da rimarcarsi inoltre, come ogni casa automobilistica ha già delineato un proprio programma di immissione sul mercato di veicoli a trazione elettrica. I numeri che si delineano, seppur non ancora in accordo con lo scenario sopra definito, sono molto rilevanti e definiscono di fatto l'avvio della transizione del settore dei trasporti verso l'elettrificazione.

Car manufacturer	Announced/reported production/sales targets	Battery manufactures (may contains development partners and former partnership)
Daimler	10 000 in 2013 (5)	Johnson Controls-Saft (JCS), Sanyo, SK Innovation, Li-Tec Battery
Fisker	50 000 in 2013 (1) 85 000 in 2014	A123 Systems
Ford	18 000 in 2012 21 000 in 2013	LGChem, JCS, MAGNA E-Car Systems, Toshiba, Sanyo
General Motors	120 000 in 2012 (1)	LG Chem, JCS
Mitsubishi	40 000 in 2012 (2) 5% in 2015 20% in 2020	GS Yuasa Corporation, Lithium Energy Japan, Toshiba
Nissan	50 000 in 2010 in Japan 150 000 in 2012 in United States 50 000 in 2013 in United Kingdom	AESC
PSA	40 000 in 2014 (4)	Lithium Energy Japan, GS Yuasa, JCS
Renault	250 000 in 2013	AESC, LG Chem, SB Limotive (SBL)
Tesla	10 000 in 2013 (1) 20 000 in 2014	Panasonic Energy Company
Think	10 000 in 2013 (1) 20 000 in 2014	A123 Systems, Enerdel, FZ Sonick
Volkswagen	3% in 2018 (3)	Sanyo, Toshiba, SBL, Varta Microbattery
BMW		SBL, E-One Moli Energy
BYD Auto		BYD group
Chrysler-Fiat		SBL, LG Chem
Coda Automotive		Coda Battery Systems
Hyundai		LG Chem, SBL, HL Green Power, SK Innovation
SAIC		JCS
Magna		GS Yuasa Corporation
Subaru		AESC
Suzuki		Sanyo
Tata		Electrovaya, EIG
Toyota		Primearth EV Energy, Sanyo
Volvo		EnerDel, LG Chem

(1) [www.energy.gov/media/1\\_Million\\_Electric\\_Vehicle\\_Report\\_Final.pdf](http://www.energy.gov/media/1_Million_Electric_Vehicle_Report_Final.pdf).

(2) [www.mitsubishi-motors.com/publish/presrelease\\_en/corporate/2011/news/detail0771.html](http://www.mitsubishi-motors.com/publish/presrelease_en/corporate/2011/news/detail0771.html).

(3) [www.treehugger.com/files/2010/03/volkswagen-plans-sell-300000-electric-cars-year-2018.php](http://www.treehugger.com/files/2010/03/volkswagen-plans-sell-300000-electric-cars-year-2018.php).

(4) [www.ft.com/cms/s/0/3a4324f4-4353-11e0-aef2-00144feabdc0.html#axzz1FLb87Cdl](http://www.ft.com/cms/s/0/3a4324f4-4353-11e0-aef2-00144feabdc0.html#axzz1FLb87Cdl).

(5) [www.bloomberg.com/apps/news?pid=20601100&sid=aT\\_u.Q57Y4tg](http://www.bloomberg.com/apps/news?pid=20601100&sid=aT_u.Q57Y4tg).

(6) <http://gm-volt.com/2011/04/15/lg-chem-opens-oc-hong-battery-plant-expects-major-market-share/>.

Sources: Various, updated by IEA May 2010.

Tabella 3 – Principali accordi commerciali e programmatici tra produttori auto e produttori di batterie

## Acquisizioni sperimentali caratteristiche di ricarica di batterie litio

Nell'ultimo anno di lavoro, nell'ambito del presente accordo quadro, l'ENEA ha effettuato numerose attività di ricerca per quanto riguarda i sistemi di accumulo al litio, sia per applicazioni veicolari che per applicazioni stazionarie. In questo report si relaziona unicamente sulle attività che riguardano la ricarica rapida degli accumuli litio che potrebbero essere finalizzati alla trazione elettrica di piccole vetture, in ossequio al piano di attività concordato con il Ministero ed armonizzato insieme agli altri enti coinvolti.

Nei paragrafi che seguono, pertanto, saranno brevemente analizzate le metodologie utilizzate per la determinazione delle caratteristiche elettriche di base delle batterie e, riferendoci ad esse, saranno determinate le loro proprietà elettriche.

Le misurazioni saranno finalizzate alla definizione dei parametri reali del sistema di accumulo da realizzare a bordo del prototipo ibrido od elettrico, secondo quanto prescritto dai principali protocollo di prova attualmente in essere.

L'obbiettivo è stato quello di mettere a confronto il comportamento di due diverse tecnologie, tra le più promettenti, in quanto a bilancio costo-prestazioni attese, per le applicazioni in esame, in modo da osservare i vantaggi e gli svantaggi derivanti dall'impiego di ognuna di esse al variare di alcuni parametri rilevanti.

La campagna di prove è stata svolta nel laboratorio della sezione UTTEI-VEBIM (Unità Tecnica Tecnologie per l'Energia e l'Industria – Laboratorio Veicoli a Basso Impatto Ambientale) dell'ENEA, presso il Centro Ricerche Casaccia di Roma.

### Descrizione delle batterie in prova

#### Batteria Kokam

L'accumulatore elettrochimico preso in considerazione è un modulo contenente 6 celle Kokam (modello SLPB 78216216H) di tipo High Power litio-ione di tensione nominale pari a 22.7 V. Le caratteristiche tecniche dichiarate nel datasheet del costruttore sono riassunte di seguito.

Alcuni dati definiti in tabella non sono presenti nel datasheet ma sono stati preliminarmente ricavati attraverso i seguenti calcoli:

- L'energia immagazzinata è stata calcolata dalla quantità di carica da essa fornita moltiplicata per la tensione media nel tempo calcolata durante un processo di scarica a corrente costante:  $E = \bar{V}Q_{tot}$ .
- Si è considerata come tensione media quella nominale di 3.7 V e il valore di carica totale pari alla capacità nominale;
- La potenza di picco in carica/scarica è stata calcolata considerando la corrente di picco che la batteria può assorbire o erogare moltiplicata per la tensione nominale; mentre la potenza massima in carica/scarica è ricavata dal prodotto della massima corrente continua in carica/scarica per la tensione nominale;
- Il volume è stato misurato in laboratorio;



Figura 5 – Modulo e cella Kokam

<b>Produttore</b>	KOKAM
<b>Modello</b>	SLPB 78216216H
<b>Tensione nominale (V)</b>	3.7
<b>Cut-off (V)</b>	2.7
<b>Tensione massima (V)</b>	4.2 ± 0.03
<b>Capacità nominale [0.5 C, 25 °C, range 4.2 V - 2.7 V]</b>	31 Ah
<b>Costo (\$ USA)</b>	160.58
<b>Massa (kg)</b>	0.860 ± 0.040
<b>Volume(dm<sup>3</sup>)</b>	0.39732
<b>Energia immagazzinata (kJ)</b>	412.92
<b>Densità energetica (Wh/l)</b>	288.68
<b>Energia specifica (Wh/kg)</b>	133.37
<b>Temperature funzionamento carica (°C)</b>	0 < T < +40
<b>Temperature funzionamento scarica(°C)</b>	-20 < T < +60
<b>Numero di cicli di vita [80% DOD; voltage range: 4.15 V - 3.4 V]</b>	> 800
<b>Massima corrente continua di carica (A)</b>	62 (2 C)
<b>Potenza massima in corrente continua di carica (kW)</b>	0.229
<b>Massima corrente continua di scarica (A)</b>	155 (5 C)
<b>Potenza massima in corrente continua di scarica (kW)</b>	0.573
<b>Corrente di picco carica/scarica (A)</b>	310 (10 C)
<b>Potenza di picco carica/scarica (kW)</b>	1.147
<b>Densità di potenza di picco carica/ scarica (kW/l)</b>	2.886
<b>Potenza specifica di picco carica/scarica (kW/kg)</b>	1.337
<b>Forma</b>	Parallelepipedo
<b>Lunghezza (mm)</b>	215 ± 2.0
<b>Altezza (mm)</b>	220 ± 2.0
<b>Spessore (mm)</b>	8.4 ± 0.5

Tabella 4- Caratteristiche dichiarate per la singola cella Kokam

## Batteria Thunder Sky

Le batterie Thunder Sky si differenziano dalle precedenti principalmente per il fatto che il sale di litio è sciolto in un solvente organico anziché in una matrice polimerica. Con questa tecnologia il volume e il peso sono molto maggiori e l'energia e le potenze specifiche risultano essere più basse, ma presentano il vantaggio di avere un numero di cicli vita maggiore. Anche in questo caso i dati forniti dai datasheet non sono completi e i valori calcolati in tabella sono stati ricavati come sopra per le Kokam.



