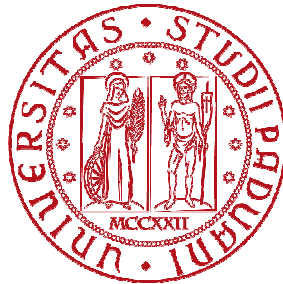


UNIVERSITA' DEGLI STUDI DI PADOVA

Facoltà di INGEGNERIA

*Corso di Laurea in
INGEGNERIA ELETTRICITÀ*



Tesi di Laurea:

***“Confronto tecnico - economico tra le
tecnologie per l’accumulo elettrochimico di
energia per la trazione elettrica”***

***(“Technical–economic comparison between the electrochemical
energy storage technologies for the electric traction”)***

Relatore: Prof. Ing. ARTURO LORENZONI

Laureando: NICOLA BONFANTE

a.a. 2009 - 2010

INDICE GENERALE

• Sommario	5
• Introduzione	7
• Capitolo 1 <i>L'AUTO ELETTRICA</i>	9
▪ 1.1 <i>Considerazioni generali</i>	9
▪ 1.2 <i>Breve storia</i>	11
▪ 1.3 <i>Funzionamento e caratteristiche (accenno)</i>	12
• 1.3.1 <i>Efficienza, consumi e prestazioni</i>	13
• 1.3.2 <i>Costi</i>	15
• 1.3.3 <i>Impatto ambientale</i>	15
• Capitolo 2 <i>L'ACCUMULATORE DI ENERGIA, ASPETTI TECNICI</i>	17
▪ 2.1 <i>Generalità</i>	17
▪ 2.2 <i>Caratteristiche tecniche e non</i>	18
▪ 2.3 <i>Tipologie di accumulatori</i>	21
▪ 2.4 <i>Principio di funzionamento</i>	22
• 2.4.1 <i>Batteria al piombo acido</i>	22
• 2.4.2 <i>Batterie alcaline</i>	24
• 2.4.2.1 <i>Batteria nichel – cadmio (Ni – Cd)</i>	25
• 2.4.2.2 <i>Batteria nichel metallo idruri (NiMH)</i>	27
• 2.4.2.3 <i>Batteria nichel - zinco (Ni - Zn)</i>	28
• 2.4.3 <i>Batteria zinco – aria</i>	29
• 2.4.4 <i>Batterie al litio</i>	30
• 2.4.4.1 <i>Batteria litio – ioni (Li – Ion)</i>	31
• 2.4.4.2 <i>Batterie litio – polimeri (Li – Pol)</i>	32
• 2.4.5 <i>Batteria nichel - cloruro di sodio (Ni – NaCl)</i> <i>(batterie Z.E.B.R.A.)</i>	34
▪ 2.5 <i>Confronto tra i tipi di batteria</i>	37
• Capitolo 3 <i>ASPETTI AMBIENTALI</i>	41
▪ 3.1 <i>Generalità</i>	41

▪ 3.2	<i>Tossicità</i>	41
▪ 3.3	<i>Analisi quantitativa</i>	43
•	3.3.1 <i>Veicoli a propulsione elettrica pura (BEV)</i>	47
•	3.3.2 <i>Veicoli ibridi (HEV)</i>	50
•	3.3.3 <i>Discussione dei risultati</i>	52
▪ 3.4	<i>Analisi qualitativa</i>	53
•	3.4.1 <i>Nichel – zinco (Ni – Zn)</i>	53
•	3.4.2 <i>Litio – polimeri (Li – Pol)</i>	53
•	3.4.3 <i>Zinco – aria</i>	54
•	3.4.4 <i>Considerazioni</i>	54
•	Capitolo 4 <i>ASPETTI ECONOMICI</i>	57
▪	4.1 <i>Generalità</i>	57
▪	4.2 <i>Stima del prezzo di una specifica tecnologia</i>	57
▪	4.3 <i>Qualche dato</i>	61
•	4.3.1 <i>Pb - acido</i>	62
•	4.3.2 <i>Ni – Cd</i>	63
•	4.3.3 <i>NiMH</i>	63
•	4.3.4 <i>Litio</i>	63
•	4.3.5 <i>ZEBRA</i>	63
▪	4.4 <i>Mercato mondiale</i>	64
•	Capitolo 5 <i>VALUTAZIONI GENERALI, VERSO IL FUTURO</i>	65
▪	5.1 <i>Generalità</i>	65
▪	5.2 <i>Il confronto</i>	66
•	5.2.1 <i>Da un punto di vista politico</i>	66
•	5.2.2 <i>Da un punto di vista dei produttori e dei consumatori</i>	69
▪	5.3 <i>Conclusioni generali e valutazioni complessive</i>	70
•	Capitolo 6 <i>BATTERIE AL LITIO: STATO, PROSPETTIVE E FUTURO</i>	75
▪	6.1 <i>Generalità</i>	75
▪	6.2 <i>Tecnologia agli ioni di litio</i>	76
•	6.2.1 <i>Progressi a breve termine</i>	77
▪	6.3 <i>Le batterie al litio nel futuro</i>	81
▪	6.4 <i>Conclusioni</i>	81

- **Capitolo 7** *BATTERIE Z.E.B.R.A., UNA VALIDA ALTERNATIVA*.....83
 - **7.1** *Generalità*.....83
 - **7.2** *Efficienza*.....85
 - **7.3** *Costo potenziale delle batterie ZEBRA*.....86
 - **7.4** *Sicurezza*.....88
 - **7.5** *Alta temperatura*.....88
 - **7.6** *Considerazioni complessive*.....89

- **Conclusioni**.....91

- **Bibliografia**.....93

SOMMARIO

In questo elaborato si vuole fare una panoramica sugli accumulatori di energia per trazione elettrica mettendoli tra di loro a confronto per poter capire lo stato della tecnologia raggiunto, e capire di conseguenza quali sono le soluzioni più indicate e promettenti per il prossimo futuro, andando ad evidenziare le loro potenzialità e le loro peculiarità principali.

Partendo con una breve introduzione sull'auto elettrica, indispensabile per avere un'idea del contesto e per capire la cruciale importanza della batteria nel complesso del veicolo, si passa poi ad esaminare gli accumulatori sotto tre punti di vista fondamentali:

- *aspetti tecnici;*
- *aspetti ambientali;*
- *aspetti economici.*

Sotto ogni aspetto le batterie vengono descritte, analizzate e commentate, mentre alla fine vengono sempre tratte delle conclusioni accompagnate da considerazioni che motivino ed evidenzino i risultati ottenuti.

Si tende sempre a mantenere due linee diverse (ma vicine) per distinguere i veicoli a propulsione elettrica pura (BEV) da quelli ibridi (HEV) che, come si vedrà, hanno esigenze diverse a livello di accumulatore di energia elettrica.

Sia considerando singolarmente gli aspetti prima elencati, sia nelle considerazioni generali fatte alla fine (che vanno a raggruppare tutti e tre gli aspetti insieme) si arriva ad evidenziare che la tecnologia agli *ioni di litio (Li – Ion)* rappresenta, ad oggi, la soluzione più adatta e promettente sia per i BEV che per gli HEV; la tecnologia è comunque ancora in una grande fase di ricerca e sviluppo: sono infatti ancora da risolvere numerose questioni (tra cui la sicurezza) e si vuole comunque cercare di arrivare a prestazioni ancora più alte di quelle attualmente disponibili in modo da rendere i veicoli elettrici (soprattutto i BEV) sempre più competitivi nei confronti dei comuni veicoli con motore a combustione interna.

Accanto alla tecnologia Li – Ion si evidenzia che altre valide alternative sono la tecnologia ZEBRA (batteria NaNiCl a sali fusi) nel campo dei BEV e la tecnologia NiMH (nichel metallo idruri) nel campo degli HEV. Mentre la tecnologia NiMH è già attualmente utilizzata in quasi tutti i veicoli ibridi in commercio ed è quindi una tecnologia piuttosto matura, la tecnologia ZEBRA è una

tecnologia più recente che non si è ancora diffusa così largamente (causa anche la minore diffusione di veicoli elettrici puri rispetto invece a quelli ibridi che stanno pian piano emergendo sempre più in maniera consistente).

Si è voluto per ciò alla fine guardare più da vicino le tecnologie Li – Ion e ZEBRA analizzandole un po' più nel dettaglio, in quanto quella al litio, come già detto, è destinata a diventare la protagonista assoluta, ma anche la ZEBRA, grazie alle sue numerose peculiarità, potrà giocare un ruolo importante nel campo dei BEV (veicoli che molto presto sono destinati a prender piede nel mercato e nelle strade a livello mondiale).

INTRODUZIONE

L'accumulatore di energia elettrica rappresenta il cuore di un veicolo elettrico, ed oltre ad essere uno dei componenti fondamentali dal punto di vista tecnico, rappresenta anche una grossa fetta del costo, e quindi del prezzo, del veicolo.

