



Ricerca di Sistema elettrico

## Second Life, definizione dei criteri di ritiro delle celle dalla prima applicazione

Manlio Pasquali, Francesco Vellucci

## SECOND LIFE, DEFINIZIONE DEI CRITERI DI RITIRO DELLE CELLE DALLA PRIMA APPLICAZIONE

Manlio Pasquali, Francesco Vellucci (ENEA)

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

## Indice

SOMMARIO .....	4
1 INTRODUZIONE .....	5
2 DESCRIZIONE DELLE ATTIVITÀ SVOLTE E RISULTATI .....	6
2.1 LA SECOND LIFE .....	6
2.2 SECOND LIFE, DEFINIZIONI E PROCEDURE DI REALIZZAZIONE DEI MODULI .....	6
2.3 CRITERI DI SELEZIONE DELLE CELLE E STIMA DELLA VITA NELLA SECONDA APPLICAZIONE .....	10
2.4 ANALISI DI FATTIBILITÀ PER UNA APPLICAZIONE DI TIPO STAZIONARIO .....	17
2.5 PROGETTI PILOTA .....	23
3 CONCLUSIONI .....	29
4 RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI .....	30

## Sommario

Il presente documento approfondisce il tema del riutilizzo delle batterie da trazione ritirate dal loro servizio primario per essere impiegate in una seconda applicazione di tipo stazionario, utilizzo denominato 'Second Life': vengono presentati i criteri principali di selezione e ritiro delle batterie, le operazioni necessarie per il loro ricondizionamento e delle applicazioni reali in progetti pilota. Nel lavoro viene svolto uno studio di fattibilità su una applicazione di piccola potenza; se ne calcola il costo di installazione ed il tempo di rientro dall'investimento, si effettua una comparazione con un sistema analogo composto da celle al primo impiego.

Si conclude che il riutilizzo di batterie in Second Life è un tema di grande interesse, esso richiede però la disponibilità di sistemi di selezione delle celle, individuazione delle loro performance, gestione della sicurezza e di previsione della vita residua per la particolare applicazione di destinazione.

## 1 Introduzione

Le batterie utilizzate nei veicoli elettrici ed ibridi Plug In devono essere dimensionate per assicurare al veicolo stesso una autonomia di decine di chilometri in solo elettrico per i Plug In e di centinaia di chilometri per gli elettrici, questo fa sì che in genere esse presentino una capacità nominale molto elevata: le batterie sono composte da un certo numero di moduli messi in serie tra di loro, un modulo del sistema di accumulo di bordo è a sua volta realizzato componendo in serie/parallelo degli elementi base detti 'celle'. Una cella o l'intero modulo di un accumulo per un veicolo elettrico viene considerato non più adatta/adatto alla trazione quando la sua capacità effettiva residua scende a circa l'ottanta per cento della nominale: dal momento che la capacità residua della cella/modulo è comunque molto elevata rispetto alle taglie in commercio nasce l'idea di riutilizzare il componente per un'altra tipologia di applicazione, normalmente di tipo stazionario, le cui specifiche siano compatibili con le nuove prestazioni del componente, questo riutilizzo è detto "Second Life".

La 'Second Life' si presenta quindi come una opportunità di estensione della vita operativa di celle che altrimenti andrebbero mandate al riciclo: il riutilizzo delle celle non è però gratuito come si potrebbe pensare in un primo momento, infatti su di esse occorre eseguire un lavoro di selezione, uno per definirne le nuove caratteristiche operative ed un ulteriore lavoro per la costruzione di nuovi contenitori e sistemi di gestione che ne garantiscano il corretto utilizzo ed assicurino la sicurezza del sistema.

Nell'ambito della ricerca di sistema elettrico, in particolare per il tema dell'accumulo, l'Enea si è occupata della Second Life sviluppando dei test atti a stabilire le performance di celle degradate provenienti da un utilizzo automobilistico ed ha costruito dei cicli che schematizzano delle semplici applicazioni stazionarie: i cicli sono stati utilizzati per effettuare dei test di vita sulle celle, attività a tutt'ora in corso ([1],[2]). La sperimentazione sui cicli test ha permesso di evidenziare le problematiche attinenti ad un utilizzo di celle degradate: le celle si deformano, le caratteristiche non sempre sono omogenee tra di loro, la vita operativa dipende anche dal tempo di stoccaggio e da eventuali pause nella ripetizione dei cicli.

Nella ricerca su questo tema sono coinvolte anche le Università di Pisa e di Roma Tor Vergata, mentre Enea si dedica ad applicazioni di tipo energetico Pisa si occupa di applicazioni di tipo gestionale, Tor Vergata ha modellato celle degradate ed sta studiando cicli di lavoro relativi ad una applicazione domestica ([3],[4]).

Lo scopo del presente documento è di eseguire una indagine sullo stato delle conoscenze attuali nel settore della Second Life e delle applicazioni pilota in corso: visto l'interesse del tema attualmente si sta cercando di definire il concetto stesso di Second Life, i passaggi da compiere per passare da una cella ritirata dal veicolo ad un modulo di accumulo stazionario, i soggetti collegati ad ogni passaggio e le loro responsabilità giuridiche.

Mentre viene approfondito lo studio sulla normativa vengono anche sviluppati progetti pilota in tutto il mondo: il documento ne cita alcuni e presenta uno studio di fattibilità per una piccola applicazione stazionaria.

## 2 Descrizione delle attività svolte e risultati

### 2.1 *La Second Life*

Le batterie utilizzate nei veicoli elettrici ed ibridi Plug In devono essere dimensionate per assicurare al veicolo stesso una autonomia di decine di chilometri in solo elettrico per i Plug In e di centinaia di chilometri per gli elettrici, questo fa sì che in genere esse presentino una capacità nominale molto elevata: dato che il ritiro dal veicolo avviene normalmente quando la capacità effettiva scende al di sotto dell' 80% di quella nominale si ha che la batteria, pur degradata dall'utilizzo automotive, presenta comunque una capacità residua che potrebbe renderla adatta per altre applicazioni di tipo stazionario. Dall'osservazione precedente nasce l'idea di riutilizzare le celle del sistema di accumulo per applicazioni le cui specifiche siano compatibili con le nuove prestazioni del componente: questo riutilizzo è detto "Second Life".

La "Second Life" si presenta quindi come una opportunità di estensione della vita operativa di celle che altrimenti andrebbero mandate al riciclo: il riutilizzo delle batterie non è però gratuito come si potrebbe pensare in un primo momento, in quanto occorre eseguire un lavoro per definirne le nuove caratteristiche operative ed individuare la giusta applicazione a cui sottoporle, ed un ulteriore lavoro di ricondizionamento delle celle.

La Second Life può rappresentare una interessante opportunità economica per chi voglia investire in sistemi di accumulo stazionario, in quanto si prevede di poter impiegare circa l'ottanta per cento delle batterie utilizzate nei veicoli elettrici e Plug In, ed il numero circolante di tali veicoli è in rapido aumento: da qui viene l'interesse dei principali produttori di celle e veicolo e degli utilizzatori all'approfondimento di questo tema.

### 2.2 *Second Life, definizioni e procedure di realizzazione dei moduli*

La Recharge (European Association of Advanced Rechargeable Batteries) distingue due possibili utilizzi per una cella o un modulo di batterie ritirate da una specifica applicazione [5]:

#### **Riutilizzo**

Il riutilizzo è definito come qualsiasi operazione mediante la quale le batterie che non vengono considerate a fine vita sono trattate per essere reimpiegate per la stessa finalità per la quale erano state inizialmente concepite (Direttiva quadro sui rifiuti 2008/98 / CE - Art 3.13).

#### **Secondo utilizzo (Second Life)**

Il secondo utilizzo non è contemplato nelle direttive, la proposta è:

*Il secondo utilizzo è una operazione mediante la quale le batterie vengono utilizzate per uno scopo diverso da quello per il quale sono state immesse sul mercato.*

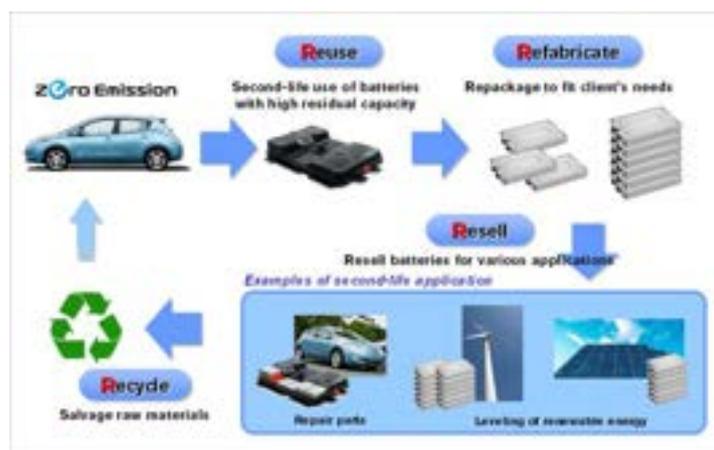
Quindi la prima caratteristica della Second Life è la differenza tra l'utilizzo primario e quello secondario del sistema di accumulo.