Figura 6 – Modulo Litio-ione della Thunder-sky

<b>Produttore</b>	THUNDER SKY
<b>Modello</b>	TS-LFP40AHA
<b>Tensione nominale (V)</b>	3.2
<b>Cut-off (V)</b>	2.5
<b>Tensione massima (V)</b>	4.25
<b>Capacità nominale [0.5 C, 25 °C, range 4.2 V - 2.7 V]</b>	40 Ah
<b>Costo (\$ USA)</b>	45
<b>Massa (kg)</b>	1.6 ± 0.1
<b>Volume(dm<sup>3</sup>)</b>	0.9315
<b>Energia immagazzinata (kJ)</b>	460.8
<b>Densità energetica (Wh/l)</b>	137.41
<b>Energia specifica (Wh/kg)</b>	80
<b>Temperature funzionamento carica (°C)</b>	-25<T<+75
<b>Temperature funzionamento scarica(°C)</b>	-25<T<+75
<b>Numero di cicli di vita [80% DOD]</b>	> 2000
<b>Numero di cicli di vita [70% DOD]</b>	> 3000
<b>Massima corrente continua di carica (A)</b>	120 (3 C)
<b>Potenza massima in corrente continua di carica (kW)</b>	0.384
<b>Massima corrente continua di scarica (A)</b>	120 (3 C)
<b>Potenza massima in corrente continua di scarica (kW)</b>	0.384
<b>Corrente di picco carica/scarica (A)</b>	400 (10 C)
<b>Potenza di picco carica/scarica (kW)</b>	1.280
<b>Densità di potenza di picco carica/ scarica (kW/l)</b>	1.374
<b>Potenza specifica di picco carica/scarica (kW/kg)</b>	0.8
<b>Autoscarica</b>	≤ 3 %
<b>Forma</b>	Parallelepipedo
<b>Lunghezza (mm)</b>	115 ± 1.0
<b>Altezza (mm)</b>	180 ± 1.0
<b>Spessore (mm)</b>	45 ± 1.0

Tabella 5 – Caratteristiche dichiarate per la singola cella Thunder-sky

## **Osservazioni datasheets Kokam-Thunder Sky**

I dati presenti nelle tabelle sopra mostrano con chiarezza quelle che sono le caratteristiche peculiari dei due esemplari di batterie a litio prese in considerazione.

Si evidenzia il costo più di tre volte maggiore della batteria Kokam, costo che però definisce anche una migliore qualità ed efficienza del sistema.

Gli intervalli di tensione sono quelli comuni ai due tipi di cella: la cella Kokam ha un intervallo più ristretto (2.7 V – 4.2 V) rispetto alla Thunder-sky (2.5 V – 4.25 V) ma presenta una tensione nominale maggiore (3.7 contro 3.2): ciò favorisce un maggior contenuto energetico e di potenza a parità di corrente di scarica.

La Thunder-sky presenta una capacità superiore (40 Ah contro i 31 Ah della Kokam). Le batterie hanno lo stesso rate di corrente di scarica (10 C corrente di picco, 3 C corrente continua) mentre si differenziano sul rate di corrente di carica (2 C corrente continua per Kokam contro i 3 C corrente continua della Thunder-sky).

In termini di massa la Thunder-sky ha un peso 1.86 volte maggiore, valore che influisce negativamente nei termini di energia specifica (133.37 Wh/kg Kokam > 80 Wh/kg Thunder-sky) e potenza specifica di picco (1.374 kW/kg Kokam > 800 kW/kg Thunder-sky).

Il confronto dell'ingombro è ancora più eclatante in quanto si osserva che il volume della Thunder-sky è fino a 2.55 volte più piccolo, influenzando positivamente in termini di densità energetica (288.6 Wh/l Kokam > 137.41 Wh/l Thunder-sky) e di densità di potenza di picco (2.886 kW/kg Kokam > 1.344 kW/kg Thunder-sky).

Tali parametri risultano essere maggiori nonostante la capacità del Thunder-sky sia più elevata, caratteristica che porta ad ottenere, dato gli stessi C rate di scarica, una potenza di picco ed un'energia immagazzinabile maggiore per le Thunder-sky (P=1.280 kW Thunder-sky > 1.147 kW Kokam, E=460.8 kJ Thunder-sky > 412.92 kJ Kokam). I valori appena descritti sono molto vicini per il fatto che la tensione nominale della Kokam è di 0.5 V maggiore (3.7 V contro 3.2 V).

La Thunder-sky però consente un intervallo di temperatura di funzionamento più elevato rispetto alla Kokam sia in carica che in scarica con range che va da -25 °C e 75 °C, mentre le Kokam non possono essere ricaricate al di sotto dei 0 °C e al di sopra dei 40 °C e devono essere scaricate nel range -20 °C e 60 °C. La Kokam ha bisogno di essere conservata a temperatura non troppo alte per rallentare la degradazione nel tempo.

Il numero di cicli vita che portano la capacità di carica al 80 % sono inoltre 2.5 volte maggiori per le Thunder Sky (2000 cicli circa), numeri che non permettono la realizzazione di entrambe le tecnologie su applicazioni che richiedono molti cicli completi al giorno.

La vita di entrambe le batterie dipende dal tempo trascorso dopo la fabbricazione, con un notevole decadimento delle prestazioni dopo 2-3 anni. Esse vengono quindi fabbricate al momento dell'ordinazione, evitando inutili tempi di attesa in magazzino. I prezzi delle batterie non sono fissi ma diminuiscono al crescere della quantità degli elementi che vengono richiesti, secondo una legge di economia di scala.

## **Descrizione della stazione di prova**

### **Principali elementi della catena di misura**

- 1 generatore di corrente continua HP6682A della Hewlett Packard con alimentazione trifase avente una potenza nominale di 5000 W, in grado di erogare una corrente fino a 240 A con una tensione fino a 21 V. La regolazione della tensione e della corrente viene effettuata attraverso un voltmetro e un amperometro interni alla macchina, aventi una risoluzione rispettivamente di 1 mV e di 1 mA;

- 1 carico elettrico regolabile HP 6050A della Hewlett Packard, dotato di tre canali in grado di assorbire 600 W ognuno, dissipando l'energia in calore attraverso resistenze variabili. La macchina è in grado di lavorare a un regime di corrente assorbita costante, regolando il proprio funzionamento sulla base dei dati forniti da un voltmetro e un amperometro interni, aventi una risoluzione di 1 mV e di 1 mA. Ognuno dei tre canali può lavorare autonomamente dagli altri, con correnti comprese tra 0 e 120 A e tensioni comprese fra 2 e 60 V, rispettando però il limite di 600 W di potenza massima, con la possibilità di lavorare in sovrappotenza per 5 secondi. Si è riscontrato all'accensione della macchina che uno dei tre canali era guasto;
- 1 camera climatica Angelantoni Challenge 250 con una capacità di 224 litri, in grado di mantenere al suo interno una temperatura compresa fra -40 e +180 °C, con una velocità di riscaldamento di 5 °C/min e di raffreddamento di 3,5 °C/min, e una precisione di temperatura di ±0,3 °C;
- 1 blocco connettore SCB-68 della National Instruments per dispositivi di acquisizione dati (DAQ), con connettori a 68 pin, che ha il compito di ricevere i segnali provenienti dai trasduttori di tensione, di corrente e di temperatura, di manipolarli e di trasmetterli al computer;
- 1 PC HP Vectra con processore Intel Pentium II 266 MHz e 128 Mb di memoria RAM, dotato del Software di calcolo *Labview, graphical programming for instrumentation, version 4.0.1* della National Instruments;
- 1 scheda NI AT-MIO-16XE-10 della National Instruments con 16 input analogici a 16 bit per dispositivi di acquisizione dati, con una frequenza di campionamento di 100 kS/s, installata nel computer e in grado di ricevere in ingresso dati dal blocco SCB-68 e di dialogare con il software Labview;
- 1 termistore Honeywell 192-102DET-A01 per misurare la temperatura superficiale del sistema di accumulo, con resistenza nominale di 1000 Ω a 25 °C e campo di funzionamento da -60 °C a 150 °C;
- 1 Sonda di corrente a effetto Hall HT 200-SBD della LEM, in grado di misurare correnti fino a 200 A con un'incertezza massima dell'1%. La sonda interagisce con l'esterno attraverso 5 conduttori, due dei quali trasmettono il segnale della misura in uscita sotto forma di tensione e gli altri tre necessari per l'alimentazione del componente. La sonda per funzionare ha bisogno infatti di tre valori di tensione in ingresso, pari a 0 V e ±15 V;
- 1 Generatore di corrente continua a doppio output GPC-3030D della Instek con due unità di generazione, ognuna delle quali è in grado di erogare al massimo 30V e 3A con una tolleranza sul livello di tensione indicato dello 0.01% + 3mV. Esso viene utilizzato per alimentare la sonda di corrente;
- 1 Wattmetro delle Yokogawa modello WT1030M con quattro display di visualizzazione delle grandezze corrente e tensione istante per istante; inoltre effettua il calcolo dell'energia immagazzinata o erogata oltre a quello della capacità. Il range di funzionamento è di 600 V max e 20 A max.
- 1 Ciclatore di batterie marca ELTRA modello E-8376 con range di funzionamento voltaggio 0-330 V e corrente 0-400 A. È stato utilizzato per effettuare le prove con le correnti di picco delle due batterie.
- 1 diodo dotato di alette di raffreddamento, necessario a garantire che non ci siano correnti di ritorno al generatore;
- 1 Termometro a mercurio per il controllo delle temperature;
- Cablaggio necessario per collegare i componenti fra loro;
- Energia elettrica da rete (230/400 V e 50 Hz) in regime trifase per la camera climatica e per il generatore HP 6682A e monofase a 230 V per gli altri componenti;

- 1 bilancia di precisione Gibertini 64444 TMB, con risoluzione di 1g, impiegata per la determinazione della massa dei due sistemi di accumulo.