Tutto ciò è più che sufficiente per comprendere quanto sia importante studiare e scegliere la soluzione migliore possibile per poter rendere il veicolo elettrico il più competitivo sia dal punto di vista prestazionale che dal punto di vista economico nei confronti dei classici veicoli con motore a combustione interna: questi fattori sono infatti gli aspetti chiave che possono permettere ad un veicolo elettrico (e non solo) di inserirsi nel mercato e di diffondersi progressivamente su larga scala.

L'importanza dello sviluppo dei veicoli elettrici è sempre maggiore viste le numerose problematiche che ormai già da anni continuano a sorgere, soprattutto a livello ambientale.

Le tecnologie di accumulo per trazione sono evidentemente numerose, capitanate dalla più antica e matura tecnologia al piombo, che ormai, nonostante grandi livelli di sviluppo e miglioramento siano stati ottenuti nel corso degli anni, può trovare interesse solamente per la sua economicità, in quanto a livello di prestazioni è nettamente inferiore alle concorrenti.

Altre tecnologie nel corso degli anni sono state sviluppate, con i loro pregi ed i loro difetti, ma tutte risultano però avere il principale problema della densità di energia e della densità di potenza: il tallone d'Achille dei veicoli elettrici è infatti quello dell'autonomia, assolutamente inconfondibile con i livelli raggiungibili dai veicoli con motore a combustione; le batterie hanno il problema di avere, rispetto ai carburanti tradizionali (gasolio, benzina, ecc.) una densità energetica tremendamente inferiore, da cui nasce la necessità di volumi e spazi improporzionabili per poter ottenere le medesime prestazioni dei veicoli a combustione. Ecco la necessità di investire in maniera importante nella ricerca e nello sviluppo nel campo degli accumulatori, ricerca e sviluppo che ormai da qualche anno si sta concentrando sempre di più sulla tecnologia al *litio*: questa tecnologia, come si vedrà, risulta essere infatti superiore (in alcuni casi anche nettamente) alle concorrenti sotto tutti i punti di vista (tecnico, economico, ambientale) e risulta quindi essere la chiave del futuro della trazione elettrica (sia elettrica pura che ibrida).

Hanno comunque evidenziato alte potenzialità anche la tecnologia *ZEBRA* per quanto riguarda i veicoli elettrici puri, e la tecnologia *nicel metallo idruri (NiMH)* per quanto riguarda gli ibridi; queste tecnologie sono quindi delle validissime alternative (la tecnologia NiMH è la più usata in

assoluto attualmente nei veicoli ibridi e già quindi piuttosto matura) anche se in futuro probabilmente saranno destinate comunque ad essere “ammazzate” dalla tecnologia al litio che si sta sviluppando veramente con un ritmo incalzante (considerazioni ed analisi sulla tecnologia al litio rischiano di diventare obsolete in tempi veramente ristretti).

Analizzare le tecnologie sotto vari punti di vista diventa indispensabile per poter capire a pieno i motivi che portano a fare certe considerazioni e a trarre determinate conclusioni: aspetti tecnici, ambientali ed economici sono dei fattori quasi inscindibili tra di loro se si vuole fare una valutazione realistica ed efficace, ed è quindi doveroso, dopo averli analizzati separatamente, fare delle considerazioni a livello globale che tengano conto di tutti gli aspetti e che inquadrino il problema nel suo complesso.

CAPITOLO 1

L' AUTO ELETTRICA

1.1 *CONSIDERAZIONI GENERALI*

Il principale riferimento per quanto riguarda il campo dell'elettrificazione della mobilità elettrica è sicuramente l'**auto elettrica**. L'automobile rappresenta infatti uno dei beni di fondamentale importanza per l'uomo già da decine di anni in quando risulta essere il mezzo di trasporto più usato e sempre più alla portata di tutti (almeno nei paesi più sviluppati).

Sebbene l'auto elettrica non sia certamente un'invenzione recente (nacque già nella prima metà dell'800), gli studi e gli interessi nei suoi riguardi sono incredibilmente cresciuti negli ultimi anni, alimentati sicuramente da un incalzante sviluppo tecnico-scientifico, ma soprattutto favoriti da problematiche sempre più attuali che interessano l'intero pianeta: tra tali argomenti spiccano sicuramente l'**esauribilità dei combustibili fossili**, l'**inquinamento ambientale** (rilevante è l'emissione di CO₂ ed altri gas serra, causa del ben noto fenomeno dell'*effetto serra*), e il **surriscaldamento globale**.

Per quel che riguarda il campo della mobilità e dei trasporti l'elettrificazione sembra essere uno degli indirizzi migliori ed efficaci per la soluzione di tali problemi. Un'auto completamente elettrica non necessita infatti di un carburante derivante da combustibili fossili (gasolio, benzina, gpl, metano), ma solo di energia elettrica; per quanto riguarda invece le emissioni non produce fumi di scarico né vapor d'acqua e, complessivamente, produce un inquinamento praticamente nullo se rifornita con energia prodotta da fonti rinnovabili (si preferirebbe uno scenario in cui le auto elettriche utilizzassero energia elettrica prodotta da sorgenti rinnovabili o che operino con il sequestro della CO₂ piuttosto che energia elettrica proveniente da centrali a carbone per esempio).

Le auto elettriche sono ormai diventate una realtà in diverse città europee e presto lo diventeranno anche in Italia. Il campo della mobilità e della trazione elettrica diventerà fondamentale in uno scenario a breve termine dove le problematiche ambientali ed energetiche saranno sempre più al centro dell'attenzione da parte di tutti i Paesi.

Nel nostro Paese la Camera dei Deputati, con una mozione del 13 gennaio 2010, ha riconosciuto alla mobilità elettrica un grande potenziale per la salvaguardia dell'ambiente e ha impegnato il Governo ad adottare una serie di provvedimenti come la creazione di un adeguato

sistema di ricarica dei veicoli, applicabile al trasporto pubblico e privato, e la predisposizione di tariffe differenziate dell'energia in funzione dei tempi e dei modi di ricarica, in modo da coniugare le esigenze dei clienti con le disponibilità della rete elettrica.

Anche l'Europa spinge in questa direzione: lo scorso settembre, il presidente della Commissione José Manuel Barroso, ha dichiarato che la riduzione della CO₂ prodotta dal settore dei trasporti così come lo sviluppo delle automobili pulite ed elettriche saranno la priorità nei prossimi 5 anni. I trasporti dell'Unione Europea assorbono infatti i due terzi dei consumi di petrolio e generano il 28 % delle emissioni di CO₂. Se non vi saranno provvedimenti consistenti, le emissioni di gas clima-alteranti prodotte dal settore dei trasporti sono destinate a crescere pericolosamente, a differenza di altri settori dove la riduzione è già iniziata. Interventi di riduzioni delle emissioni di CO₂ generati dal settore dei trasporti sono quindi rilevanti ai fini di contenimento del riscaldamento globale entro i due gradi centigradi.

In questo quadro, **l'elettrificazione del trasporto su gomma** (autovetture, veicoli commerciali leggeri, motocicli, scooter ecc.) potrebbe contribuire efficacemente all'obiettivo di uno sviluppo più sostenibile potendosi conciliare con la generazione da fonti alternative (rinnovabili e nucleare) e con i grandi impianti a combustibili fossili che possono operare con sistemi di sequestro della CO₂.

Queste considerazioni possono far ben intuire quanto sia importante lo studio e la realizzazione di veicoli elettrici sempre più efficienti e competitivi in modo da renderli sempre più confrontabili (in termini di *prestazioni generali* ma soprattutto di *costi*) con gli attuali veicoli con motore a combustione interna.

La parte dell'**accumulo elettrochimico di energia** (la *batteria*) rappresenta un tassello essenziale in un veicolo elettrico, e probabilmente il più importante dato che è sempre stato l'ostacolo maggiore al suo sviluppo e alla sua diffusione: il **problema** principale sta infatti concentrato nella **capacità di poter accumulare grandi quantità di energia in piccoli volumi e in pesi non eccessivi**. Quando si parla quantità di energia riferita ad una massa (o ad un volume) si parla di **densità energetica** e si esprime in **Wh / kg** (Wh / m³). Naturalmente bisogna fare riferimento ai valori di densità energetica resi disponibili dagli attuali carburanti (gasolio, benzina, ecc) per poter fare un confronto con i valori riferiti agli accumulatori di energia e poter fare delle considerazioni (si vedrà nel dettaglio in seguito con l'ausilio di cifre precise).

1.2 BREVE STORIA

Non tutti sanno che l'**auto elettrica** fu una tra i primi tipi di automobile ad essere inventata, sperimentata e commercializzata; era a batteria.

Tra il 1832 ed il 1839 (l'anno esatto è poco certo), l'imprenditore scozzese **Robert Anderson** inventò la prima carrozza elettrica, nella sua forma più cruda. Lo fece mentre il professore **Sibrandus Stratingh** di Groningen, in Olanda, progettò una piccola auto elettrica, costruita dal suo assistente **Christopher Becker** nel 1835.