In tabella 1 vengono evidenziate le garanzie richieste al modulo batterie per essere utilizzato nella vecchia applicazione o in una nuova secondo la proposta dell'associazione

**Tabella 1. Requisiti richiesti per il Second Life**

Requisiti minimi proposti per il riutilizzo o la Second Life di celle al litio	Riutilizzo (Stessa applicazione)	Secondo Utilizzo (Nuova applicazione)
<b>Ristrutturazione/ricondizionamento</b> Ristrutturazione o ricondizionamento eseguito da personale qualificato Verifica delle performance del sistema di controllo delle batterie Verifica della qualità e sicurezza	Se 'si' per tutta la prima colonna il riutilizzo è accettabile	Compatibilità con la nuova applicazione Responsabilità per la verifica delle performance Responsabilità del produttore per la definizione del fine vita Conformità con i test di sicurezza richiesti prima del secondo utilizzo
<b>Responsabilità del produttore</b> Identificazione del produttore Garanzia del produttore		
<b>Sicurezza</b> Mantenimento dei requisiti tecnici di sicurezza Rispetto degli standard di sicurezza (Test)		

Gli step da seguire per un riutilizzo o un utilizzo in Second Life delle batterie sono illustrati, per esempio, in una brochure relativa ad una collaborazione Nissan/Sumimoto.



**Figura 1. Brochure Nissan/Sumimoto**

Le batterie vengono assemblate in nuovi moduli e rivendute per la nuova applicazione. Si noti che si evita di utilizzare direttamente gli stessi contenitori per la nuova applicazione: infatti i requisiti richiesti la gestione termica, la gestione della sicurezza e quella delle prestazioni della cella (corrente massima, potenze, capacità utilizzabile) sono diversi tra celle nuove e degradate

dall'utilizzo automotive, per esempio la resistenza interna è aumentata e quindi lo è anche il calore prodotto a parità di corrente, su questo argomento si tornerà in seguito.

In generale quando un modulo di batterie presenta problemi operativi si possono avere le seguenti possibilità [6]:

**Riparazione** - Ripristinare le condizioni operative.

Avviene quando il problema riguarda una o poche celle del modulo e la/le si sostituisce/sostituiscono ripristinando le normali condizioni operative.

**Rigenerazione** – Ricostruire e per le specifiche originali.

Si ricostruisce completamente il modulo per operare nelle condizioni originali, per esempio sostituendo tutte le celle che lo compongono e mantenendo elettronica e contenitore originali.

**Ristrutturazione** – Costruire per nuove specifiche

Si ricostruisce un modulo con gli stessi componenti ma adattandolo a nuove specifiche di lavoro in cui le performance richieste sono meno pesanti delle precedenti.

**Ricostruire per un altro scopo** – Costruire un nuovo modulo con componenti già utilizzati

In questo caso si utilizzano i componenti del vecchio modulo per nuovi scopi, ad esempio si utilizzano le sole celle su un contenitore diverso ed un diverso BMS (sistema di controllo).

**Riciclaggio** - preparazione e gestione

Riduzione del volume, peso e costi, smontaggio dei moduli e preparazione per il trasporto ed il riciclaggio.

La necessità di prevedere per l'utilizzo in Second Life delle celle l'assemblaggio di un nuovo modulo è dovuta al fatto che le celle, essendo degradate, necessitano di una gestione termica e di sicurezza diverse da quelle originali, per esempio la figura seguente mostra due celle sulle quali sono state eseguite delle prove vita per valutarne l'invecchiamento in Second Life comparate con una sulla quale il test non è stato eseguito: la cella 1 non è stata ancora sottoposta a test la 2 e la 3 risultano deformate e presentano dei rigonfiamenti laterali [2].

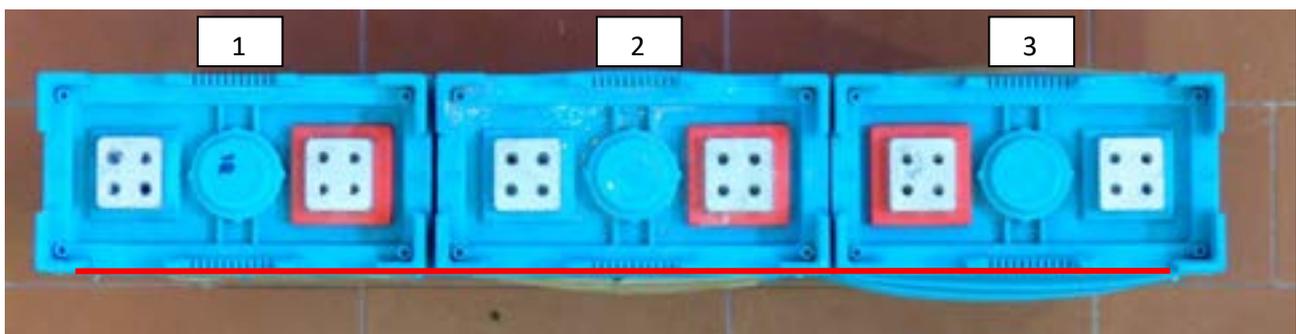


Figura 2. Comparazione di celle degradate

La figura mette in evidenza il fatto che le caratteristiche termiche del contenitore di celle elementari utilizzate per la Second Life, la sua elettronica di gestione ed i sistemi di sicurezza non possono, in generale, essere le stesse richieste al modulo originale: infatti le celle degradate presentano una resistenza più elevata di quelle integre e quindi a parità di corrente aumenta la dispersione di calore, calore che può farle deformare, il case del modulo originario è pensato per una applicazione automotive, dove è importante limitare al massimo il volume occupato ed il peso del sistema, il contenitore della nuova applicazione sarà pensato per un utilizzo stazionario dove le limitazioni di peso e volume sono meno stringenti, pertanto i sistemi di trattamento termico potranno essere molto diversi nei due casi.

La Second Life è un investimento e come tale implica la capacità di valutarne la convenienza, ovvero quella di saper riconoscere lo stato di salute delle batterie, identificarne le prestazioni, prevederne la vita residua rispetto all'attività che si andrà a svolgere, saper dimensionare e costruire un nuovo modulo basato su celle che, essendo degradate, presentano problematiche di gestione elettrica, termica e di sicurezza più complesse rispetto a quelle nella condizione originale. La valutazione del costo di investimento e del tempo di vita nella seconda applicazione è fondamentale per decidere se procedere o no nell'operazione: in generale questa valutazione viene fatta ricorrendo alle prove vita più che a modelli matematici delle batterie, anche se questi vengono comunque sviluppati ed associati ai test.

Nell'ambito della ricerca di sistema l'Enea ha affrontato i problemi della caratterizzazione delle celle degradate e dello sviluppo di test per la prova vita, nel contempo ha anche realizzato dei sistemi di accumulo di tipo automotive e stazionario, per i quali ha disegnato i contenitori e definito le caratteristiche dei sistemi di gestione elettronica delle celle.

Di seguito viene brevemente riassunto quanto fatto (disponibile in [1] [2] ) per poi effettuare uno studio di fattibilità, di prima approssimazione, per una applicazione stazionaria di piccola potenza.

### 2.3 Criteri di selezione delle celle e stima della vita nella seconda applicazione

Per realizzare un sistema di accumulo elettrochimico avente determinate caratteristiche di tensione massima/minima di lavoro, corrente nominale e di picco e capacità si sceglie di comporre una determinata tipologia di celle elementari in moduli: per realizzare un modulo occorre connettere elettricamente le celle elementari in serie/parallelo come mostrato nello schema in figura.

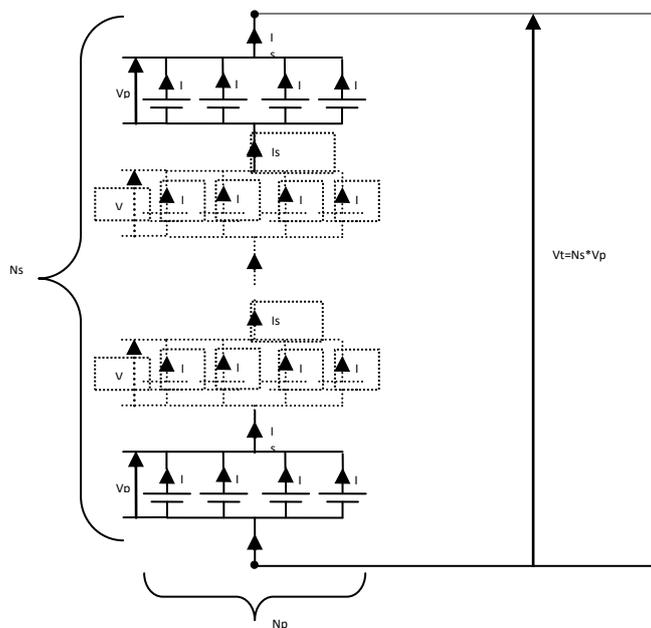


Figura 3. Connessione in serie/parallelo di celle elementari

Di seguito viene mostrato lo schema di assemblaggio di un modulo sviluppato per applicazioni stazionarie:

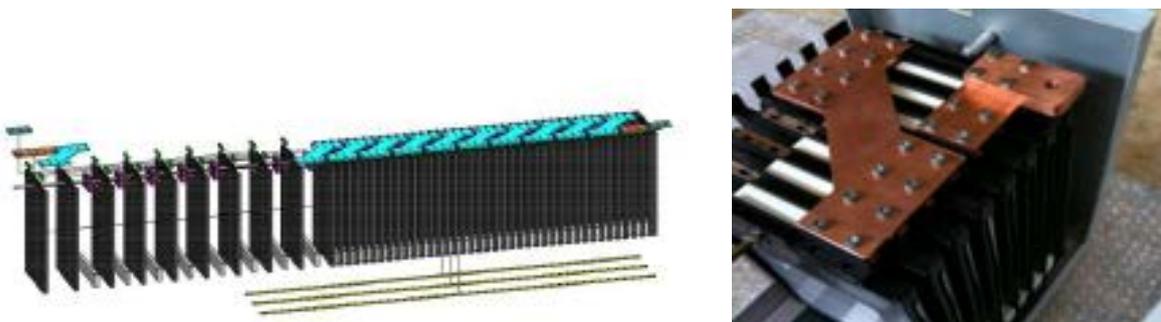


Figura 4. Connessioni per un modulo destinato ad applicazioni stazionarie

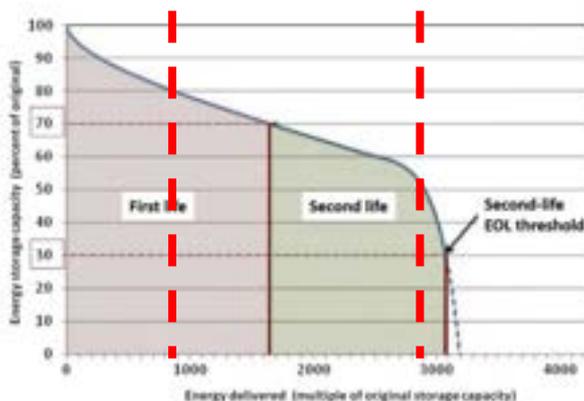
Se tutte le celle avessero, idealmente, le stesse caratteristiche, il sistema funzionerebbe in modo ottimale, se al contrario le celle fossero molto diverse si avrebbero degli squilibri di tensione tra le sezioni di celle messe in serie, e di corrente tra gli elementi in parallelo: in una situazione reale si presentano scostamenti dei parametri caratteristici delle celle elementari legati alla tolleranza di realizzazione delle stesse ed al diverso invecchiamento che ne consegue.

Il sistema di gestione delle celle (BMS) supervisiona le tensioni parziali del modulo, le temperature di cella ed altri parametri per assicurare il corretto funzionamento del sistema, compensare gli squilibri di tensione, segnalare il mal funzionamento delle singole celle: se il sistema è molto evoluto può inoltre fornire una stima della capacità residua e dello stato di salute del modulo.

In termini operativi è buona norma, a causa degli scostamenti tra le resistenze interne delle celle, ridurre al minimo il numero di elementi in parallelo.

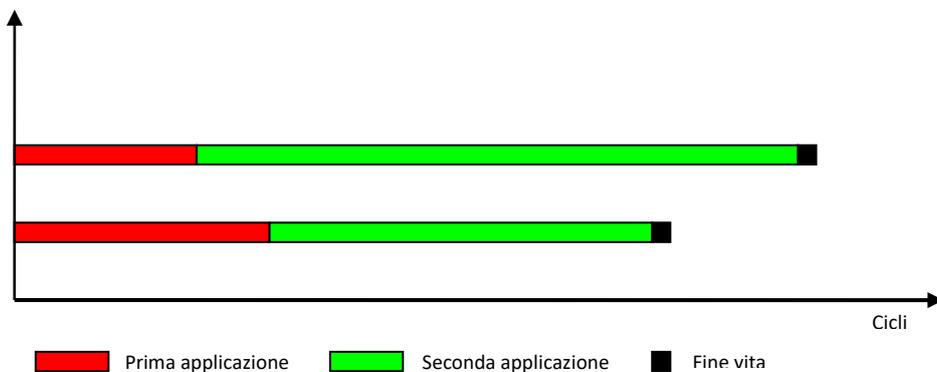
Quanto detto è valido in generale, ma si esalta ancor di più se le celle sono degradate, in quanto gli scostamenti parametri da attendersi sono maggiori, e tenderanno ad aumentare nel tempo: questo vale in particolare per i due parametri più importanti in termini di 'sensibilità' del sistema, la capacità e la resistenza interna delle singole celle.

La selezione ed il ritiro delle celle dovranno quindi avvenire tra elementi che abbiano avuto la stessa 'vita' (ad es. provenienti dallo stesso modulo, o da più moduli di auto che eseguono percorsi/cicli simili) ed eseguendo una serie di test che assicurino l'omogeneità delle caratteristiche delle stesse ed una stima del loro stato di salute: come si è detto si tende a ritirare le celle/moduli quando la loro capacità risulta essere l'ottanta per cento della nominale, non esiste una regola precisa sui criteri di ritiro delle celle dal secondo utilizzo: si è proposto di assumere come termine massimo di durata della Second Life quello per il quale la capacità è al trenta per cento della nominale ([7],[8]) ma il tutto va messo in relazione con l'applicazione specifica di destinazione delle batterie.



**Figura 5. Criteri di ritiro dalla prima e seconda vita di celle al Litio**

Nella figura 5 viene messo in evidenza il fatto che anche il criterio di ritiro delle celle dalla prima applicazione non è univoco: infatti se si anticipa il ritiro dalla prima applicazione è possibile aumentare il tempo di vita nella seconda (fig. 6).



**Figura 6. Cicli vita nelle due applicazioni**

Disponendo di uno strumento di stima della vita nelle due applicazioni in funzione del momento di ritiro delle batterie dalla prima è possibile, ad esempio, massimizzare il guadagno globale dell'investimento.

Al momento del ritiro delle celle dal primo servizio occorrerà quindi stimare i seguenti parametri:

- 1) Capacità residua della cella
- 2) Resistenza ohmica interna
- 3) Corrente continuativa di scarica/carica
- 4) Corrente di picco
- 5) Potenza di picco
- 6) Deformazioni della geometria della cella, comportamento termico

Come detto per valutare l'opportunità di un utilizzo in Second Life occorre avere a disposizione un metodo di previsione della vita residua nella nuova applicazione, per farlo si possono utilizzare o modelli elettrochimici della cella o prove vita eseguite su di riferimento assimilabili a quello dell'applicazione considerata.

In questa ottica l'Enea ha acquisito un pacco di celle fornite dalla FIB, utilizzate per autotrazione e provenienti da veicoli diversi, ritirate dal servizio per motivi non documentati ma diversi tra di loro, di seguito sono riportate le immagini delle celle ed il loro Data Sheet.