Figura 7 – Principali elementi della catena di misura

Gli intervalli di tensione richiesti per le prove sui modulo agli ioni di litio appartengono allo stesso ordine di grandezza e rientrano all'interno del range di funzionamento delle apparecchiature presenti in laboratorio. Anche l'intensità delle correnti con cui sono state effettuate le prove è simile tra i due componenti, pertanto è stato possibile svolgere le acquisizioni su di essi con la stessa strumentazione e configurazione. Precisamente per le correnti al di sopra dei 100 A si è fatto ricorso all'utilizzo del ciclatore, mentre per correnti più basse si sono utilizzati tutti gli strumenti precedentemente illustrati con la disposizione evidenziata nella figura seguente.

L'accumulatore viene sistemato durante tutte le acquisizioni di dati nella camera climatica. Il passaggio dei cavi che trasportano tra l'interno e l'esterno dell'ambiente a temperatura controllata le correnti di carica e scarica e i segnali di misura avviene attraverso un foro sulla parete laterale della camera climatica, e gli spiragli d'aria vengono sigillati attraverso un apposito tappo in materiale gommoso.

I circuiti elettrici necessari per le prove possono essere pensati come suddivisi in due sistemi distinti: uno funzionale all'acquisizione e alla trasmissione dei dati e l'altro necessario per fornire o prelevare energia all'accumulatore. Quest'ultimo circuito è caratterizzato da una configurazione parallelo fra la macchina di generazione, quella di carico e l'accumulatore, effettuata tramite cavi corti e di larga sezione. Ciò viene realizzato semplicemente collegando fra loro tutti i morsetti positivi e, separatamente, tutti quelli negativi, come illustrato nella parte inferiore della figura sotto. In tal modo è possibile utilizzare alternativamente il generatore e il carico per fornire o prelevare energia. Il conduttore che parte dal morsetto positivo del generatore viene messo in serie a un diodo posto nel verso appropriato per fare in modo che la corrente possa uscire dal generatore ma non vi possa entrare quando esso è disattivato.



che sono le tensioni che la sonda di corrente richiede sui conduttori di alimentazione. Sia il segnale di corrente che quello di tensione è collegato al Wattmetro che ne visualizza i valori ed istante per istante calcola la capacità e l'energia. Il blocco SCB-68 acquisisce i dati e li trasmette attraverso un bus alla scheda NI AT-MIO-16XE-10 installata all'interno dello chassis del computer.

I dati vengono elaborati e registrati attraverso un programma implementato in *Labview*, che consente di acquisire i segnali che arrivano alla scheda e di elaborarli, al fine di poter visualizzare i quattro parametri di nostro interesse, ossia corrente, tensione, temperatura e tempo. Questo programma è anche in grado di mettere su grafico i dati acquisiti, per poterli controllare in tempo reale, e di registrarli su foglio elettronico. Il programma in questione è stato realizzato dai ricercatori ENEA appositamente per il sistema di acquisizione in uso. Esso presenta un'interfaccia grafica intuitiva e ben strutturata, illustrata in figura, che mostra i grafici della tensione, della corrente e della temperatura in funzione del tempo. Attraverso un comando è possibile configurare manualmente l'area di visualizzazione dei grafici per osservare le curve che il programma traccia nella scala che si desidera; essa viene altrimenti stabilita in modo automatico. I principali valori di ingresso per il software sono:

- Il fattore moltiplicativo della tensione, che è pari al rapporto di riduzione del sistema di resistenze che è stato utilizzato per diminuire la tensione.
- La frequenza desiderata per l'acquisizione dei dati, fornita in scansioni al secondo (S/s).
- Il parametro additivo di offset per la taratura del segnale di corrente.
- Il parametro moltiplicativo di gain per la taratura del segnale di corrente.
- Il percorso tra le periferiche del computer dove registrare, se lo si desidera, il file contenente il foglio elettronico delle misure.

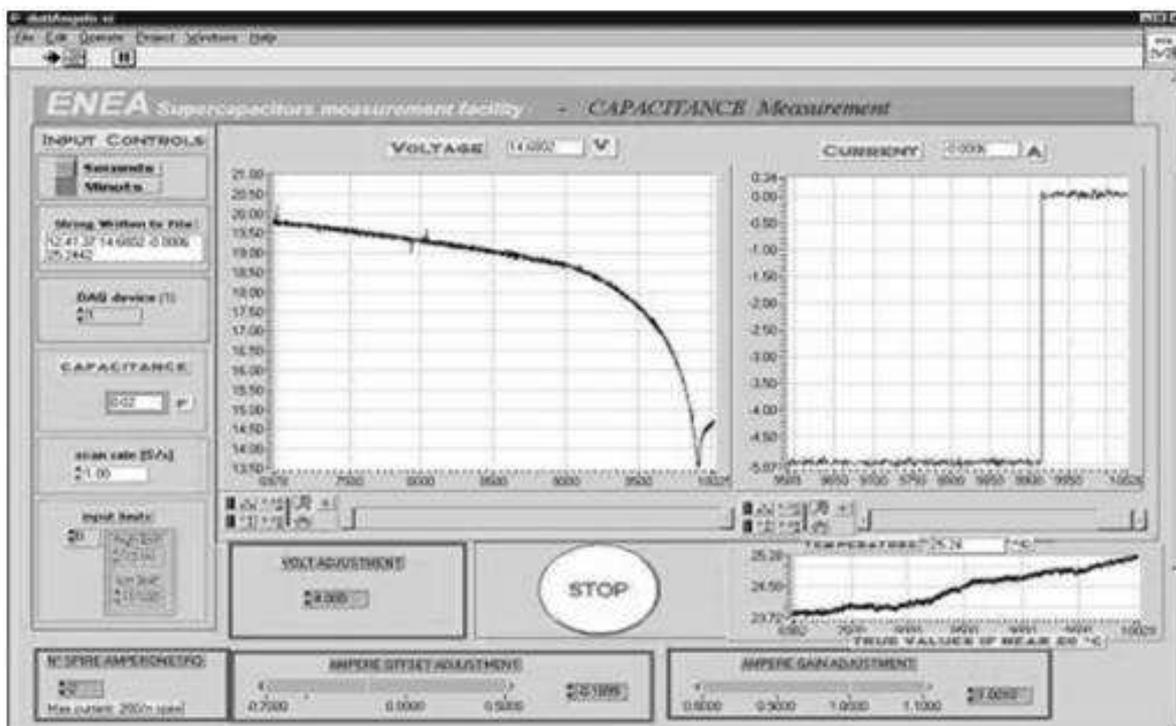


Figura 9 – Interfaccia grafica del software implementato per l'elaborazione e la registrazione dei dati

Il programma è stato implementato in ambiente *Labview* utilizzando una struttura a blocchi simile a quella del noto software *Simulink*. In questo programma sono stati inseriti tutti i parametri dei sistemi utilizzati per la misurazione e per la trasmissione dei dati. Un algoritmo

sfrutta questi parametri per convertire i dati in ingresso nelle misure vere e proprie e per registrare queste ultime nelle condizioni imposte dall'utente attraverso l'interfaccia grafica.

### **Metodologia utilizzata**

Le procedure sono finalizzate alla determinazione delle caratteristiche e del comportamento delle batterie nel campo degli alti valori di potenza richiesti dai cicli di marcia, come ad esempio nelle accelerazioni e nelle salite del veicolo, e si rifanno alla letteratura tecnica sull'argomento e nello specifico alla metodologia EUCAR "*Specification of test procedures for hybrid electric vehicle traction batteries*" per la determinazione dei parametri di base che caratterizzano il comportamento.

Una volta noti i parametri costruttivi del componente in prova, al fine di rispettarne i limiti per non danneggiare la cella, i parametri che verranno registrati sono la corrente continua che l'attraversa, la tensione continua a cui è sottoposta, il tempo e la temperatura di esecuzione delle prove. Per effettuare tale misurazione si è sistemato il componente nella camera climatica Angeloni e seguendo normativa EUCAR si sono fatte le acquisizioni a temperatura ambiente, a 0 °C e a 40 °C.