Il miglioramento delle batterie, dovuto ai francesi Gaston Plante nel 1865 e Camille Faure nel 1881, consentì il fiorire dei veicoli elettrici. Francia e Gran Bretagna furono le prime nazioni testimoni dello sviluppo del mercato delle auto elettriche.

Pochi anni prima del 1900, prima della preponderanza del potente ma inquinante motore a combustione interna, le auto elettriche detenevano molti record di velocità e di distanze percorse con una carica (venne infranto il muro dei 100 km/h).

I veicoli elettrici a batteria prodotti dalle ditte Anthony Electric, Baker Electric, Detroit Electric ed altri, nel corso dei primi anni del ventesimo secolo, per un certo tempo vendettero di più rispetto ai veicoli a benzina. A causa dei limiti tecnologici delle batterie, e della mancanza di una qualsiasi tecnologia di controllo della carica e della trazione (a transistor o a valvola termoionica), la velocità massima di questi primi veicoli elettrici era limitata a circa 32 km/h. In seguito questi veicoli vennero venduti con successo come *town car* (veicoli di quartiere o di paese) a clienti delle classi agiate, e venivano spesso commercializzati come veicoli appropriati al sesso femminile, a causa della loro operatività semplice, pulita e poco rumorosa, che non necessitava di frequenti rabbocchi dell'acqua del radiatore e dell'olio, oppure di sostituzioni delle candele e fermi mensili o annuali in officine specializzate per la pulizia del motore ed altre operazioni di manutenzione.



Thomas Edison ed un'auto elettrica nel 1913

Arrivò poi il sopravvento commerciale incontrastato del motore a combustione interna, e il resto è storia dei giorni nostri...

1.3 FUNZIONAMENTO E CARATTERISTICHE (accenno)

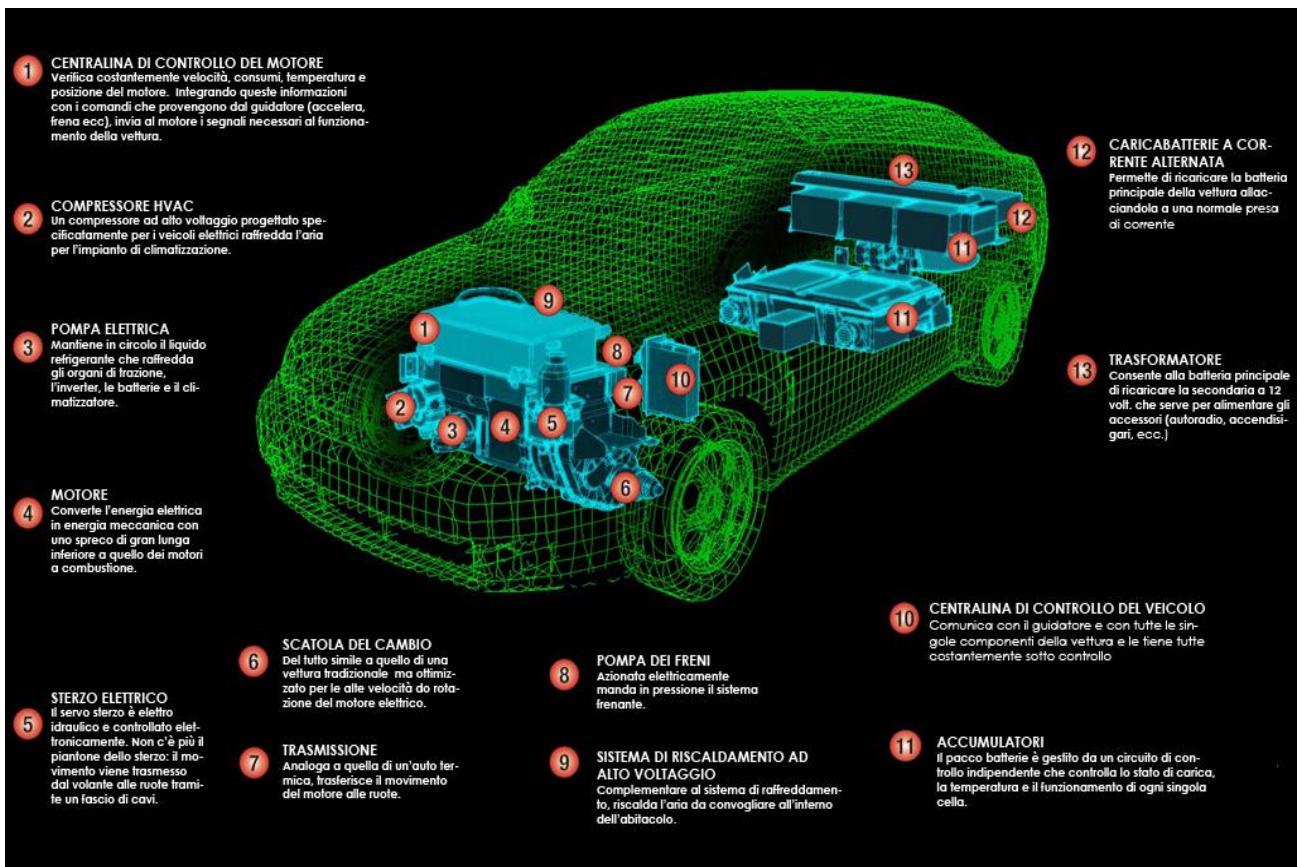
L'auto elettrica è un'automobile con motore elettrico che utilizza l'energia chimica che viene immagazzinata in un "serbatoio" energetico costituito da una o più batterie ricaricabili.

E' dotata di una batteria, di un caricabatteria da collegarsi a una presa di corrente e di un "controller", collegato al pedale dell'acceleratore, che orienta il flusso di elettricità fra la batteria e il motore. Il motore elettrico converte l'energia fornita dalla batteria in energia cinetica dell'automobile; il conducente non deve far altro che accendere l'auto, selezionare il senso di marcia con un apposito interruttore e premere il pedale dell'acceleratore. Come nel motore a combustione interna di un'automobile convenzionale, anche nel motore elettrico il movimento di un elemento rotante viene trasmesso alle ruote da un apparato riduttore.

In generale non è presente alcun sistema di frizione o di cambio automatico. La retromarcia si ottiene invertendo il flusso dell'elettricità circolante nel motore: in tal modo si inverte il verso di rotazione del motore stesso e quindi del riduttore, il quale a sua volta inverte quello delle ruote. Le automobili elettriche sono dotate di un *sistema frenante a recupero*, vale a dire di un sistema che agisce contemporaneamente anche da caricabatteria: quando il conducente toglie il piede dall'acceleratore, il motore diventa un generatore elettrico, che riconverte l'energia cinetica del veicolo in elettricità e la immagazzina nella batteria; la conversione dell'energia cinetica in energia elettrica causa il rallentamento dell'automobile. In generale è comunque presente anche un pedale del freno ed un sistema di frenatura tradizionale, da azionare nel caso in cui sia necessario un arresto rapido.

I veicoli che utilizzano sia motori elettrici che motori a combustione interna (ICE: *Internal combustion engine*) sono noti come **ibridi**. In tali veicoli, gli accumulatori vengono ricaricati da un motore a combustione interna.

I veicoli elettrici più diffusi sono automobili, piccoli autocarri, biciclette motorizzate, scooter elettrici, veicoli per campi da golf, carrelli elevatori e veicoli simili, perché di solito gli accumulatori (nel recente passato) erano poco adatti per applicazioni che necessitassero di un più vasto raggio d'azione oppure di una grande potenza e capacità di carico; questo però ora non ha impedito la realizzazione di camion, moto, pullman e altri mezzi elettrici.



Schema di massima di un'auto elettrica (Ford)

1.3.1 EFFICIENZA, CONSUMI E PRESTAZIONI

I veicoli elettrici hanno complessivamente una maggiore **efficienza energetica** rispetto a quasi tutti i motori a combustione interna. Un motore a benzina ha una efficienza energetica del 25-28%, un diesel si avvicina al 40%, mentre un motore elettrico a induzione in corrente alternata ha

un'efficienza del 90%. Non producono fumi di scarico né gas serra e, complessivamente, producono un inquinamento praticamente nullo se riforniti con energia derivante da fonti rinnovabili.

Le vetture elettriche di serie o convertite tipicamente consumano **da 0,11 a 0,23 kWh/km**.

Per fare un **confronto** con un'auto con motore a combustione si consideri un consumo di 5 litri di benzina per 100 km (dato ottimistico; molte auto necessitano di ben più litri per percorrere 100 km).