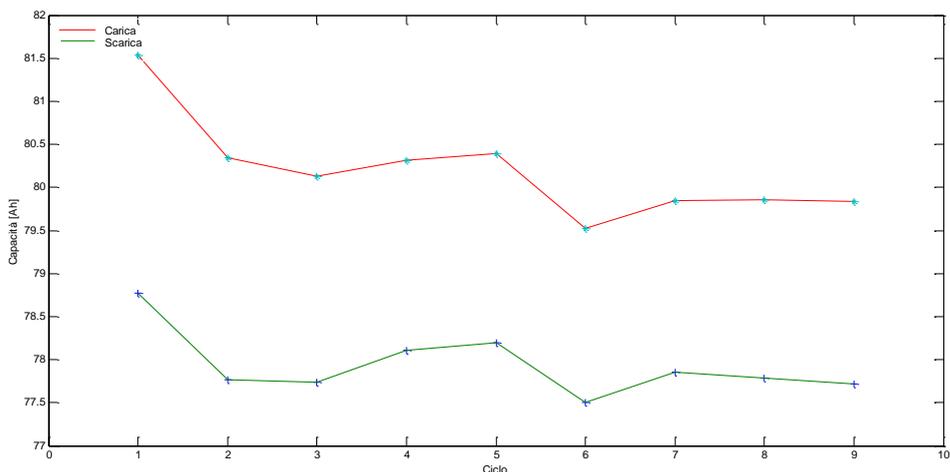
Figura 7. Celle fornite da FIB



**Tabella 2. Test di carica scarica**

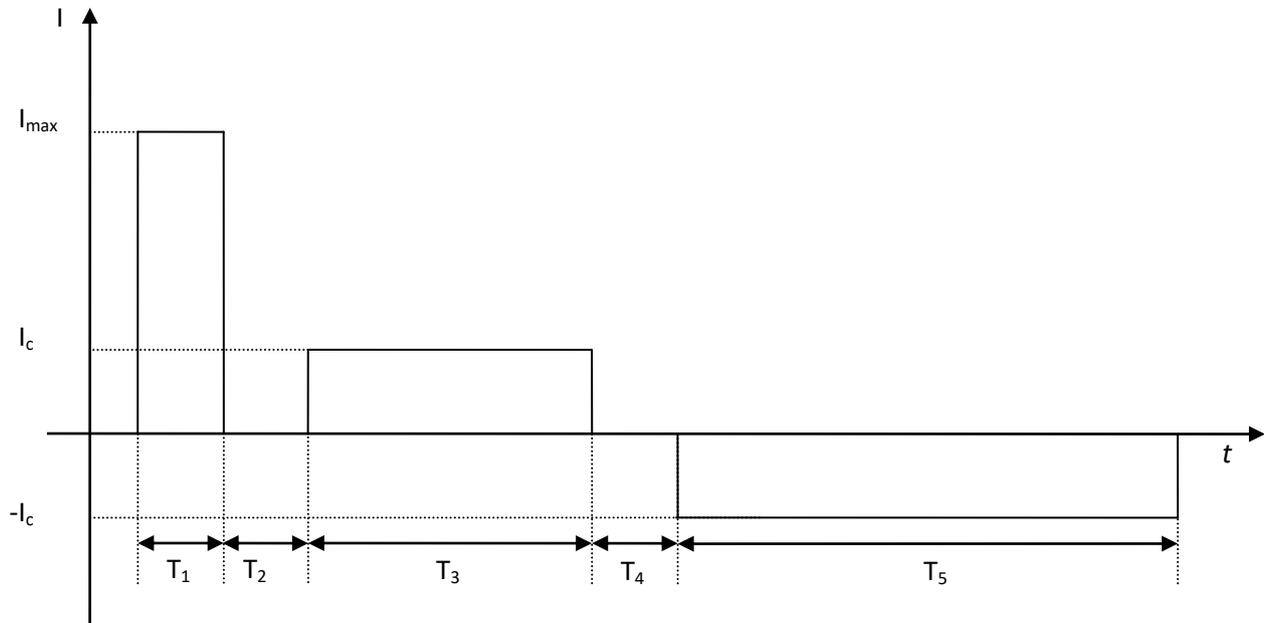
FLT-LFMP 90 Ah 12011500182				
Ciclo	Corrente [A]	Res int [mΩ]	Capacità [Ah]	Ahcar/Ahsc
1 - scarica	30	6.76	78.77	1.04
1 - carica	30	7.54	81.54	
2 - scarica	30	7.63	77.77	1.03
2 - carica	30	7.50	80.34	
3 - scarica	30	8.07	77.74	1.03
3 - carica	30	7.45	80.13	
4 - scarica	30	7.51	78.11	1.03
4 - carica	30	8.77	80.32	
5 - scarica	30	7.63	78.20	1.03
5 - carica	30	8.77	80.39	

Dopo aver eseguito nove cicli si aveva il seguente andamento della capacità residua.



**Figura 9. Andamento della capacità nei cicli standard a 30 A**

Dopo aver caratterizzato le celle l'Enea ha impostato delle prove vita su un ciclo semplificato rappresentativo di condizioni di lavoro che si possono ritrovare in una applicazione stazionaria dove, per esempio, una macchina elettrica viene avviata e lavora a regime costante per una giornata, ma il ciclo può schematizzare anche in modo semplificato un inverter che gestisce un accumulo elettrochimico, caricandolo di giorno ed utilizzandolo di notte in modo di minimizzare la richiesta di energia alla rete elettrica.



**Figura 10. Struttura del ciclo di lavoro per test Second Life**

La corrente di picco rappresenta la fase di avviamento di un impianto e la continuativa quella del lavoro a regime costante.

Variando i valori delle due correnti è possibile generare una 'famiglia' di cicli correlati tra di loro ed effettuare delle prove vita di vita su di essi: nelle scorse annualità Enea ha proposto tre cicli denominati 'Pro', 'Intermedio' e 'Light', ai quali in questa annualità ha affiancato un ciclo 'SemiPro'.

**Tabella 3. Correnti nei cicli di test**

Ciclo	I <sub>c</sub> [A]	I <sub>max</sub> [A]
Light	15	30
Intermedio	22.5	45
SemiPro	26.2	67.5
Pro	30	90

L'idea base è di considerare i cicli come facenti parte di una 'classe' e di utilizzarli per prevedere la vita delle batterie in un utilizzo che sia assimilabile ad essi o ad una condizione di lavoro intermedia tra due di loro.

Le prove vita sono tuttora in corsa, ed i risultati a disposizione sono solo parziali, in parte sono stati mostrati e discussi nel report [2], purtroppo problemi tecnici hanno portato all'interruzione

della prova sul ciclo 'Light' che risulta così incompleta, la figura mostra i risultati parziali della prova 'Light' e quelli definitivi delle prove 'Pro' e 'Intermedio'.

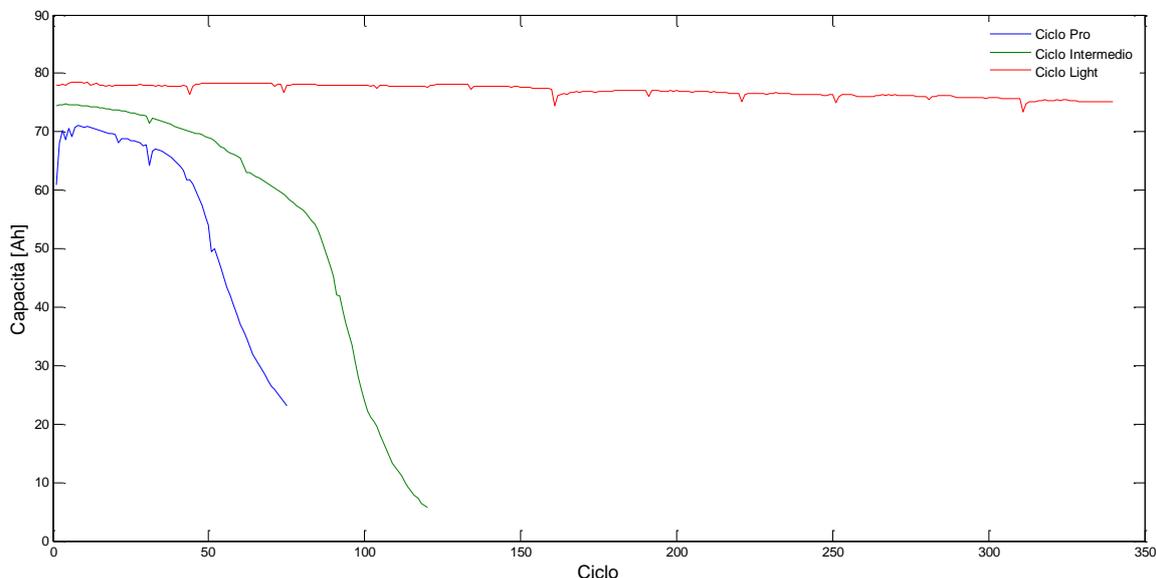


Figura 11. Risultati delle prove

La prova sul ciclo 'Light' prima di essere interrotta mostrava un degrado lineare della capacità pari a 0.0075 Ah/Ciclo, in base alle due prove precedenti assunto di rimanere in zona lineare almeno per un degrado 7 Ah si deduce che la vita minima della cella sottoposta a ciclo Light è di 930 Cicli: l'assunzione fatta non può essere provata, ma sembra restrittiva in base alle esperienze sui cicli Pro ed Intermedio, dove al diminuire della corrente la fase lineare permane per un degrado di circa 7 Ah per il Pro e 20 Ah per l'intermedio. La tabella seguente mostra la stima delle energie assorbite ed erogate nei tre cicli di prova.

Tabella 4. Stima delle energie assorbite/erogate per i tre cicli di prova

Ciclo	Energia assorbita [kWh/Cella]	Energia erogata [kWh/cella]	Rendimento
Pro	0.2992	0.1597	0.53
Intermedio	0.2867	0.1853	0.65
Light	0.2847	0.2139	0.75

Il ciclo Light è risultato essere compatibile con una lunga durata di vita delle celle, ed è anche quello che, a causa delle basse correnti di lavoro presenta il rendimento più elevato e la maggior energia resa all'utilizzatore.

Sulla base di questa esperienza, che va completata con lo sviluppo di altri cicli test e la loro esecuzione, si vuole effettuare uno studio di fattibilità approssimato rivolto all'utilizzo di batterie degradate in applicazioni domestiche.



Tabella 5. Caratteristiche Inverter ABB/Power One UNO-2-0-I-OUTD

Technical data and types		
Type code	UNO-2-0-I-OUTD	UNO-2-5-I-OUTD
<b>Input side</b>		
Absolute maximum DC input voltage ( $V_{in,max}$ )	520 V	
Start-up DC input voltage ( $V_{in}$ )	200 V (adj. 120...350 V)	
Operating DC input voltage range ( $V_{in,min}...V_{in,max}$ )	0.7 x $V_{in,max}$ ...520 V	
Rated DC input voltage ( $V_{in}$ )	350 V	
Rated DC input power ( $P_{in}$ )	2100 W	2000 W
Number of independent MPPT	1	
Maximum DC input power for each MPPT ( $P_{in,max}$ )	2300 W Linear derating from max to null (470V/51A/520V)	2900 W Linear derating from max to null (470V/51A/520V)
MPPT input DC voltage range ( $V_{in,MPPT}...V_{in,max}$ ) at $P_{in}$	200...470 V	
Maximum DC input current ( $I_{in,max}$ ) / for each MPPT ( $I_{in,MPPT}$ )	12.5 A / 12.5 A	12.8 A / 12.8 A
Maximum input short circuit current for each MPPT	15.0 A	
Number of DC inputs pairs for each MPPT	2	
DC connection type	Tool Free PV connector WM / MC4	
<b>Input protection</b>		
Reverse polarity protection	Yes, from limited current source	
Input over voltage protection for each MPPT - variator	2	
Photovoltaic array isolation control	According to local standard	
DC switch rating for each MPPT (version with DC switch)	16 A / 600 V	
<b>Output side</b>		
AC grid connection type	Single phase	
Rated AC power ( $P_{out} @ \cos\phi=1$ )	2000 W	2500 W
Maximum AC output power ( $P_{out,max} @ \cos\phi=1$ )	2200 W #	2750 W #
Rated AC grid voltage ( $V_{out}$ )	230 V	
AC voltage range	180...264 V #	
Maximum AC output current ( $I_{out,max}$ )	10.5 A	12.5 A
Contributory fault current	16.0 A	
Rated output frequency (f)	50 Hz / 60 Hz	
Output frequency range ( $f_{min}...f_{max}$ )	47...53 Hz / 57...63 Hz#	
Nominal power factor and adjustable range	> 0.990#	
Total current harmonic distortion	< 2%	
AC connection type	Screw terminal block, cable gland M25	
<b>Output protection</b>		
Anti-islanding protection	According to local standard	
Maximum AC overcurrent protection	15.0 A	
Output overvoltage protection - variator	2 (L - N / L - PE)	