Il termistore è stato messo a contatto con la struttura esterna del componente in un punto ad esso centrale. Ogni volta che è stata fatta una prova ad una certa temperatura, si è avuta l'accortezza di lasciar giacere la batteria alla stessa temperatura per le precedenti 12 ore, al fine di correggere possibili errori sistematici dovuti all'inerzia termica del componente.

Inizialmente la batteria è stata sottoposta a vari cicli di rodaggio in modo da essere sicuri che si sia realizzato una adeguata stabilizzazione della stessa. La batteria è stata considerata "*creata*", in accordo con le procedure EUCAR, quando la capacità di scarica durante due consecutive scariche non varia più del 3 % tra valori ottenuti.

Inoltre prima di ogni prova è stato effettuato sulla cella un Ciclo Standard, consistente nella scarica a C/2, nella pausa di 1 h e nella successiva ricarica a C/2, per portare la cella alle stesse condizioni iniziali per ogni prova effettuata e ridurre gli errori.

Di seguito si riportano tutte le misure effettuate separatamente per la batteria Kokam e Thunser Sky e in appendice C tutte le tabelle, presenti nelle procedure EUCAR, compilate dei valori reali riscontrati durante le prove per entrambe le batterie.

### **Determinazione della capacità**

La capacità è il parametro di riferimento dello stato di attività della cella ed un cambiamento, rispetto ai dati di fabbrica, da importanti informazioni riguardo alla disponibilità di energia e all'invecchiamento delle celle. Nel caso di un pacco di batterie le capacità delle celle dovrebbero essere simili, per evitare un comportamento non uniforme, che comporterebbe una distribuzione non omogenea della tensione in ogni cella con diminuzione delle prestazioni del pacco.

La rilevazione della capacità  $C_x$  è stata effettuata secondo quanto imposto dalla normativa *Eucar*. In ogni rilevazione il componente è stato sottoposto a un ciclo completo di carica e scarica in cui sono stati registrati con frequenza di 1 acquisizione al secondo i valori di tensione e corrente ai morsetti del componente.

La capacità è pari a:

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} I(t) dt$$

## Determinazione dell'energia

La quantità di energia accumulata nella batteria per unità di massa (o di volume) è strettamente collegata all'autonomia effettiva del veicolo ed è, di gran lunga, il fattore più limitante le prestazioni di un veicolo elettrico rispetto ad uno convenzionale a motore termico.

Infatti mentre un kg di benzina contiene oltre 12 kWh di energia, le batterie contengono decimi di kWh in un kg: per fornire un'accettabile autonomia, il peso delle batterie deve quindi costituire una parte consistente di tutto il peso del veicolo (25 % circa per un veicolo elettrico) con evidenti riflessi sul progetto del telaio e della componentistica di sicurezza (freni, sospensioni).

Le misurazioni di queste grandezze sono state effettuate con le medesime prove con le quali si sono effettuate le misure di capacità. Anche in questo caso la densità di energia e l'energia specifica non sono parametri assoluti, unicamente definiti da un numero, ma dipende dalla modalità (la corrente di scarica) e dalle condizioni (temperatura, vita della batteria) in cui l'energia viene erogata, esattamente come avviene per la capacità.

L'energia è calcolata attraverso il seguente integrale:

$$\Delta E = \int_{t_1}^{t_2} (V \cdot I) dt$$

Anche per l'energia è possibile definire il rendimento che è il rapporto tra la l'energia fornita durante la carica e quella che invece viene successivamente scaricata: il suo complemento ad uno definisce la frazione di energia che viene dissipata in perdite interne alla cella.

## Caratteristiche di carica-scarica a corrente costante

La ricarica delle batterie è certamente il maggiore ostacolo ad una larga diffusione dei veicoli ibridi: i lunghi tempi di ricarica e la necessità di adeguare infrastrutture per compiere tale operazione determinano comprensibili perplessità tra gli utilizzatori.

È quindi fondamentale per le batterie poter essere ricaricate alla massima corrente possibile per accorciare i tempi di tale operazione.

A tal proposito sono state effettuate in laboratorio ricariche della cella fino alla corrente massima definita sui datasheet e successiva scarica alla stessa intensità. Mentre la scarica è stata effettuata a corrente costante fino alla minima tensione di cut off, la carica si è effettuata a corrente costante fino al raggiungimento della tensione massima di soglia, dove mantenendo costante la tensione si è ridotta la corrente fino a valori di 0.5 A.

È evidente che durante la scarica tanto più grande è il valore della corrente tanto minore è sia la tensione media ottenuta che la capacità di scarica.

## KOKAM

Dal datasheet della cella risulta che la massima corrente continua di carica, che la cella è in grado di sopportare, è pari a 62 A (2 C): si è quindi effettuata una ricarica costante a correnti pari a 15.5 A (C/2), 31 A (1 C) e 62 A (2 C) ottenendo il seguente andamento della tensione in funzione della capacità.

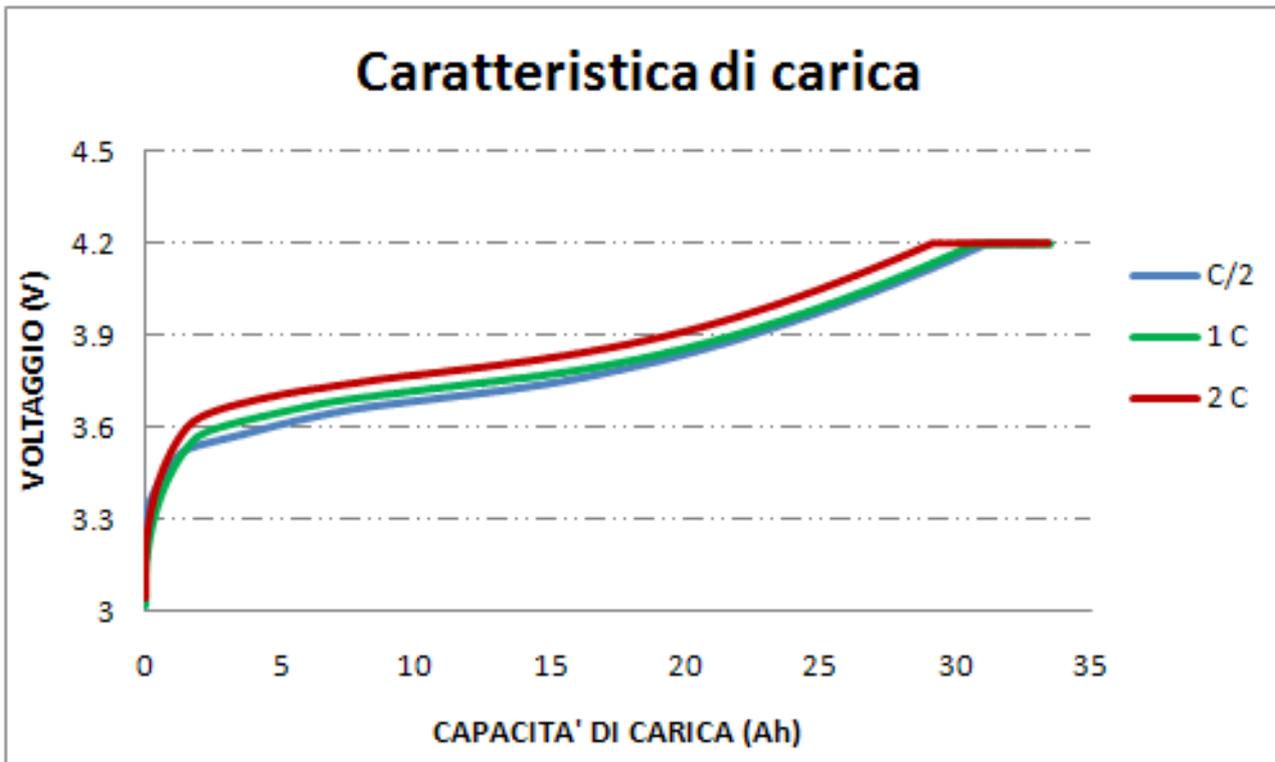


Figura 10 - Prove carica-scarica a corrente costante - Kokam - V vs Ah

Nel grafico seguente invece si evidenzia il tempo necessario per effettuare la carica a differenti correnti: si nota che giunti alla tensione massima la ricarica continua a tensione costante fino a quando, come detto sopra, la corrente non scende al valore di 0.5 A.