Ricordando che:

- $1 \text{ kWh} = 3600000 \text{ J} = 3,6 \text{ MJ}$
- densità della benzina = $700 - 720 \text{ kg/m}^3 = 0,7 - 0,72 \text{ kg/dm}^3$
- $1 \text{ dm}^3 = 1 \text{ litro}$
- potere calorifico inferiore della benzina $\sim 42 \text{ MJ/kg} = 11,67 \text{ kWh/kg}$

si può calcolare l'equivalente consumo in kWh/km per un'auto con motore a combustione con tali caratteristiche:

- per percorrere un km servono $5/100 = 0,05$ litri/km di benzina,
- $0,05 * 0,72 = 0,036$ kg/km di benzina,
- $0,036 * 42 = 1,512 \text{ MJ/km} = \mathbf{0,42 \text{ kWh/km}}$

Si può quindi notare che il consumo specifico di un'auto elettrica è notevolmente più basso (si ricorda che in realtà le auto a combustione possono arrivare a consumi anche ben più elevati).

Si tenga poi presente che **circa 1/3 del consumo della vettura elettrica è dovuto a dispersioni ed al basso rendimento nella ricarica delle batterie**, e quindi non è impensabile un consumo chilometrico inferiore a 0,1 kWh in un futuro molto prossimo, consumo neppure ipotizzabile nelle vetture a combustione interna.

Molte delle vetture elettriche di oggi sono capaci, grazie all'elevata coppia, di **prestazioni in accelerazione** che superano quelle dei veicoli a benzina della stessa potenza.

I veicoli elettrici possono utilizzare una configurazione diretta motore-ruota che aumenta l'efficienza nell'erogazione della potenza. Il fatto che possono avere molteplici motori collegati direttamente alle ruote permette a ciascuna ruota di essere sia propulsiva che frenante, cosa che aumenta la trazione.

I nuovi modelli possono viaggiare per centinaia di chilometri con una sola carica, anche dopo 160'000 km di impiego delle stesse batterie (mantengono ottima qualità nel tempo). I veicoli

elettrici sono più silenziosi rispetto ai motori a combustione interna e non producono fumi nocivi. Come **svantaggi** si ha una limitata autonomia tra le ricariche, il tempo di ricarica, e la scarsa durata delle cariche delle batterie, anche se **nuovi tipi di batteria ricaricabile** e **nuove tecnologie** di carica (e di scarica) ne hanno incrementato l'autonomia e la vita utile, riducendone contemporaneamente il tempo di carica.

1.3.2 COSTI

Il costo principale per un veicolo elettrico dipende principalmente dal **costo delle batterie**: il **tipo** e la **capacità** di esse è fondamentale nel determinare molti fattori come l'autonomia di viaggio, la velocità massima, il tempo di vita utile della batteria ed il tempo di ricarica; esistono alcuni svantaggi e vantaggi dei vari tipi, probabilmente non esiste un tipo ideale per chiunque, ma alcuni sono più adatti per alcuni utilizzi.

Come per tutti i dispositivi elettrici ed elettronici, anche i **veicoli elettrici a batteria** hanno il vantaggio di poter essere **smantellati facilmente e riciclati** per la maggior parte dei componenti dopo, ad esempio, incidenti stradali. A differenza dei componenti dei motori a benzina, che tendono a incendiarsi (specie quando i tubi rotti dell'iniezione soffiavano benzina sulla marmitta catalitica o sul turbocompressore rovente), i componenti delle celle a batteria tendono a mantenersi integri e funzionanti per poter essere recuperati e riutilizzati.

In conclusione quindi si può notare come l'**accumulatore elettrochimico** giochi nuovamente un ruolo chiave nel complesso del veicolo elettrico, oltre che per la sua importanza a livello tecnico, anche per la sua grande rilevanza a livello **economico**.

1.3.3 IMPATTO AMBIENTALE

Fare considerazioni sull'impatto ambientale totale dei veicoli elettrici non è cosa banale a causa dei numerosi e variegati fattori che risulta necessario e doveroso prendere in considerazione. Tra i tipi di confronto più esaurienti si possono di certo collocare quello dell' "**analisi dalla catena di montaggio alla discarica**" oppure, in forma ancora più completa, l' "**analisi di tutto il tempo di vita**". Questa analisi è così esaurientemente complessiva che considera ogni tipo di consumo energetico, includendo i consumi (ed emissioni) implicati dalla produzione originale (ed anche della componentistica) e le fonti di carburante e tutti i consumi (e le emissioni) durante la vita utile del veicolo includendo l'inquinamento durante la produzione delle batterie (ad esempio l'estrazione del cadmio comporta un elevato inquinamento da metalli pesanti) e la sua deposizione in discarica. I

vari tipi e l'entità dell'inquinamento varia enormemente tra i vari tipi di batteria, cosa che rende ancora più difficile fare dei confronti.

In questo elaborato ci si concentrerà chiaramente sugli aspetti riguardanti le batterie nelle varie tipologie, in quanto anche l'aspetto dell'impatto ambientale è un fattore da tenere ben in considerazione nella realizzazione di un veicolo elettrico, e soprattutto della batteria.

Una grande differenza tra i veicoli elettrici e i veicoli a combustione interna rispetto al tempo di vita consiste nel fatto che i primi utilizzano l'elettricità al posto di combustibili liquidi. Qualora l'elettricità fosse generata a partire da fonte rinnovabile ciò presenterebbe un consistente vantaggio in termini di inquinamento atmosferico. In ogni caso, se l'elettricità fosse prodotta da combustibili fossili (come è nella gran parte dei casi, ma mai l'unica fonte) il vantaggio relativo dei veicoli elettrici è sostanzialmente ridotto. Ne deriva che lo sviluppo di sorgenti di energia che non emettano CO₂ è necessaria per ridurre l'emissione totale netta dei veicoli elettrici mentre è impossibile avere benefici nella riduzione per i veicoli a benzina/diesel. In ogni caso, l'impatto ambientale della produzione di energia elettrica (emissioni indirette) dipende dal mix della produzione ed è enormemente più ridotto dell'emissione diretta prodotta dai veicoli a combustione.

Rispetto al tempo di vita, un'altra importante differenza tra i veicoli elettrici e quelli a combustione interna consiste nell'utilizzo di **consistenti batterie di accumulatori**. I moderni accumulatori hanno dimostrato di poter superare in durata gli stessi veicoli elettrici su cui sono installate. Ad esempio gli accumulatori provati da Toyota hanno mostrato solo un minimo calo di risultati dopo aver percorso 240'000 chilometri (certamente nell'utilizzo reale i dati mostrano risultati leggermente peggiori).

I veicoli elettrici, non essendo dotati di motore che brucia combustibile liquido e dei conseguenti apparati necessari al suo funzionamento, sono enormemente più affidabili e richiedono una manutenzione estremamente minima.

Fatta questa panoramica generale sull'auto elettrica, indispensabile per capire il contesto nel quale ci si trova, e messo in evidenza la fondamentale importanza delle batterie nel complesso del veicolo, si può procedere ad entrare più nel vivo dell'argomento, andando appunto ad occuparsi più nel dettaglio di quelli che sono i protagonisti di questo elaborato: gli **accumulatori di energia**.

CAPITOLO 2

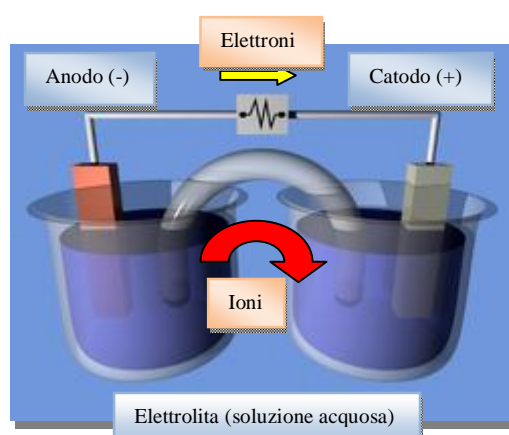
L' ACCUMULATORE DI ENERGIA, ASPETTI TECNICI

2.1 GENERALITA'

Da quando, nel 1800, Alessandro Volta riuscì nell'impresa di convertire energia chimica in energia elettrica, i dispositivi di accumulo energetico in forma elettrica, hanno subito e continuano a subire diverse evoluzioni alla ricerca di migliori prestazioni in spazi sempre più esigui.

Innanzitutto è fondamentale dare un chiarimento terminologico per evitare confusione: nel linguaggio comune i termini pila, batteria, accumulatore vengono usati indifferentemente come sinonimi; in realtà con il termine **pila** si intende un **generatore** elettrochimico cosiddetto **primario**, cioè **non ricaricabile**, mentre con il termine **accumulatore** si intende un **generatore** elettrochimico cosiddetto **secondario**, cioè **ricaricabile**. Entrambi questi due tipi di generatori sono costituiti da uno o più elementi in serie che costituiscono quella che viene chiamata **batteria**, termine quindi che si adatta sia alle pile che agli accumulatori. Nel campo della mobilità elettrica si farà perciò riferimento agli **accumulatori di energia elettrica** (indicati spesso con il termine **batterie**), in quanto non è certamente interesse di nessuno poter utilizzare un'auto o un ciclomotore elettrico per una volta e dover poi pensare alla sostituzione della batteria, operazione di certo non banale e tutt'altro che economica.