L’inverter accetta una tensione in ingresso lato DC variabile tra 200 e 470 V se opera con un algoritmo MPPT, e tra 200 e 520 V se si rinuncia a questa funzione: per il seguito del lavoro ci si pone nell’ipotesi 2, le batterie verranno collegate ad un convertitore DC/DC ed interfacciate con il Bus DC dell’inverter.

L’Enea ha sviluppato diversi moduli batterie per applicazioni stazionarie [9], una tipologia di questi è basata sull’utilizzo di celle FLT-LFMP ed è pensato per sostituire le batterie al piombo da 12 V in applicazioni standard: ogni modulo è composto da quattro celle elementari ed è corredato da una scheda di misura e collegamento con un BMS centrale, si decide di sviluppare il sistema di accumulo mettendo in serie questi moduli base.



Figura 13. Modulo standard realizzato da Enea

Si vuole stimare in modo semplificato il tempo di recupero dell'investimento in funzione del dimensionamento del sistema di accumulo e si vuole estendere la stima anche al caso del sistema realizzato con moduli formati da celle nuove.

Come primo passo occorre valutare il costo del sistema, immaginando di realizzare una piccola produzione in serie di mille moduli i costi unitari dei componenti si possono fissare nei seguenti valori:

Costo del Case: 300 Euro  
 Costo del MUX: 68 Euro  
 Costo del BMS: 250 Euro

Il costo unitario della cella si può invece stimare di 0.85 E/Ah (fonte IEA, [11]), quello del convertitore è circa 800 Euro.

L'utilizzo di celle in Second Life richiede il loro smontaggio dal primo case ed un test di verifica dello stato di salute delle celle: considerando che il BMS della prima applicazione sia programmato per minimizzare questi test di verifica si stabilisce un costo convenzionale di smontaggio+verifica di 10 Euro a cella, per un totale di 40 Euro a modulo. Il sistema accumula energia 'gratuita' dal fotovoltaico di giorno e la restituisce di notte: il costo dell'energia fornito da Enel per una utenza di questo tipo è di 0.34 Euro/kWh, quindi erogando di notte l'energia accumulata 'gratuitamente' di giorno si ha un risparmio pari al costo di acquisto dell'energia erogata.

Il risparmio reale potrebbe essere maggiore, in quanto le batterie possono minimizzare la richiesta di potenza in rete e quindi le spese legate al picco di potenza, ma nella procedura semplificata che si vuol proporre non si scende a questo livello di dettaglio.

Si prenda ora in considerazione lo schema di interfacciamento del sistema con la rete elettrica

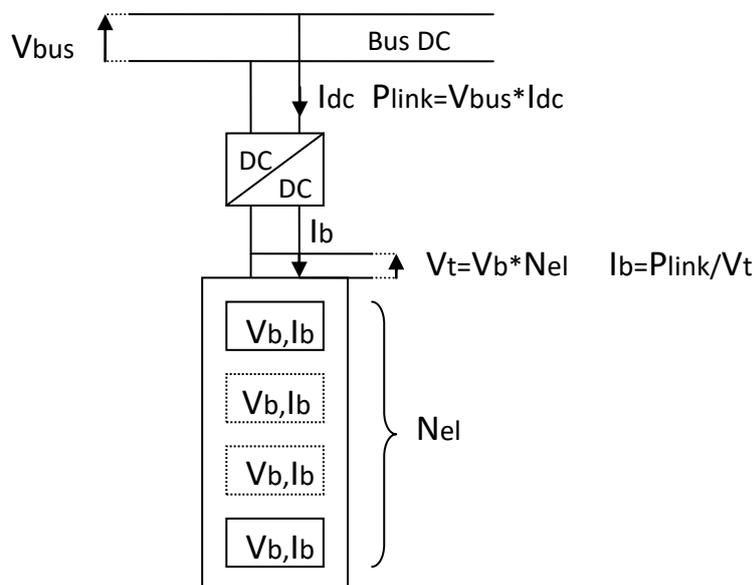


Figura 14. Interfacciamento con la rete

L'idea è di considerare costante la potenza di ricarica delle batterie e di variare da un minimo ad un massimo il numero di moduli base, messi in serie, che compongono il sistema di accumulo, considerando una tensione minima di 144 V (12 moduli) ed una massima di 432 V (36 moduli): una volta stabilito il numero di moduli è possibile calcolare, considerando una restrizione temporale sul ciclo di ricarica (posto ad un massimo di 7 ore giornaliere), il costo del sistema e l'energia che esso può assorbire/erogare in un ciclo di carica/scarica, con il conseguente risparmio in bolletta.

E' possibile quindi impostare il seguente algoritmo

- 1) Si fissa un numero di moduli  $N_{el}$
- 2) Il costo del sistema sarà pari a  $C_s = N_{el} * (\text{Costo case} + \text{Costo Mux} + \text{Costo test}) + \text{Costo BMS} + \text{Costo DC/DC}$
- 3) La corrente di ricarica delle batterie è pari a  $P_{link} / (N_{el} * 12)$
- 4) Si ricaricano le batterie per 7 ore o per 70 Ah in meno di sette ore, si calcola l'energia assorbita
- 5) Si calcola l'energia erogata di notte, il risparmio è pari a  $\text{Risp} = \text{Costo Energia} * E \text{ erogata}$
- 6) Si divide il costo del sistema per il risparmio a ciclo,  $\text{Ciclirecupero} = C_s / \text{Risp}$
- 7) Si varia il numero  $N_{el}$  di moduli e si torna al punto 2)

Per calcolare il tempo di ammortamento con un sistema di celle nuove basta variare il costo del sistema di accumulo, considerando il costo delle celle e sottraendo quello dei test di verifica delle loro caratteristiche (ipotesi in realtà restrittiva, a volte le verifiche servono comunque).

Fissando la  $P_{link} = 2600 \text{ W}$  ed utilizzando le stime di costo fornite precedentemente si ricava il seguente andamento del tempo di ammortamento dell'investimento, espresso in cicli.

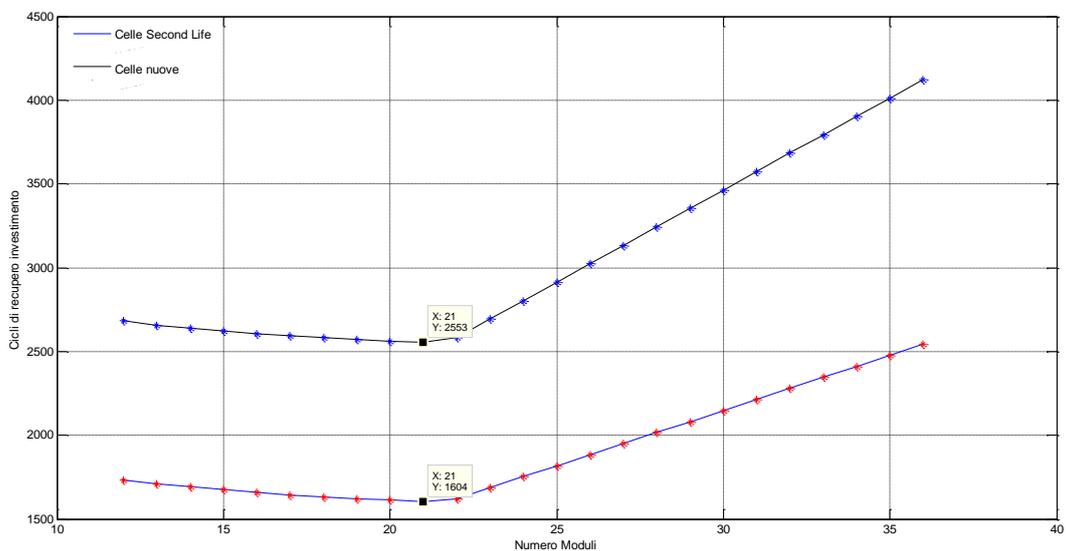
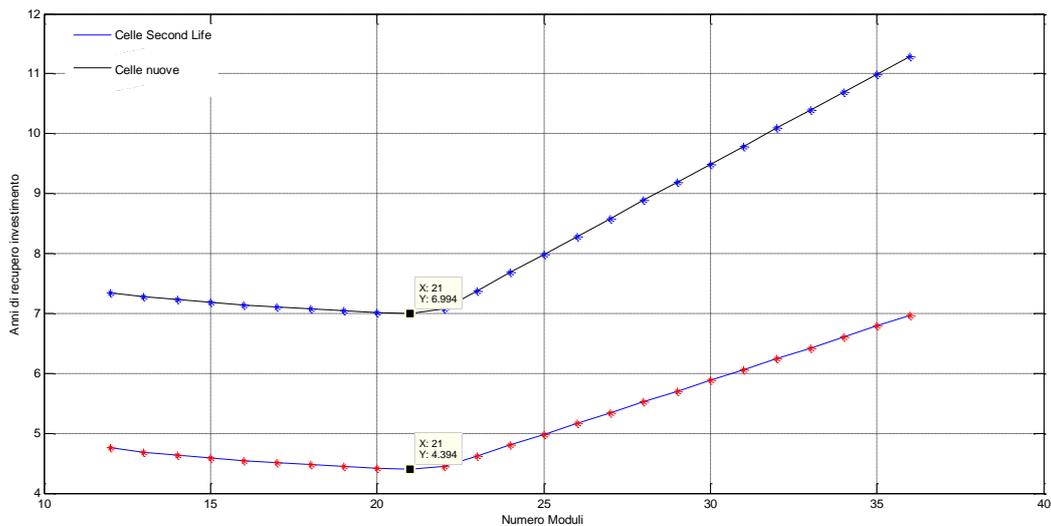