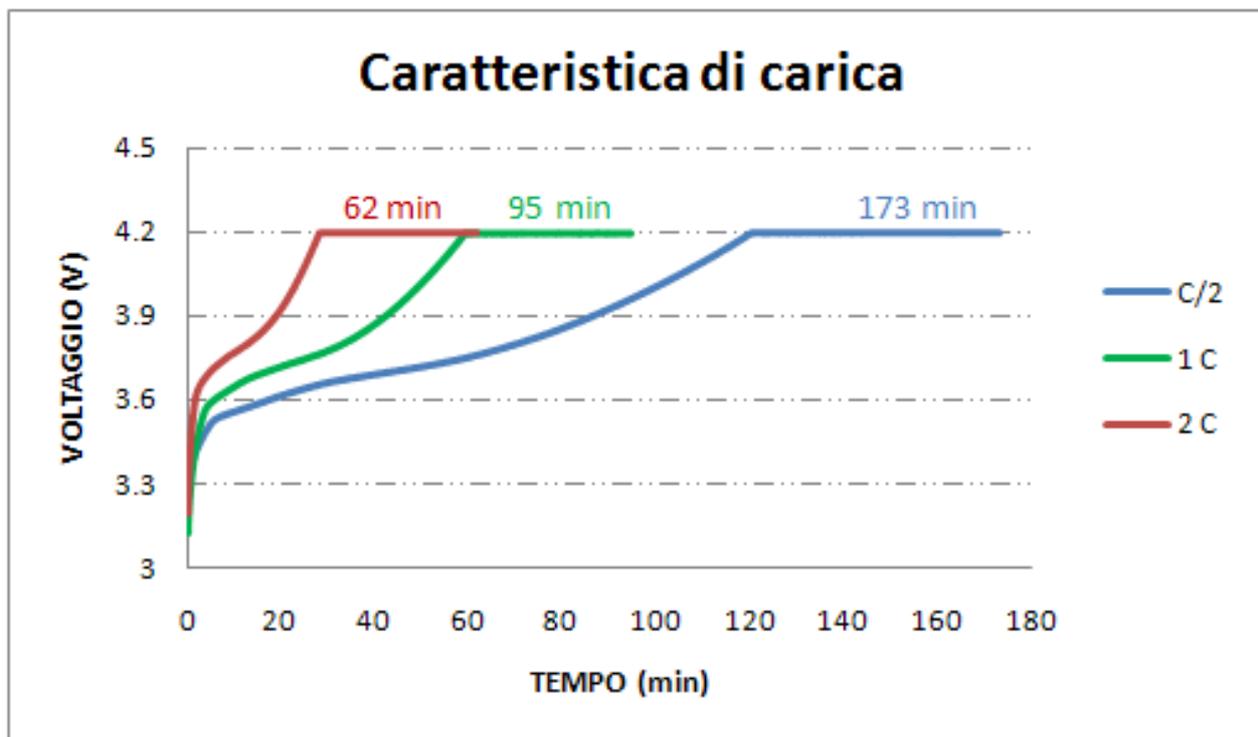


Figura 11 - Prove carica-scarica a corrente costante - Kokam - V vs t

Si riporta infine il diagramma, come esempio, il diagramma di carica-scarica a 1C in funzione della capacità e quindi in funzione dello stato di carica percentuale (SOC).

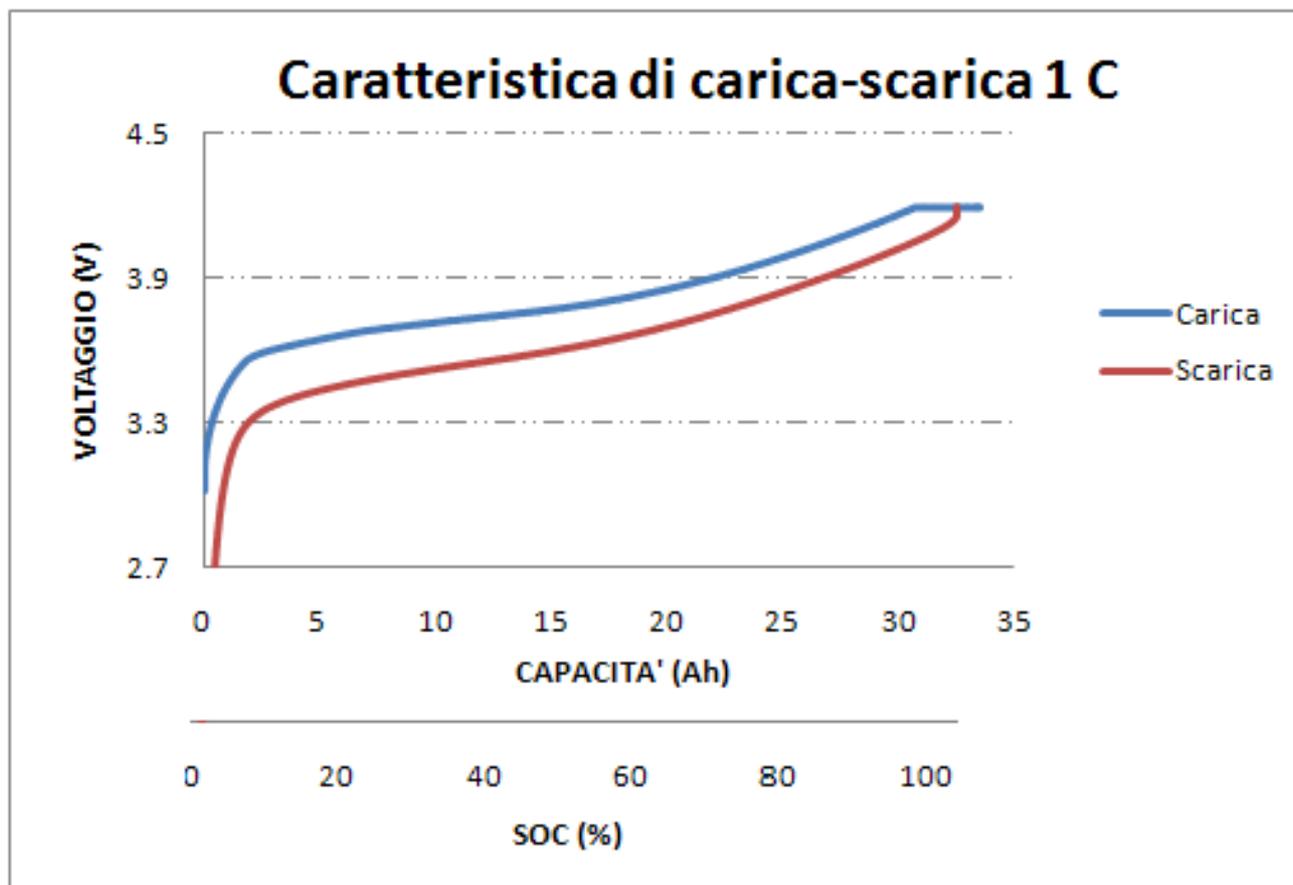


Figura 12 - Prove carica-scarica a corrente costante - Kokam - V vs SOC

La differenza tra le due curve definisce la differenza della capacità e dell'energia tra una carica e la successiva scarica, quindi il rendimento. Tale differenza risulta essere maggiormente evidente mano a mano che aumentano le correnti di carica-scarica.

Nella tabelle sottostanti si riportano i valori di capacità, energia e dei relativi rendimenti tra una carica-scarica effettuati a differenti correnti:

Corrente carica-scarica (A)	Capacità carica (Ah)	Capacità scarica (Ah)	Rendimento di carica (%)	Energia carica (Wh)	Energia scarica (Wh)	Rendimento energetico (%)
<b>15.5 (C/2)</b>	32.88	32.69	99.42	125.3	120.35	96.05
<b>31 (1 C)</b>	33.47	32.48	97.04	128.44	118.61	92.35
<b>62 (2 C)</b>	33.34	31.81	95.41	129.58	114.61	88.45

Tabella 6 - Prove carica-scarica a corrente costante - Kokam - Principali risultati

Si nota fin da subito che il rendimento di carica ed energetico a corrente 1 C sono diminuiti di poco rispetto ai valori ottenuti con corrente di carica C/2 riportati di sotto:

- Rendimento di carica: carica C/2 – scarica 1 C → 97.1 % (contro 97.04)
- Rendimento energetico: carica C/2 – scarica 1 C → 93.1 % (contro 92.35)

Ciò definisce un buon comportamento della cella, in termini di rendimento, a differenti correnti di carica.

## THUNDER SKY

La massima corrente di carica per questa tipologia di cella è invece pari a 120 A (3 C), le prove di carica-scarica si sono effettuate a 20 A (1 C), 40 A (2 C) e a 120 A (3 C) ottenendo il seguente andamento della tensione in funzione della capacità.