Le batterie sono dispositivi in grado di immagazzinare energia sotto forma di energia chimica. Due elettrodi, immersi in un elettrolita attraverso il quale si scambiano ioni, se connessi tramite un circuito esterno si scambiano elettroni dando origine ad una corrente elettrica.



L' **accumulatore di carica elettrica** è quindi un dispositivo la cui carica può essere completamente ristabilita mediante l'applicazione di un'adeguata energia elettrica. Ne esistono di vari tipi, con diverse capacità elettriche, differenti composizioni chimiche, forma e dimensioni. Sono anche conosciute come *pile secondarie*, *cellule secondarie* o *accumulatori*.

Alcuni tipi di batterie ricaricabili sono suscettibili di danni dovuti ad una scarica completa (batterie al piombo o agli ioni di litio per esempio) mentre altre devono essere ciclicamente scaricate onde evitare un rapido degrado delle prestazioni (*effetto memoria*, in inglese *lazy battery*, isteresi).

Il primo accumulatore fu quello al piombo acido, nel 1859.

2.2 CARATTERISTICHE TECNICHE E NON

Per studiare adeguatamente l'argomento è necessario avere ben chiari alcuni concetti tecnici e non, fondamentali nel campo degli accumulatori.

Le principali caratteristiche che contraddistinguono una batteria e che è necessario conoscere per effettuare una scelta ed un dimensionamento elettrico – temporale – economico - ambientale per l'alimentazione di un qualsiasi carico, sono le seguenti:

- **Tensione (V)**: valore nominale di un elemento moltiplicato per il numero degli elementi della batteria;
- **Capacità (Ah)**: quantità di elettricità scaricabile con modalità specificate (es. una batteria con capacità di 2 Ah è in grado di fornire continuamente una corrente di 2 A per 1 ora, oppure una corrente di 1 A per 2 ore, o ancora una corrente di 0,5 A per 4 ore, ecc.); in certe batterie viene consigliato di utilizzare solamente una certa percentuale della capacità (per es. l'80%);
- **Contenuto di energia (kWh)**: quantità di energia immagazzinabile dalla batteria; dipende dalla corrente di scarica;
- **Energia specifica** riferita al volume (**Wh/m³**) o riferita al peso (**Wh/kg**): è la quantità di energia espressa in wattora fornibile dalla batteria, messa in relazione o allo spazio occupato dalla stessa od al suo peso. E' chiaramente un fattore estremamente importante nei casi in cui (praticamente tutti) si voglia ottenere un alto livello energetico in poco spazio e contenendo il peso (si pensi solamente alle batterie per dispositivi da trasportare come i computer portatili, i cellulari, ecc., ma anche alle batterie per trazione che si stanno trattando);

- **Resistenza interna ($m\Omega$):** esprime la resistenza delle parti interne della batteria; varia in funzione dello stato di carica (SOC) e della temperatura ed inoltre può influire sulla variazione di tensione durante la scarica e sulla densità di potenza;

.... una precisazione ...

“densità di energia” e “densità di potenza”

Al fine di confrontare diversi sistemi di accumulo o di generazione, due concetti che tornano molto utili sono la *densità di energia* e la *densità di potenza*. Entrambi possono essere espressi sia in termini volumetrici (utile se si vuole avere un'idea dello spazio occupato) sia in termini di massa (utile per avere un'idea del peso del sistema).

La *densità di energia* si può esprimere in termini di *volume* come il rapporto tra l'energia accumulata in un sistema ed il suo volume:

$$\rho = \frac{\text{Energia}}{\text{Volume}} \text{ [kWh/m}^3\text{]}$$

La *densità di energia* in termini di *massa* (nota anche con il nome di *energia specifica*) è invece il rapporto tra l'energia accumulata in un sistema e la sua massa:

$$\rho = \frac{\text{Energia}}{\text{Massa}} \text{ [kWh/kg]}$$

Quando si vogliono confrontare due sistemi, per esempio una batteria al piombo con una batteria agli ioni di litio, i due concetti sopra esposti tornano utili: per esempio, la densità di energia in termini di massa di una batteria agli ioni di litio è di circa 0.12 kWh/kg mentre quella di una batteria al piombo è circa 0.03 kWh/kg, circa un quarto. Ciò significa che a parità di peso, le batterie agli ioni di litio immagazzinano quattro volte l'energia accumulata da una batteria al piombo (cifre di riferimento tanto per dare l'idea).

Analogamente, si definiscono la *densità di potenza* in termini di *volume*:

$$\rho = \frac{\text{Potenza}}{\text{Volume}} \text{ [kW/m}^3\text{]}$$

e la *densità di potenza* in termini di *massa* (o *potenza specifica*):

$$\rho = \frac{\text{Potenza}}{\text{Massa}} \text{ [kW/kg]}$$

- **Efficienza energetica:** è il rapporto tra l'energia scaricata e l'energia necessaria per riportare la batteria al suo stato iniziale di carica;
- **Efficienza di capacità (efficienza-Ah):** è il rapporto tra la scarica (espressa in Ah) e la carica necessaria per riportare la batteria al suo stato iniziale di carica;

Il valore percentuale dell'efficienza energetica è più basso rispetto a quello dell'efficienza-Ah, dal momento che la tensione durante la scarica è minore rispetto alla tensione durante la carica. Queste quantità sono fondamentalmente diverse e non andrebbero mai confrontate tra loro;

- **Fattore di carica (%):** è l'inverso dell'efficienza-Ah e dà un'indicazione della carica extra che viene iniettata nella batteria durante la fase finale di carica;
- **Ciclo di vita (numero di cicli):** un ciclo è una carica seguita da una scarica della batteria; il ciclo di vita si considera terminato quando la capacità della batteria scende al di sotto di un valore prestabilito (per es. 80% della capacità nominale);
- **Caratteristiche di ricaricabilità:** innanzitutto se la batteria è ricaricabile o meno (nel caso del veicolo elettrico lo è), poi i *tempi dell'eventuale ricarica* e la *presenza o meno dell'effetto memoria*, cioè dei problemi che sorgono a causa di ricariche troppo frequenti a bassa intensità di corrente oppure se ci si dimentica di scaricare per troppo tempo le batterie completamente cariche. In questi casi la durata della batteria si può ridurre addirittura del 90% perché aumenta la resistenza interna e quindi la tensione scende rapidamente quando la batteria è sotto carica;
- **Durata:** si esplica nel numero di cariche e scariche che la batteria è in grado di fornire, senza che il suo livello di tensione scenda al di sotto di un valore non più in grado di alimentare il carico prestabilito (valore di riferimento);
- **Impatto ambientale:** conoscere innanzitutto le modalità di smaltimento della batteria utilizzata, quando giunge al termine del suo ciclo di vita, ma se si volesse fare un'analisi completa sarebbe opportuno considerare ed analizzare anche l'impatto ambientale del ciclo di produzione della batteria, in altre parole si dovrebbe fare un'analisi completa del ciclo di vita (*life cycle analysis*);
- **Costo :** deve essere ovviamente valutato il costo della batteria (in relazione alla sua durata e alle sue prestazioni) per poter operare una scelta oculata; l'aspetto economico gioca sempre un ruolo predominante (è ovviamente fondamentale costruire prodotti economicamente sostenibili sia per il produttore che per i vari clienti, in modo da poter arrivare ad un prezzo finale del singolo prodotto, o di un bene più complesso che lo comprenda, competitivo e che possa essere preso seriamente in

considerazione): nel caso dei veicoli elettrici l'obiettivo è quello di arrivare a produrre mezzi che possano essere competitivi con i diffusi veicoli con motore a combustione sia sotto il profilo tecnico (accelerazione, velocità, autonomia di viaggio, confort e prestazioni in generale) ma anche e soprattutto dal punto di vista economico; avrebbe infatti poco senso produrre in serie veicoli che, a parità di prestazioni, venissero a costare il doppio (per esempio).

- **Sicurezza di impiego:** deve essere valutato anche il rischio di impiego delle batterie, ossia bisogna considerare anche quelli che potrebbero essere gli eventuali pericoli derivanti dall'uso della batteria, come per esempio nella fase di carica, scarica, smaltimento, ecc.

2.3 TIPOLOGIE DI ACCUMULATORI

Le **batterie per trazione** (batterie secondarie o accumulatori) sono studiate per fornire potenza per muovere un veicolo, come un'automobile elettrica, un ciclomotore, un veicolo commerciale, ecc. Una maggiore considerazione costruttiva riguarda il rapporto potenza/peso (e potenza/volume), dato che il veicolo deve trasportare la batteria stessa.