Figura 15. Tempo di rientro dell'investimento in cicli

La figura seguente esprime lo stesso andamento, ma sulla base degli anni di ammortamento.



**Figura 16. Tempo di rientro dell'investimento in anni**

Il dimensionamento ottimo dal punto di vista dell'investimento è quello che considera l'utilizzo di 21 moduli base: il numero di cicli di ammortamento è pari a 1604, che si traducono in un investimento di circa quattro anni. A questo punto appare evidente l'importanza di disporre di un metodo di previsione della vita residua delle celle su un ciclo predefinito: nel caso presente la ricarica e la scarica avvengono ad una corrente massima di 10 A, con i dati dei test sul ciclo light e considerando che in questa applicazione non si esegue la scarica completa delle batterie e non le si sottopone ad una corrente impulsiva si può ipotizzare che l'investimento sia fattibile, ma andrebbero eseguite delle prove vita per approfondire lo studio.

E' interessante notare che il costo di un secondo investimento nel sistema è molto contenuto, si tratta di smontare le vecchie celle e rimontare nuove celle ritirate dall'utilizzo automobilistico: considerando una spesa massima di 2000 Euro questa si ripaga in 324 Cicli, ovvero meno di un anno.

Quindi si può concludere:

Tempo di ammortamento del primo investimento:	1604 Cicli	–	4 anni 5 mesi
Tempo di ammortamento del secondo investimento:	324 Cicli	–	0 anni 11 mesi
Tempo di ammortamento investimento su celle nuove	2553 Cicli	–	7 anni 0 mesi

Il ragionamento fatto porta ad una stima per eccesso del tempo di ammortamento in quanto trascura alcuni benefici portati dall'adozione del sistema di accumulo e non tiene conto dell'abbattimento dei costi dovuto ad una produzione su larga scala. Ipotizzando una produzione su larghissima scala dei componenti i prezzi scenderebbero in modo significativo, ponendo per es:

Costo del case: 100 Euro  
 Costo del MUX: 50 Euro  
 Costo del BMS: 150 Euro  
 Costo di smontaggio/verifica cella 5 Euro

Si ricava:

Tempo di ammortamento del primo investimento:	753 Cicli	–	2 anni 1 mese
Tempo di ammortamento investimento su celle nuove	1822 Cicli	–	5 anni 0 mesi

L’algoritmo presentato si limita a calcolare il costo di realizzazione del sistema di accumulo ed il numero di cicli necessari per compensarlo, come si è detto è possibile introdurre altre considerazioni economiche, ma soprattutto, disponendo di uno strumento di previsione della vita residua delle batterie, è possibile ottimizzare non il rientro dal costo di investimento, ma il guadagno totale di esercizio del sistema: infatti variando il numero di moduli varia anche la corrente che essi assorbono, e quindi la vita del sistema. Riprendendo in considerazione la figura 6:

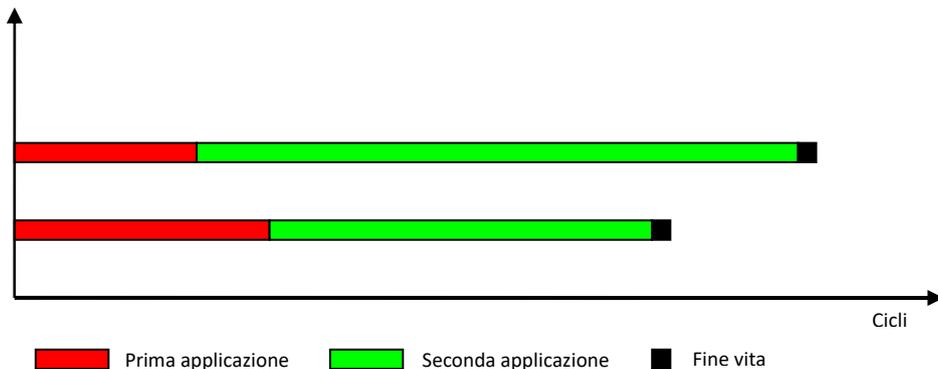


Figura 6. Cicli vita nelle due applicazioni

si deduce che questo approccio può essere esteso a tutta la vita, nella prima e seconda applicazione, delle batterie, massimizzando quindi il rendimento globale dell’investimento. In [10] viene fornita una stima dei costi di realizzazione di un sistema di accumulo realizzato con celle al litio per taglie di 10 e 25 kWh.

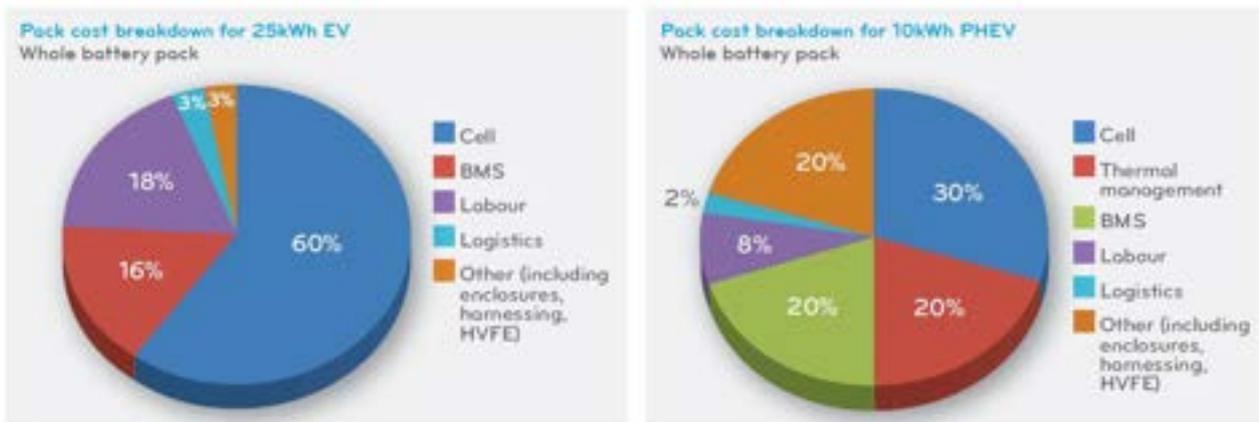


Figura 17. Costi di un sistema di accumulo elettrochimico

Si vuole valutare il costo nel caso di un sistema realizzato con celle in Second Life: in tal caso occorrerebbe, in prima approssimazione, raddoppiare la percentuale della parte relativa al lavoro ed azzerare il costo delle celle (il lavoro raddoppia perché le celle vanno smontate da un case e montate su un altro), mentre rimarrebbero invariati o leggermente superiori i costi degli altri componenti associati al sistema. Quindi in prima approssimazione, con riferimento alla figura 17, si ha:

- Riduzione costi sistema di accumulo 10 kWh: 20 %
- Riduzione costi sistema di accumulo 25 kWh: 40 %

Considerando (fonte IEA) per le celle al litio un costo di 220 Euro al kWh è possibile stimare il costo totale dei due sistemi e la riduzione di prezzo conseguibile con l’adozione di celle Second Life.

Costo sistema 10 kWh con celle nuove	733 Euro
Costo sistema 25 kWh con celle Second Life	586 Euro
Costo sistema 25 kWh con celle nuove	9170 Euro
Costo sistema 25 kWh con celle Second Life	5500 Euro

All'aumentare della taglia del sistema aumenta la percentuale di spesa legata alle celle elettrochimiche, di conseguenza aumenta anche il risparmio ottenibile operando con celle da utilizzare in Second Life.