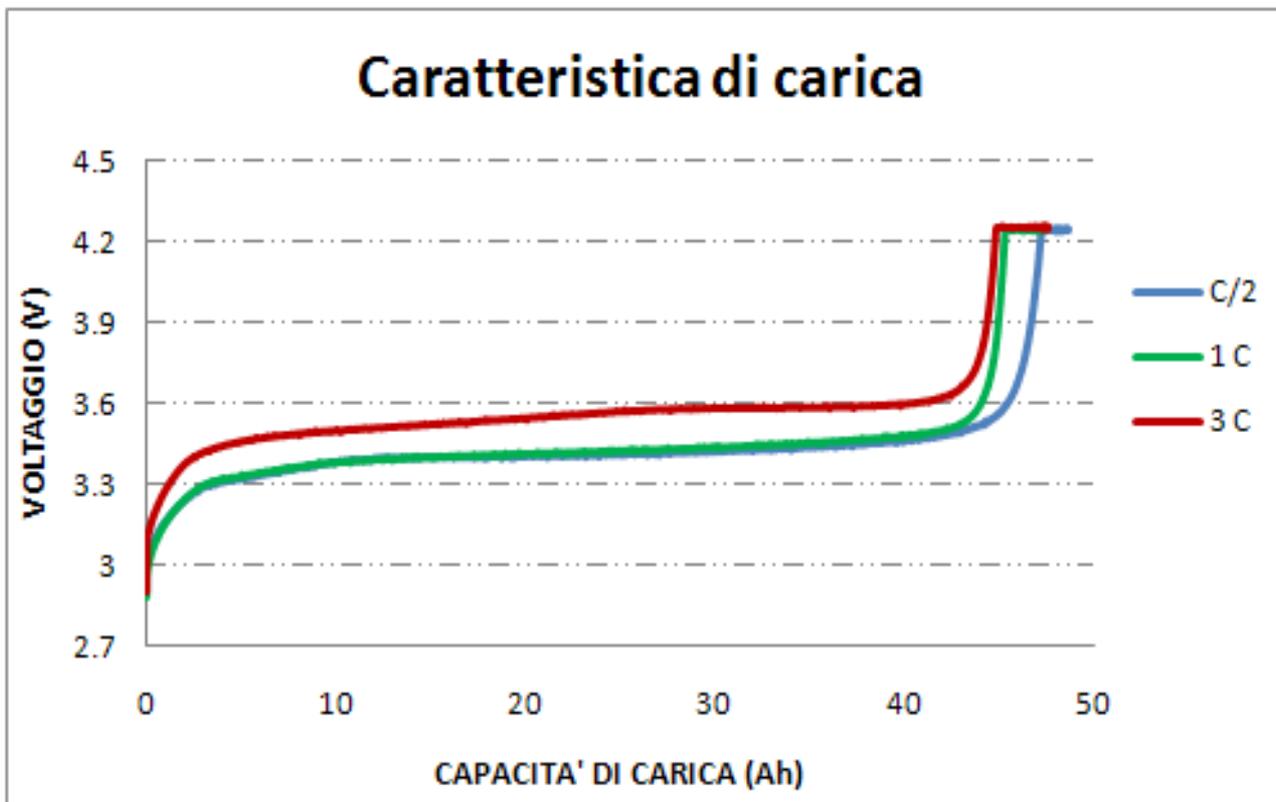


Figura 13 – Prove carica-scarica a corrente costante – Thunder-Sky – V vs Ah

Come per la Kokam anche per la Thunder Sky si riportano le caratteristiche di carica alle varie correnti fino a quella ammissibile.

Come in precedenza, per la caratteristica carica-scarica a corrente di 40 A (1C) è riportata anche la figura che descrive il processo al variare dello stato di carica percentuale (SOC).

Si nota la più elevata variazione di tensione durante la stabilizzazione (1 ora tra la carica e scarica) rispetto alla Kokam e la più accentuata differenza tra le curve che definiscono i rendimenti energetici e di carica molto più bassi come mostrato nella seguente tabella.