Le tecnologie di accumulo utilizzate nel campo della trazione elettrica sono diverse, alcune più vecchie e conosciute, altre più recenti e da perfezionare: tutte però non sono di certo esenti da problemi e lo studio di tali tecnologie è sicuramente all'ordine del giorno, per poter capire quali siano le migliori soluzioni, le potenzialità e gli sviluppi ottenibili nel futuro, con un occhio di riguardo a tutti gli aspetti legati a questo settore (aspetti tecnici, scientifici, economici, ambientali, ecc.). La soluzione ottimale non è di certo una sola; risulta assai difficile poter affermare che una tecnologia di accumulo sia migliore di tutte le altre sotto ogni aspetto, a causa anche dei vari fattori da dover analizzare e prendere in considerazione.

Per cominciare è opportuno dare una panoramica sui tipi di tecnologia utilizzati per accumulare energia e considerati nel campo della trazione elettrica. Si passerà poi, dopo una breve descrizione tecnica, considerando anche i principali vantaggi e svantaggi, ad individuare quelle che sono le tecnologie salienti e più interessanti in modo da poter entrare nel vivo dell'argomento, andando a fare un'analisi ed un confronto sotto vari aspetti. Le tecnologie più interessanti saranno naturalmente quelle più moderne ed efficienti, utilizzate attualmente, ma soprattutto quelle in fase di studio e sviluppo per il futuro più prossimo.

Le tecnologie di accumulo di energia nel campo della trazione elettrica sono le seguenti:

- **PIOMBO ACIDO**
- **NICHEL - CADMIO (Ni - Cd)**
- **NICHEL METALLO IDRURI (NiMH)**
- **NICHEL - ZINCO (Ni - Zn)**
- **ZINCO - ARIA**
- **LITIO - IONI (Li - Ion)**
- **LITIO - POLIMERI (Li - Pol)**
- **NICHEL - CLORURO DI SODIO (Ni - NaCl) (batterie Z.E.B.R.A.)**

2.4 PRINCIPIO DI FUNZIONAMENTO

Si vuole dare ora una breve descrizione tecnica delle tecnologie di accumulo spiegando sinteticamente la loro costituzione, il loro principio di funzionamento e le loro caratteristiche principali.

2.4.1 BATTERIA AL PIOMBO ACIDO

Un accumulatore al piombo è costituito da una cella elettrochimica nella quale le sostanze che agiscono come materie attive sono:

- **biossido di piombo** (PbO_2) all'elettrodo positivo (catodo);
- **piombo** spugnoso (Pb) in polvere all'elettrodo negativo (anodo);
- **elettrolita** costituito da una soluzione in acqua d'acido solforico (H_2SO_4).

L'elettrolita è formato da acqua che serve solo per diluire l'acido solforico.

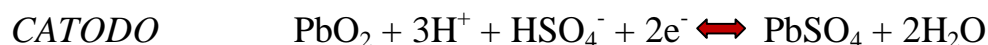
La reazione complessiva di cella è una reazione detta di *ossidazione o redox*. Una reazione è detta di *riduzione* quando viene sottratto ossigeno da una sostanza, per effetto delle sostanze *riducenti* che si legano all'ossigeno. Se, viceversa, viene ceduto ossigeno, si parla di *ossidazione*, e le sostanze che cedono ossigeno sono dette *ossidanti*. Le reazioni redox in cui sono presenti ioni (*reazioni ioniche*) sono caratterizzate dal passaggio di elettroni dal riducente all'ossidante. La dissoluzione di una sostanza con struttura ionica (*elettrolita*) in un solvente come l'acqua, le cui molecole sono dipoli, fa diminuire le forze elettrostatiche d'attrazione che uniscono gli ioni. Si

ottengono nella soluzione anioni e cationi la cui concentrazione è limitata secondo un equilibrio chimico fra le molecole dissociate e gli ioni; la presenza di questi ioni è determinante per l'elettrolisi.

Reazione chimica reversibile:

→ OSSIDAZIONE (SCARICA)

← RIDUZIONE (CARICA)



Batterie al piombo per trazione

Nell'ambito della trazione elettrica si sono sviluppate in tempi più recenti, andando a compensare alcuni problemi di sicurezza e di impatto ambientale delle classiche batterie al piombo acido, batterie al piombo leggermente diverse dalle tradizionali:

- **BATTERIE AL PIOMBO SIGILLATE:** l'elettrolito anziché essere libero come in quelli tradizionali, è immobilizzato in vari modi all'interno del contenitore, reso ermetico (*sealed*), in modo da consentire la ricombinazione dell'idrogeno e dell'ossigeno che si sviluppano durante la fase della carica. Ciò è reso possibile anche dall'impiego del calcio, anziché dell'antimonio, come legante nella preparazione delle griglie. In questo modo l'operazione di rabbocco, necessaria per reintegrare l'acqua perduta durante la fase di carica, non risulta più necessaria. Tali accumulatori, non emettendo che minime quantità di idrogeno e sostanze corrosive, offrono

maggiori garanzie di sicurezza, garantita anche dalla presenza di una valvola di sfogo che impedisce sovra pressioni;

- **BATTERIE AL GEL:** essenzialmente l'idea è quella di trattenere l'acido in un gel speciale. In contrasto con le batterie convenzionali, ciò previene quasi completamente l'emissione d'idrogeno ed ossigeno durante la reazione chimica, in particolare durante la ricarica. L'ossigeno è largamente "consumato" all'interno del gel dagli atomi d'idrogeno con i quali si ricombina. Queste batterie contengono elettrolita gelificato mediante l'aggiunta di gel di silice: questo rende l'elettrolita (soluzione acida composta da acqua e acido solforico) una massa gelatinosa e solida. Il vantaggio principale di queste batterie sta nel fatto che è assolutamente impossibile che rilascino acido, anche se l'involucro di cui sono costituite si rompesse o se fossero capovolte. Pertanto anche queste batterie sono sigillate e non richiedono alcun tipo di manutenzione (ad esempio il ripristino periodico del livello dell'elettrolita). Tuttavia presentano anche qualche svantaggio: il principale è che devono essere caricate con correnti e tensioni più basse rispetto alle altre batterie, diversamente c'è la possibilità che si formino all'interno dell'elettrolita gelificato delle bolle di gas tali da danneggiarle permanentemente.
- **AGM (VRLA):** questo tipo di batterie sigillate si caratterizza per il fatto di avere un elettrolita solido del tipo AGM (Absorbed Glass Mat, ovvero una fibra di vetro molto fine costituita da Boro-Silicio "imbevuta" di acido - soluzione di acqua e acido solforico) tra gli elettrodi. Pertanto questi accumulatori sono molto sicuri in quanto garantiscono la non fuoriuscita dell'acido anche se rotti. Quasi tutte le batterie AGM sono anche del tipo VRLA (Valve Regulated Lead Acid): questo significa che la batteria dispone di una piccola valvola che mantiene all'interno dell'accumulatore una leggera pressione positiva rispetto all'ambiente esterno (atmosfera). Pertanto queste batterie sono leggermente sotto pressione. Come si può facilmente intuire, questo tipo di tecnologia presenta tutti i vantaggi delle batterie al gel ma senza presentarne i limiti dal momento che possono sopportare correnti di carica più sostenute: possono essere ricaricate come le batterie standard. Altra caratteristica importante è che sono "ricombinanti", ovvero che l'ossigeno e l'idrogeno che si formano durante la ricarica si ricombinano generando nuovamente acqua (con efficienza superiore al 90%) direttamente all'interno della batteria, garantendo una perdita di acqua estremamente contenuta durante l'intero tempo di vita della batteria stessa. Questo tipo di accumulatore al piombo di nuova generazione è il più adatto all'utilizzo su veicoli a propulsione elettrica.

2.4.2 BATTERIE ALCALINE

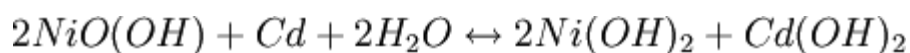
Le batterie con elettroliti alcalini sono state sviluppate a partire dalla fine del 19° secolo. La maggior parte di queste batterie usa ossido di nichel come materiale per l'elettrodo positivo, con l'elettrodo negativo basato su cadmio, ferro, zinco o idrogeno (quest'ultimo sotto forma di idruri metallici).

- Le batterie **nichel-ferro** sono state popolari all'inizio del 20° secolo grazie alla loro maggiore energia specifica ed al loro maggiore ciclo di vita rispetto alle batterie al piombo acido; hanno poi ricevuto un rinnovato interesse negli anni '80. Adesso però sono state completamente abbandonate a causa delle loro scarse prestazioni a basse temperature e alla loro scadente efficienza energetica, richiedendo inoltre un eccessivo ed inaccettabile consumo d'acqua.