## 2.5 Progetti pilota

In generale quando si parla di "Second Life" si tende a considerare il riutilizzo di moduli da trazione elettrica in applicazioni stazionarie costituite o da sistemi di compensazione delle variazioni di potenza di rete (fino ad MT) o da sistemi associati ad utilizzi casalinghi: le potenzialità di sviluppo di un mercato basato su celle provenienti da un utilizzo automobilistico sono molto attraenti per gli investitori: la figura seguente mostra le previsioni di sviluppo del mercato dei veicoli elettrici e quelle, ad esso collegato, della possibile riserva di accumulo disponibile per la Second Life [11].

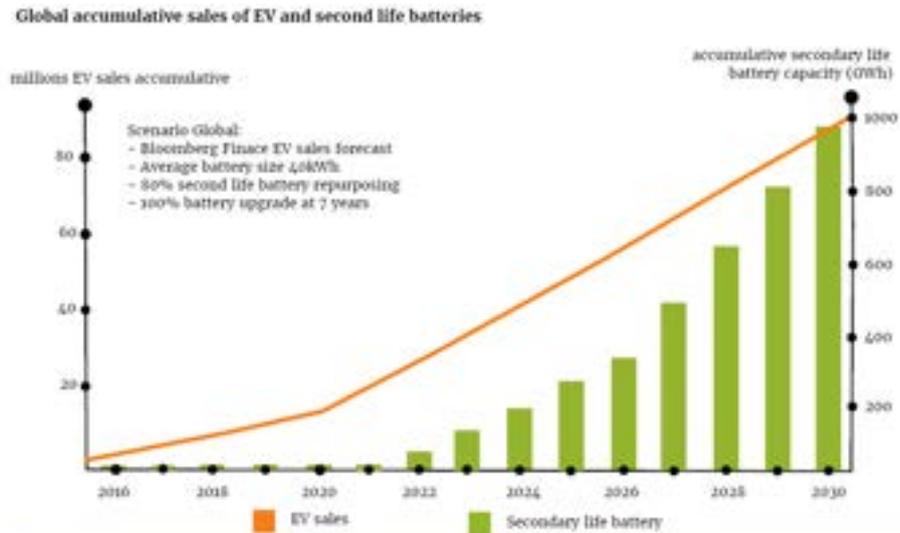


Figura 18. Sviluppo dei veicoli e disponibilità di accumulo per applicazioni in Second Life

La figura mostra come ci si attenda dalla Second Life, per il 2030, una possibilità di storage pari ad un TeraWatt: una disponibilità di accumulo a basso costo che non può non essere presa in considerazione in uno scenario di investimenti futuri, si ripropone il costo attuale di un sistema di accumulo stazionario per le taglie di 10 e 25 kWh già visto precedentemente.

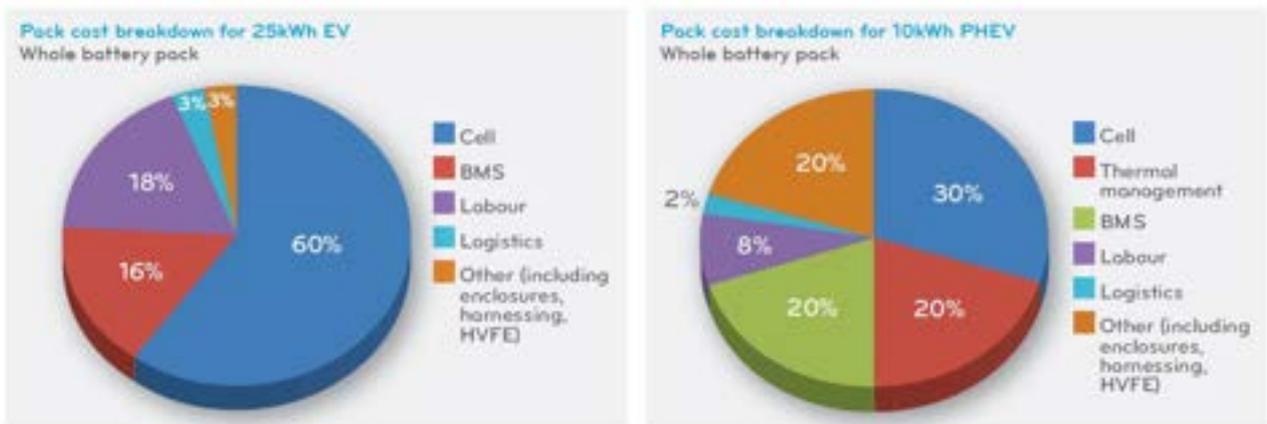


Figura 17. Costi di un sistema di accumulo elettrochimico

Quanto visto finora giustifica il fatto che attualmente oltre agli studi nel settore sono in corso molti investimenti in progetti pilota: in genere si opera in base ad un accordo tra un produttore di batterie, un produttore di energia ed un costruttore automobilistico, di seguito vengono illustrati brevemente alcuni di questi progetti.

## Nissan/Sumimoto

La figura 1, riproposta per semplicità di lettura

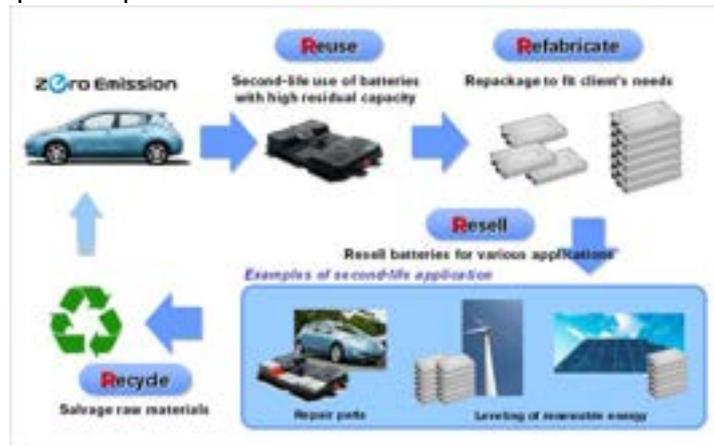


Figura 1. Brochure Nissan/Sumimoto

presenta schematicamente il progetto realizzato da Nissan e Sumimoto [12], la macchina di riferimento è la Leaf, la brochure sintetizza quanto detto in precedenza: il modulo batterie può essere riparato e riutilizzato per la trazione oppure le celle vengono inserite in un nuovo pacco, con caratteristiche e funzionalità diverse. Il pacco di seconda generazione viene utilizzato come buffer in applicazioni legate alle energie rinnovabili: in particolare Sumitomo, come visto in precedenza, menziona l'utilizzo residenziale con le batterie poste tra la rete ed un sistema di generazione fotovoltaico.



Figura 12. Utilizzo residenziale

Per il Giappone la Nissan opera insieme a Sumitomo, per gli Usa ha stretto accordi con Greencharge, in Europa con Enel e la Eaton: l'accordo con Enel ed Eaton prevede di utilizzare il veicolo come sistema di accumulo per la rete elettrica (approccio V2G, Vehicle to Grid) su uffici della stessa Nissan, per poi analizzare possibili utilizzi in Second Life del sistema degradato.

### Nissan, Chevrolet, General Motor

La General Motor ha realizzato sistemi di accumulo per i suoi data center posti a Milford (Michigan) utilizzando batterie provenienti dalla Nissan Leaf e dalla Chevrolet Volt.



Figura 19. Sistema di accumulo realizzato con batterie Chevrolet

### Bosch, BMW, Vattenfall

La Vattenfall è una produttore energetico Svedese, ha stretto un accordo con la Bosch e la BMW per il riutilizzo in Second Life delle batterie della BMW I3, le batterie verranno riutilizzate per i sistemi di compensazione della rete elettrica, i sistemi avranno una capacità di 2 MWh per una potenza di 2 MW, la Bosch si occuperà di ricondizionare le batterie [14].

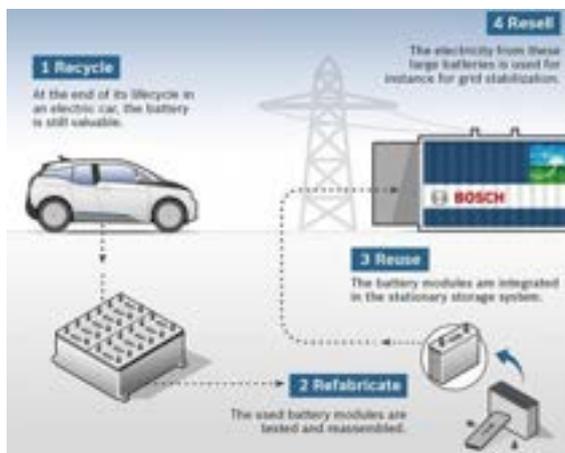
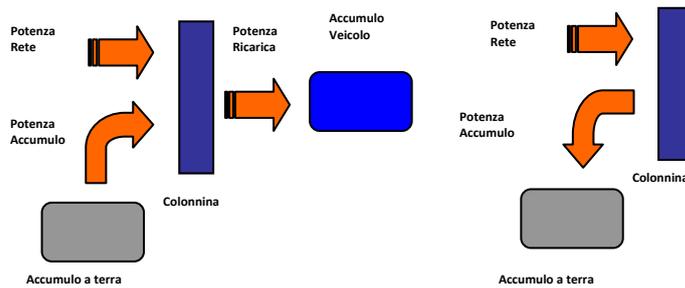


Figura 20. Accordo Bosch, BMW, Vattenfall

### Progetto Everest

Il progetto Inglese Everest (Electric Vehicle Embedded Renewable Energy Storage and Transmission) svolto in tre anni, dal 2013 al 2015 [15], prende in considerazione il tema della ricarica veloce dei veicoli elettrici/ibridi Plug In: per eseguirla è necessario impegnare dalla rete potenze che vanno dall'ordine dei 20 kW a quello dei 150 kW (Tesla), questo comporta, specie in caso di grande diffusione dei veicoli, la necessità di rafforzare la rete elettrica, con costi molto alti. Una possibile soluzione per limitare la potenza di rete è quella di considerare un sistema di accumulo stazionario che venga caricato a bassa potenza per un lungo tempo e che partecipi alla ricarica veloce del veicolo, per poi essere nuovamente ricaricato dalla rete.