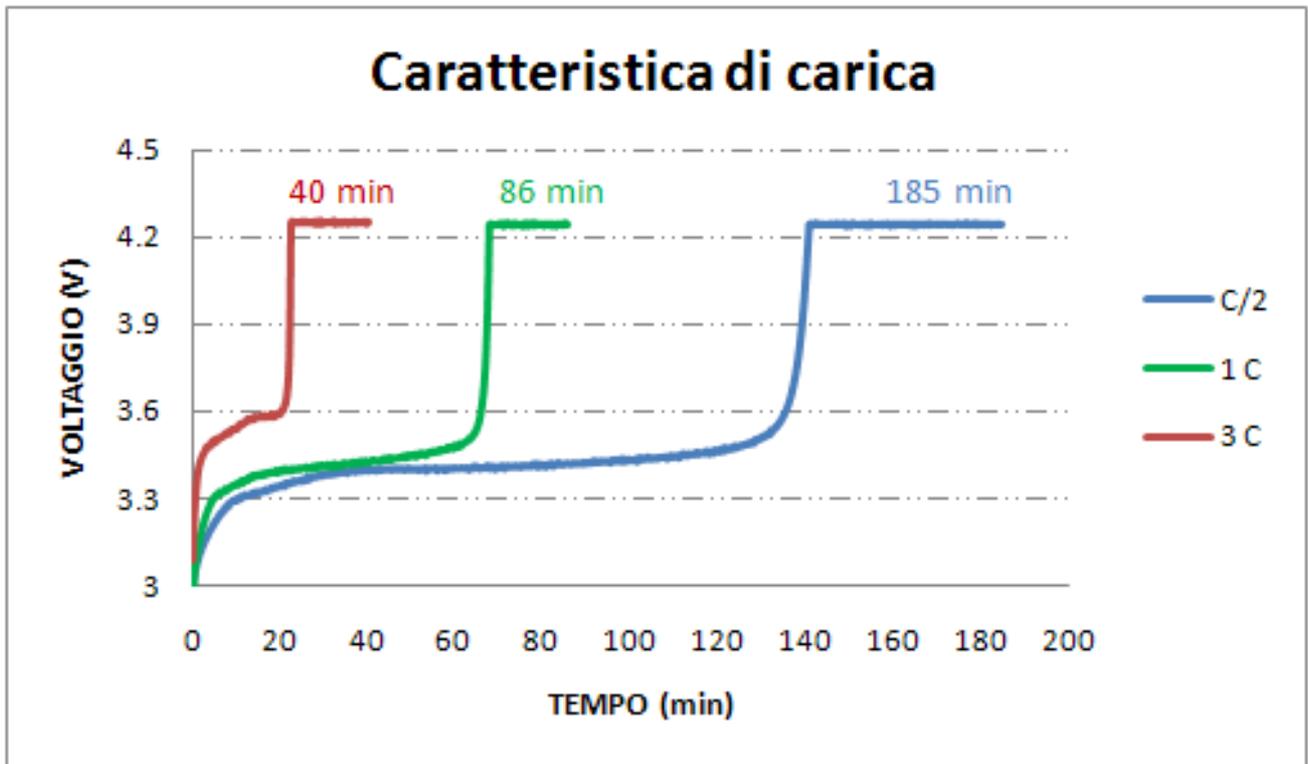


Figura 14 - Prove carica-scarica a corrente costante - Thunder-Sky - V vs t

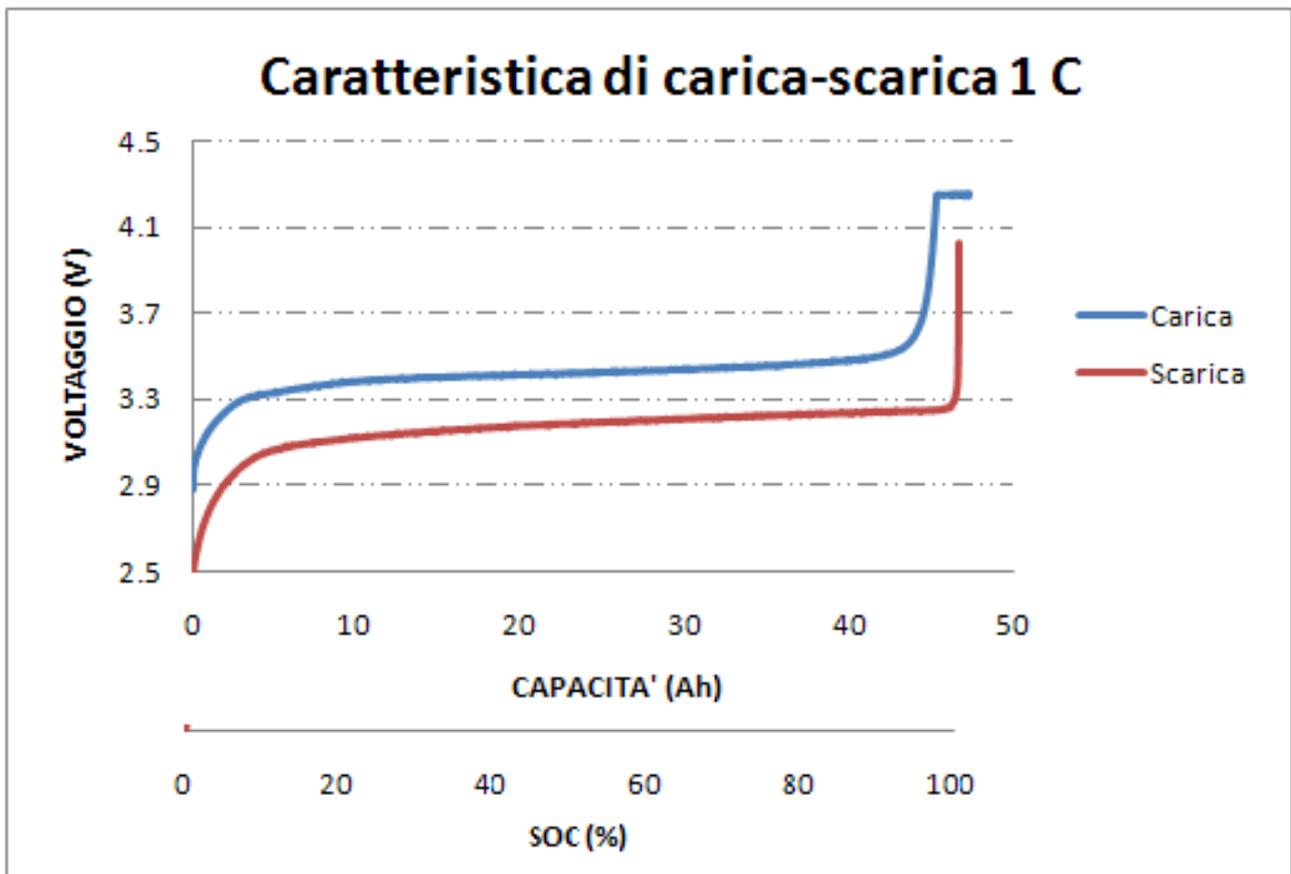


Figura 15 - Prove carica-scarica a corrente costante - Thunder-Sky - V vs SOC

CorrenteCarica-scarica (A)	Capacità carica (Ah)	Capacità scarica (Ah)	Rendimento di carica (%)	Energia carica (Wh)	Energia scarica (Wh)	Rendimento energetico (%)
<b>20 (C/2)</b>	48.6	47.87	98.5	167.3	152.1	90.92
<b>40 (1 C)</b>	47.23	46.53	98.52	163.07	147.09	90.2
<b>120 (3 C)</b>	47.05	43.58	92.62	170.2	133.42	78.36

Tabella 7 - Prove carica-scarica a corrente costante - Thunder-sky - Principali risultati

Anche in questo caso i valori dei rendimenti a corrente 1 C sono rimasti costanti o diminuiti di poco rispetto ai valori ottenuti con corrente di carica C/2 riportati di sotto:

- Rendimento di carica: carica C/2 - scarica 1 C → 98.52 % (contro 98.5)
- Rendimento energetico: carica C/2 - scarica 1 C → 90.2 % (contro 90.92)

Ciò definisce un buon comportamento della cella, in termini di rendimento, a differenti correnti di carica.

### Determinazione del RPP (Potenza di picco rigenerativa)

Questa prova permette di determinare la potenza di picco massima di carica così come effettuato per la potenza di picco estraibile ai differenti livelli di SOC. In questo caso la procedura EUCAR prevede un tempo massimo di corrente di picco non di 30 secondi ma di soli 5, eseguendo i seguenti steps rappresentati e descritti nella figura della pagina seguente:

- una corrente costante in uscita a C/2 per scaricare il SOC del 20 % (12 minuti circa);
- una fase di riposo di 3600 secondi;
- un impulso di corrente di picco in ingresso dalla cella della durata di 5 secondi;
- una fase finale di riposo di 180 secondi e ritorno allo step 1.

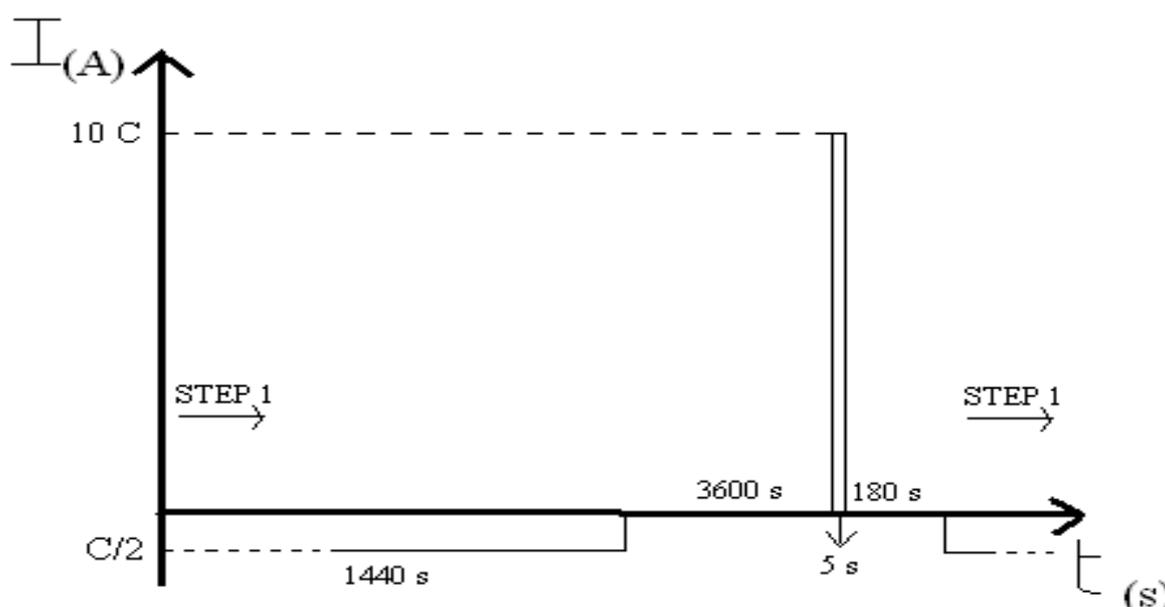


Figura 16 - Procedura utilizzata per la prova RPP

La potenza viene considerata solo al quinto secondo di carica e viene calcolata come un semplice prodotto tra la tensione e la corrente registrata in tale istante: tale misura è stata effettuata alla sola temperatura ambiente per i diversi SOC.

## KOKAM

Pur risultando una cella 10 C (310 A corrente di picco), in questa prova dal 80 % al 40 % del SOC con questa corrente si è raggiunti velocemente la tensione limite e quindi si sono riprovate varie correnti finché la durata di carica non si è manifestata per tutti i 5 secondi ottenendo quindi:

SOC	AL QUINTO SECONDO		
	Corrente (A)	Tensione (V)	Potenza (W)
80%	128	4.2	537.6
60%	240.5	4.2	1010.1
40%	281.5	4.2	1182.3
20%	309.2	4.2	1298.64
0%	309.6	4.1	1269.36

Tabella 8 – Prove RPP – Kokam – Principali risultati

Si nota che la potenza di picco rigenerativa è superiore di un kW tra lo 0 e il 60 % del SOC, mentre si riduce del 50 % al SOC 80 % poiché si raggiunge velocemente la tensione di picco: questo è un indice di buona resa della cella.

## THUNDER SKY

In questo caso già al SOC 80 % la cella è stata in grado di assorbire la corrente di picco 10 C (400 A) e quindi il valore della tensione determina la potenza di picco in uscita ai differenti SOC risultata pari a:

SOC	AL QUINTO SECONDO		
	Corrente (A)	Tensione (V)	Potenza (W)
80%	399.5	4.18	1669.91
60%	399.4	4.15	1657.51
40%	399.4	4.13	1649.52
20%	399.3	4.13	1649.11
0%	399.3	4.07	1625.15

Tabella 9 – Prove RPP – Thuder-sky – Principali risultati

Si nota che la potenza rigenerativa di picco rimane costante a qualsiasi SOC a valori di 1.6 kW, in quanto la corrente di picco comporta un innalzamento delle tensione a valori superiori ai 4 Volt.

### Prova ricarica veloce

La ricarica delle batterie è certamente il maggiore ostacolo ad una larga diffusione dei veicoli elettrici/ibridi presso una più ampia fascia di utenza comprensiva dei normali acquirenti di automobili. I lunghi tempi per effettuare la ricarica di una batteria (3-4 ore) e la necessità di adeguate infrastrutture per compiere tale operazione determinano comprensibili perplessità tra gli utilizzatori.

Per simulare il comportamento della cella ad un loro utilizzo per la trazione veicolare si è effettuata la prova di carica veloce ad intervalli regolari di tempo e di intensità di corrente, denominata Fast Charge, che simulano il comportamento della cella a prendere velocemente corrente; questa prova è utile per simulare il comportamento nelle frenate rigenerative che sono molto importanti nei veicoli ibridi-elettrici per recuperare energia.

La prova si effettua eseguendo i seguenti steps rappresentati e descritti nella figura seguente:

- una scarica di corrente costante a C/2 pari al 60 % del Quseful (determinata con una scarica precedente a C/2);
- immediatamente una carica a corrente costante massima 2C per un 40 % del Quseful;
- immediatamente una scarica a corrente costante a C/2 fino alla minima tensione;
- carica standard a C/2.