2.4.2.1 BATTERIA NICHEL - CADMIO (Ni - Cd)

Le batterie Ni - Cd sono costituite da un elettrodo positivo di idrossido di nichel, un elettrodo negativo di idrossido di cadmio, un separatore ed un elettrolita alcalino. Queste batterie solitamente hanno un contenitore di metallo con una placca sigillante con una valvola di sicurezza auto-sigillante. Gli elettrodi, isolati da ogni altra cosa tramite il separatore, sono arrotolati a spirale dentro al contenitore.

La reazione chimica che avviene in una batteria Ni - Cd è la seguente:



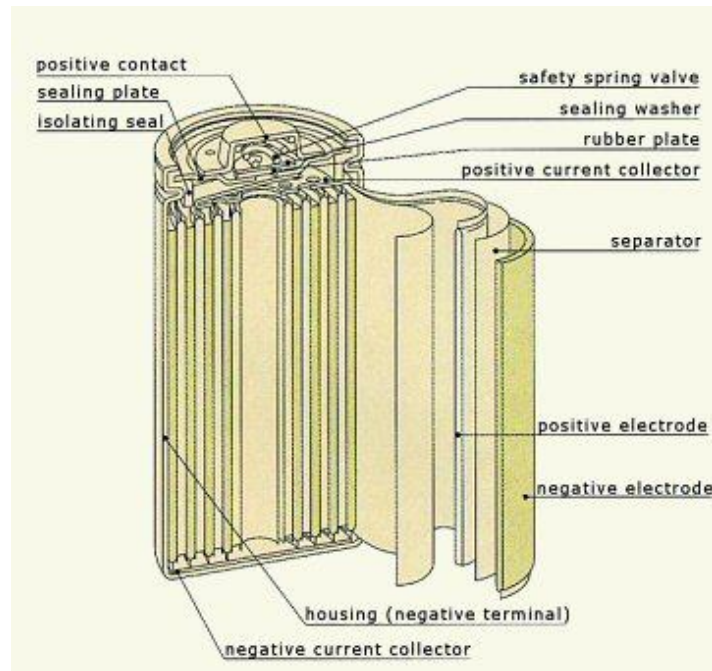
→ SCARICA

← CARICA

L'elettrolita alcalino (di solito KOH, idrossido di potassio) non viene consumato in questa reazione.

La tensione nominale di una cella è solitamente 1,2 V.

Nella pagina seguente si può vedere uno schema rappresentativo di un accumulatore nichel – cadmio.



Sezione della batteria Ni - Cd

Negli accumulatori al Ni - Cd, in caso di sovra o sotto caricamento della batteria ci sono due possibili effetti. Se l'anodo è sovraccaricato, si produce idrogeno; se il catodo è sovraccaricato, si produce ossigeno. Per questo motivo l'anodo è sempre progettato per avere una capacità più alta del catodo, per evitare il rilascio di idrogeno.

Lo sviluppo storico di tali batterie è in parallelo con quello delle batterie nichel-ferro offrendo anche caratteristiche simili a quest'ultime, come l'alta energia specifica confrontata con quella delle batterie al piombo, un'alta resistenza a "maltrattamenti" ed un lungo ciclo di vita. I particolari vantaggi delle batterie al Ni - Cd sono tuttavia racchiusi nel miglior comportamento a basse temperature, nella minore autoscarica e nella maggiore efficienza elettrica, richiedendo inoltre una minore manutenzione ed un minor consumo d'acqua.

Questo tipo di batteria è stata montata su molti veicoli elettrici, presentando particolari affinità con questo tipo di applicazione: buon ciclo di vita, potenza specifica elevata, capacità di ricarica piuttosto veloce e capacità di operare in un'ampia gamma di temperature. Il costo di tali batterie è stato comunque abbastanza alto, spingendo numerosi produttori a non considerare questo tipo di accumulatore come soluzione più adatta. E' necessario inoltre considerare la tossicità del cadmio, fattore che gioca un ruolo chiave nell'accettazione di questo tipo di batteria.

Queste batterie possono essere realizzate in diverse configurazioni a seconda degli scopi: sostanzialmente si mira ad ottenere grandi densità di energia oppure grandi densità di potenza.

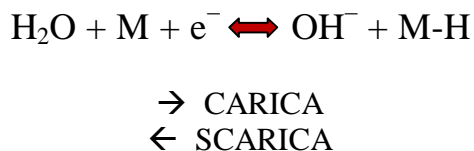


Esempio di accumulatore nichel-cadmio per trazione

2.4.2.2 BATTERIA NICHEL METALLO IDRURI (NiMH)

L'accumulatore nichel-metallo idruro (in inglese *nickel-metal hydride*), è un tipo di accumulatore simile all'accumulatore nichel-cadmio con la differenza che l'anodo, che assorbe l'idrogeno, è formato da una lega invece che da cadmio. Come nelle batterie NiCd, il nichel è il catodo. Una batteria NiMH può avere due o tre volte la capacità di un batteria NiCd di pari dimensioni.

In una batteria NiMH la reazione che avviene all'anodo è la seguente:



Al catodo si forma idrossido di nichel.

Il "metallo" nell'anodo (M) di una batteria NiMH è normalmente un composto intermetallico. Molti diversi composti sono stati sviluppati a questo scopo, ma quelli attualmente in uso rientrano in due classi. Il più comune è AB₅, dove A è un miscela di elementi del gruppo terre rare come lantanio, cerio, neodimio, praseodimio e B è nichel, cobalto, manganese e/o alluminio. Solo poche batterie usano elettrodi basati su composti AB₂, dove A è titanio e/o vanadio e B è zirconio o nichel, modificato con cromo, cobalto, ferro e/o manganese, a causa della vita ridotta per questo tipo di soluzione.

Ognuno di questi composti serve a creare, in modo reversibile, una miscela di idruri metallici. La particella ionica nota come **idruro** è l'anione dell'idrogeno, **H⁻**, in inglese *hydride*. Un **anione** è un atomo o una molecola che ha acquistato una carica elettrica negativa (elettrone), diventando quindi uno ione negativo. Gli **idruri** sono dunque composti ionici in cui l'idrogeno ha come numero di

ossidazione **-1**, ossia si riduce acquistando un elettrone. Quando lo ione idrogeno è rimosso dall'elettrolita, dal voltaggio applicato durante la carica, si formano gli idruri che evitano la formazioni di idrogeno gassoso e che consentono di mantenere inalterati volume e pressione. Quando la batteria si scarica gli stessi ioni vengono rilasciati partecipando alla reazione inversa.

Le batterie NiMH hanno un elettrolita alcalino, di solito idrossido di potassio.

Queste batterie hanno alcune caratteristiche che le rendono adatte per usi nei veicoli a propulsione elettrica. Innanzitutto il fatto che esse siano prive di cadmio, le rende sicuramente più accettabili dal punto di vista ambientale. Da un punto di vista tecnico invece, la loro energia specifica è leggermente maggiore rispetto alle batterie al Ni-Cd e sono inoltre adatte a ricaricarsi in tempi brevi. Tuttavia uno svantaggio è la loro tendenza all'autoscarica, dovuta alla diffusione dell'idrogeno attraverso l'elettrolita. Inoltre, l'alta corrente necessaria durante la carica (che è una reazione esotermica, cioè con sviluppo di calore), rende necessaria ed essenziale una gestione termica e di raffreddamento. A causa di questo fatto, tali batterie sono state, e sono, oggetto di ricerca e notevoli attività di sviluppo al fine di migliorare la loro adattabilità ai veicoli elettrici puri. D'altra parte invece, le batterie NiMH sono utilizzate nei veicoli a propulsione ibrida (doppio motore, elettrico e a combustione interna) grazie alla loro eccellente potenza specifica resa disponibile. Ne è un moderno esempio la Toyota Prius, moderna automobile ibrida dotata di questo tipo di accumulatore elettrico. La batteria per veicolo ibrido ottimizza la capacità di fornire potenza istantanea .

Queste batterie sono prodotte oggi in serie e su larga scala, giocando un ruolo fondamentale nel mercato dei veicoli ibridi.

2.4.2.3 BATTERIA NICHEL - ZINCO (Ni - Zn)

La batteria nichel-zinco fa parte della categoria delle batterie al metallo idruri (NiMH) ed il funzionamento è molto simile anche alla batteria nichel-cadmio o nichel-ferro. Si utilizza infatti il medesimo tipo di elettrodo positivo, mentre la differenza sta nel fatto che in questo caso viene utilizzato lo zinco come metallo nell'elettrodo negativo. E' un tipo di tecnologia molto recente (è arrivata tardi sul mercato) ed ha le peculiarità di avere una maggiore potenza (a parità di peso e/o di volume) e soprattutto la non tossicità, problema grosso invece nella batteria nichel-cadmio. L'elettrodo di zinco inserito negli accumulatori infatti non contiene né piombo né mercurio né cadmio, avendo quindi un impatto ambientale più ridotto ed una maggior facilità di smaltimento.