**Figura 21. – Limitazione della potenza prelevata in rete**

Il progetto fa riferimento all'idea che le fonti energetiche che alimentano la colonnina siano rinnovabili e che il sistema di accumulo sia modulare e realizzato tramite batterie ritirate dall'utilizzo automobilistico



**Figura 22. Presentazione progetto EVEREST**

il sistema di accumulo è realizzato in modo modulare, ed inserito in un container in condizioni di temperatura controllate



**Figura 23. Schema del container per il sistema di accumulo EVEREST**

Le batterie, interfacciate con la rete, alimentano le colonnine di ricarica del veicolo.



**Figura 24. Veicolo in ricarica con container Everest**

Il progetto EVEREST è stato finanziato dal dipartimento per l'energia ed i cambiamenti climatici Inglese, ha un valore di 3.4 milioni di Sterline, pari a 4.03 milioni di Euro, i partner erano:

- EValu8 Transport Innovations Limited – lead partner
- Future Transport Systems – programme management and technical lead
- Lotus Engineering – communications controller and technical support
- Circontrol – power management conditioning
- The APT Group – electric vehicle charging systems
- Goodwolfe Energy – cell and battery system technologies

### Isola di Pampus

L'isola di Pampus è una piccola isola artificiale dei Paesi Bassi, un soggetto ideale per installare un sistema di generazione ad energie rinnovabili, completato anche dalla presenza di un Diesel ed un sistema di accumulo che permetta di ottimizzare i punti di lavoro dei generatori.

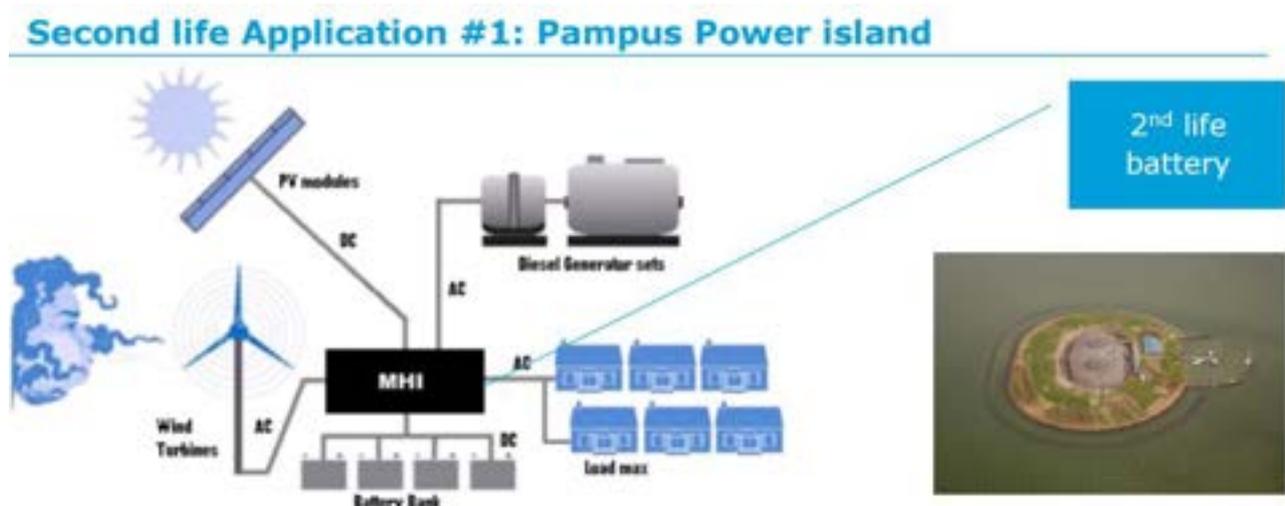


Figura 25. Sistema di generazione/accumulo per l'isola di Pampus

L'idea del progetto è quella di rendere l'isola autonoma dal punto di vista energetico e di dimensionare il sistema di generazione accumulo in modo che il Diesel sia solo una riserva in caso di emergenza, la capacità stimata del sistema di accumulo è di 35 kWh, le batterie provverranno dalla Golf elettrica. Il consorzio che si occupa del progetto è formato da operatori pubblici (Università) e soggetti privati.

### 3 Conclusioni

Il lavoro è consistito in una analisi dello stato attuale delle attività che ruotano attorno al tema della Second Life, ovvero del riutilizzo di batterie da trazione per una seconda applicazione di tipo stazionario. Come è stato mostrato si tratta di un tema di forte interesse in quanto il riutilizzo di batterie da trazione comporta un notevole risparmio nella realizzazione di un sistema di accumulo stazionario, e la diffusione dei veicoli elettrici ed ibridi prevista nei prossimi anni sarà tale da mettere a disposizione una notevole quantità di queste batterie.

Allo stato attuale, pur essendoci una notevole attività di studio e di realizzazioni pratiche attorno a questa tematica, non esiste una definizione formale di 'Second Life' ed una definizione dei compiti e delle responsabilità delle varie parti, costruttori di celle, di moduli ed utilizzatori finali: il lavoro riporta la proposta fatta dalla European Association of Advanced Rechargeable Batteries (Recharge) che ha le caratteristiche per essere adottata come riferimento internazionale.

Con l'esperienza sviluppata da Enea nel settore delle prove vita di celle elementari e della realizzazione di moduli di sistemi di accumulo è stato possibile mostrare le principali problematiche connesse all'utilizzo di celle degradate in sistemi di accumulo stazionario e presentare uno studio di fattibilità semplificato per una piccola applicazione industriale.

Nell'ambito della ricerca di sistema Enea sta sviluppando una serie di prove vita su celle degradate e sta cercando di elaborare cicli di laboratorio equivalenti a quelli relativi ad applicazioni reali, in queste attività collabora anche con soggetti esterni (UniPisa, UniRoma2).

Per il futuro l'ente si propone di realizzare sistemi di previsione di vita su applicazioni predeterminate e soprattutto di affrontare la costruzione di moduli di batterie basati su celle degradate.

## 4 Riferimenti bibliografici

1. Manlio Pasquali, Francesco Vellucci , “Analisi sperimentali per la “second life” di celle litio-ione”, Report RdS/PAR2013/190
2. Manlio Pasquali, Francesco Vellucci, “Prosecuzione delle prove di "second life" su celle litio-ione: approfondimento ad una applicazione stazionaria”, Report RdS/PAR2014/179
3. Massimo Ceraolo, Romano Giglioli , “Procedure di prova per la determinazione della capacità residua in termini di “second life” degli accumulatori al Li delle auto elettriche”, Report RdS/2012/252
4. Stefano Cordiner, Vincenzo Mulone, “Studio su prove di invecchiamento e degrado di celle al litio”, Report RdS/PAR2014/180
5. RECHARGE aisbl, “Re-use and Second use of Rechargeable Batteries” October 2014 / v.14
6. sito spiers new technologies <http://www.spiersnewtechnologies.com>
7. Sathre, R., Scown, C.D., Kavvada, O., Hendrickson, T.P., 2015. Energy and climate effects of second-life use of electric vehicle batteries in California through 2050. J. Power Sources 288, 82–91. doi:10.1016/j.jpowsour.2015.04.097
8. Saxena, S., Le Floch, C., MacDonald, J., Moura, S., 2015. Quantifying EV battery end-of-life through analysis of travel needs with vehicle powertrain models. J. Power Sources 282, 265–276. doi:10.1016/j.jpowsour.2015.01.072
9. F. Vellucci, G. Pede, A. Mariani, F. D'Annibale, “ Sviluppo e realizzazione di moduli batterie litio-ioni per avviamento e trazione non automotive”, Report RdS/2012/087
10. Johnson Matthey Battery Systems ‘Our Guide to Batteries’ 3rd edition © 2015
11. IEA, “Global EV outlook 2016”, © OECD/IEA 2016
12. sito Sumimoto <http://www.sumitomocorp.co.jp/english/business/article/id=263>
13. sito greencarreports, [http://www.greencarreports.com/news/1098734\\_chevy-nissan-reveal-second-life-uses-for-electric-car-batteries](http://www.greencarreports.com/news/1098734_chevy-nissan-reveal-second-life-uses-for-electric-car-batteries)
14. sito energystorage, <http://www.energy-storage.news/news/bosch-bmw-vattenfall-resurrect-more-ev-batteries-for-second-life-as-large-s>
15. Sito Connected Energy, [http://www.c-e-int.com/pages/everest\\_237745.cfm](http://www.c-e-int.com/pages/everest_237745.cfm)
16. The Pampus Project Haike van de Vegte, DNV GL – Energy Lille, November 25, 2015