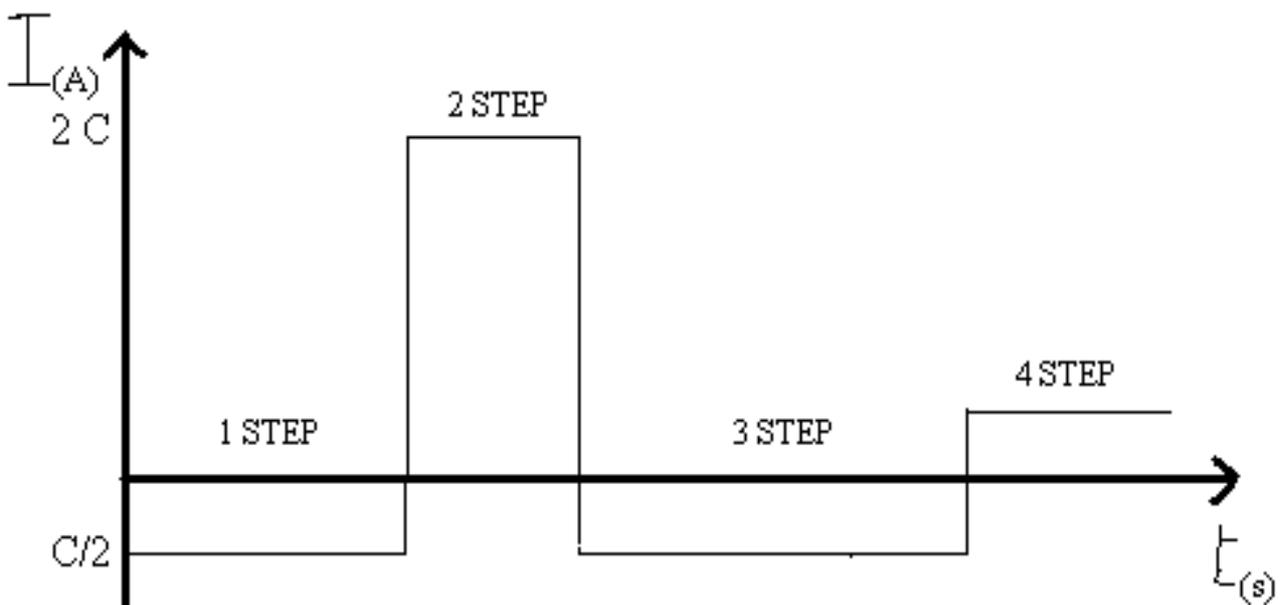


Figura 17 -Procedura utilizzata per la prova di ricarica rapida

Gli ingressi e le uscite della capacità e dell'energia sono stati misurati negli steps 1 e 3 in modo da calcolare le efficienze in accordo con le seguenti equazioni:

$$\text{Efficienza di capacità} \quad \eta_Q = \frac{Q_{sca,STEP3} - (Q_{useful} - Q_{sca,STEP1})}{Q_{HCC,STEP2}}$$

$$\text{Efficienza energetica} \quad \eta_E = \frac{E_{sca,STEP3} - (E_{useful} - E_{sca,STEP1})}{E_{HCC,STEP2}}$$

### KOKAM

I valori registrati nella prova "Fast charge" per la cella Kokam sono i seguenti:

<b>(Ah)</b>	<b>Quseful</b>	30.5	<b>Qsca,step1</b>	18.90	<b>Qhcc,step2</b>	12.60	<b>Qsca,step3</b>	23.93
<b>(Wh)</b>	<b>Euseful</b>	112.95	<b>Esca,step1</b>	74.05	<b>EHcc,step2</b>	51.03	<b>Esca,step3</b>	89.11

Tabella 10 - Prove Ricarica veloce - Kokam - Principali risultati

In questo modo è stato possibile calcolare i due rendimenti fondamentali:

$$\eta_Q = 97.9$$

$$\eta_E = 98.4$$

### THUNDERSKY

I valori registrati nella prova "Fast charge" per la cella Thunder-sky sono i seguenti:

<b>(Ah)</b>	<b>Quseful</b>	47.50	<b>Qsca,step1</b>	28.50	<b>Qhcc,step2</b>	19.00	<b>Qsca,step3</b>	36.77
<b>(Wh)</b>	<b>Euseful</b>	145.88	<b>Esca,step1</b>	91.96	<b>EHcc,step2</b>	80.74	<b>Esca,step3</b>	118.72

Tabella 11 - Prove Ricarica veloce - Thunder-sky - Principali risultati

In questo modo è stato possibile calcolare i due rendimenti fondamentali:

$$\eta_Q = 93.5$$

$$\eta_E = 80.3$$

## Conclusioni

In questo report si sono riportati alcuni dei risultati del team di lavoro ENEA nell'ambito dell'Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico – ENEA per quanto concerne la Ricerca di Sistema Elettrico.

In particolare, il rapporto fa riferimento all'Obiettivo C (Adattamento di convertitori di piccola potenza ad alto rendimento all'uso nei veicoli elettrici leggeri, e sperimentazione di sistemi di ricarica rapida) del Progetto 3.5 (Studio per lo sviluppo di materiali innovativi per il risparmio di energia nel settore elettrico con particolare attenzione ai materiali per i mezzi di trasporto collettivi: nuovi materiali e componenti innovativi per i mezzi di trasporto). In particolare, rapporto è relativo alla ricarica rapida di sistemi di accumulo di caratteristiche compatibili con vetture per la mobilità urbana.

Si sono analizzate nel dettaglio le caratteristiche principali di due sistemi di accumulo agli ioni litio prodotti dalla Dow Kokam (con elettrolita polimerico) e dalla Thundersky.

I due prodotti sono differenti per caratteristiche dichiarate, tipologie di chimica di cella e costi. Si evidenzia il costo più di tre volte maggiore della batteria Kokam, rispetto alla Thunder-sky, costo che corrisponde però anche ad una migliore qualità ed efficienza del sistema. Gli intervalli di tensione sono quelli comuni ai due tipi di cella: la cella Kokam, ad elettrolita polimerico, ha un intervallo più ristretto (2.7 V – 4.2 V) rispetto Thunder-sky (2.5 V – 4.25 V) ma presenta una tensione nominale maggiore (3.7 V contro 3.2 V): ciò favorisce un maggior contenuto energetico e di potenza a parità di corrente di scarica.

Le batterie hanno lo stesso rate di corrente di scarica (10 C corrente di picco, 3 C corrente continua) mentre si differenziano sul rate di corrente di carica (2 C corrente continua per Kokam contro i 3 C corrente continua della Thunder-sky).

In termini di massa la Thunder-sky ha un peso 1.86 volte maggiore, valore che influisce negativamente nei termini di energia specifica (133.37 Wh/kg Kokam > 80 Wh/kg Thunder-sky) e potenza specifica di picco (1.374 kW/kg Kokam > 800 kW/kg Thunder-sky).

Il confronto dell'ingombro è ancora più eclatante in quanto si osserva che il volume della Thunder-sky è fino a 2.55 volte più piccolo, influenzando positivamente in termini di densità energetica (288.6 Wh/l Kokam > 137.41 Wh/l Thunder-sky) e di densità di potenza di picco (2.886 kW/kg Kokam > 1.344 kW/kg Thunder-sky).

Ai fini della ricarica rapida, le caratteristiche misurate non si sono discostate in maniera rilevante da quelle dichiarate dal costruttore. ed entrambi i prodotti hanno dimostrato di poter assorbire le correnti dichiarate.

Tuttavia il prodotto della Kokam presenta un comportamento decisamente migliore sia dal punto di vista della efficienza di capacità (97.9% contro 93.5%), sia soprattutto dal punto di vista della efficienza di ricarica energetica (98.4% contro 80.3%) durante processi di ricarica a 2C (30 minuti per una ricarica completa a corrente costante).

## Riferimenti Bibliografici

- IEA Technoloy Roadmap: Electric and plug-in hybrid electric vehicles – June 2011. International Energy Agency
- Brusaglino-Pede-Vitale, "Sistemi di propulsione elettrica ed ibrida. Dalla sorgente a bordo all 'attuazione meccanica ", 2009, edizione ENEA.
- Consiglio Nazionale delle Ricerche; Dipartimento di Energia e Trasporti, "Energia e trasporti. Stato attuale e prospettive future della ricerca scientifica ", Claudio Bertoli editore, Aprile 2009
- Badin F., Briat O., Olivier S., Jeanneret B., "The use of batteries in hybrid vehicles",
- Quaderni di elettrochimica, "Gli accumulatori elettrici. Costituzione ed esercizio ", Editoriale Delfino - Milano.
- EUCAR, "Specification of test procedures for hybrid electric vehicle traction batteries".