Un altro vantaggio è l'alta tensione della singola cella (1,6 V) rispetto agli altri tipi di batterie alcaline, permettendo così un'alta energia specifica (circa il 25% in più rispetto alle batterie Ni-Cd).

Le batterie Ni-Zn sono state oggetto di numerose ricerche concentrate soprattutto sulle applicazioni relative ai veicoli elettrici. Il loro maggiore svantaggio è stato dimostrato essere il breve, e perciò inaccettabile, ciclo di vita, causato dalla formazione di detriti di zinco sull'elettrodo negativo durante la carica, detriti che possono eventualmente perforare il separatore e cortocircuitare la cella mandandola fuori uso.

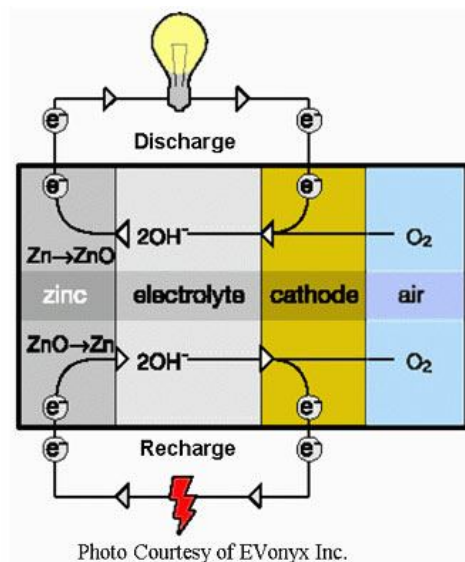
Le ricerche riguardo tale tecnologia rivendicano risultati importanti come la durata di vita e la capacità di numerosi cicli di ricarica; tuttavia gli studi sono stati effettuati soprattutto a livello di singola cella, mentre le batterie complete non sono ancora ben certificate e sperimentate per applicazioni su veicoli elettrici.

2.4.3 BATTERIA ZINCO - ARIA

La batteria ricaricabile, più propriamente definibile **pila zinco-aria**, ma più nota come **accumulatore zinco-aria**, ha come caratteristica peculiare quella di impiegare l'ossigeno atmosferico come elettrodo che riceve elettroni (fase di riduzione) e lo zinco come elettrodo che perde elettroni (fase di ossidazione). Il movimento di elettroni genera quindi una tensione elettrica che può servire per alimentare vari tipi di circuito elettrico.

All'anodo si hanno metalli comunemente disponibili, con alta densità energetica come alluminio o zinco che liberano gli elettroni una volta ossidati. I catodi o gli elettrodi sono fatti spesso di una struttura porosa del carbonio o di una maglia di metallo ricoperta di catalizzatori adeguati. L'elettrolita può essere nella forma liquida o una membrana polimerica solida saturata con KOH (idrossido di potassio).

Schema semplificato di funzionamento della batteria zinco-aria



Gli accumulatori zinco-aria appartengono alla categoria delle celle a combustibile, dove lo zinco è il combustibile e l'ossigeno è il comburente.

La caratteristica principale è quella del *non incendiarsi* in nessuna condizione. La velocità di combustione dello zinco dipende principalmente dalla pressione atmosferica, dalla percentuale di ossigeno atmosferico (19 % costante), dalla temperatura, dall'umidità e dal tasso di ossidazione della batteria; inoltre non vengono liberati acidi ustionanti se la batteria venisse incautamente aperta o danneggiata in uno scontro.

Alte pressioni dell'ossigeno, la presenza di ozono, e l'alta temperatura, sembrano aumentare le prestazioni sia di picco di potenza che di capacità di erogazione totale di potenza della pila zinco-aria. In questo caso, aggiungendo al sistema della batteria zinco-aria, un misuratore-dosatore dell'afflusso di ossigeno con la possibilità di arricchire la miscela prelevandolo da una bombola, si potrebbe ottenere una specie di "*turbocompressione*" della pila zinco-aria.

Gli accumulatori zinco-aria sono stati sperimentati soprattutto nel campo dei veicoli elettrici. Il loro principale vantaggio è la grande energia specifica che sono in grado di accumulare, energia che può superare i 200 Wh/kg, valore che supera quello dei convenzionali tipi di batteria. Tuttavia la potenza specifica, attorno ai 100 W/kg, è un valore abbastanza modesto.

Il loro principale svantaggio è invece associato all'onere di dover provvedere alla sostituzione fisica degli elettrodi per la ricarica della batteria. Questo creerebbe la necessità di sviluppare una catena logistica comprendente la raccolta, la rigenerazione e la redistribuzione degli elettrodi, senza considerare che l'efficienza della rigenerazione degli elettrici è piuttosto limitata. Tutti questi fattori hanno impedito un'ampia diffusione di questa batteria e hanno fatto sì che non potesse essere considerata come contendente commerciale per uso sui veicoli a propulsione elettrica.

2.4.4 BATTERIA AL LITIO

La batteria al litio usa il metallo più leggero che esista (il litio appunto) come mezzo di stoccaggio dell'energia. Questo metallo ha la proprietà di poter immagazzinare enormi quantità di energia.

Il problema principale che va considerato in modo più accurato rispetto agli altri tipi di batteria è la sicurezza. Il litio è un materiale molto reattivo, e condizioni di abuso, di incidente, di incendio o di aumento della temperatura possono causare un rilascio incontrollato di energia che può creare situazioni pericolose. E' dunque strettamente necessaria l'implementazione di un sistema di controllo e gestione della cella.

Le principali tecnologie di batterie al litio sono descritte di seguito.

2.4.4.1 BATTERIA LITIO - IONI (Li - Ion)

Il tipo più comune di batteria al litio è quello cosiddetto “litio – ioni”.

I tre partecipanti alle reazioni elettrochimiche in una batteria agli ioni di litio sono l'anodo, il catodo e l' elettrolita. Sia l'anodo che il catodo sono materiali in cui e da cui il litio può migrare.

Il principio base di funzionamento si basa su un trasferimento di ioni di litio (Li^+) da un elettrodo all'altro. Durante la ricarica, sottoponendo l'accumulatore ad una tensione elettrica, il litio si trasferisce, sotto forma ionica, sull'elettrodo negativo, passando dunque dal catodo (+) all'anodo (-). Il processo avviene, ovviamente, in modo opposto durante l'utilizzazione della batteria, e quindi nella fase di scarica, dove gli ioni di litio passano dall'anodo al catodo.

Una reazione chimica tipica della batteria al Li - Ion è la seguente:

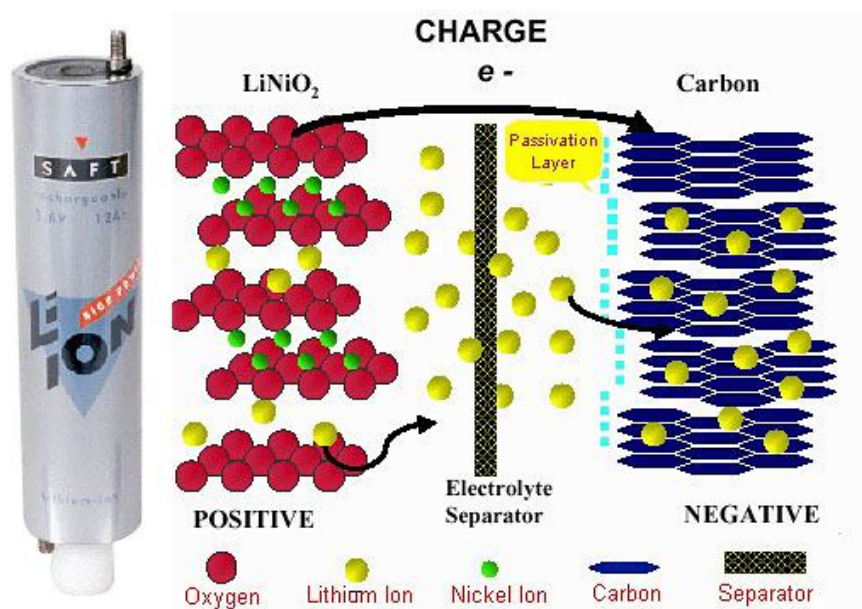
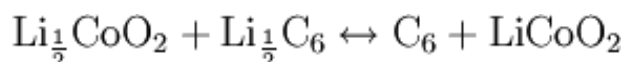


Photo Courtesy of SAFT America

Schema di funzionamento di una cella litio-ioni
(fase di carica)

L'anodo è fatto con carbonio, il catodo è un ossido metallico, e l'elettrolita, in generale, è un sale di litio in solvente organico. Poiché il metallo di litio, che potrebbe essere prodotto in condizioni irregolari di ricarica, è molto reattivo e può causare esplosioni, le batterie agli ioni di litio

solitamente hanno incorporati circuiti elettronici protettivi e/o fusibili per evitare l'inversione di polarità, sovraccarichi di tensione e surriscaldamento (circuiti elettronici di protezione).

Per un ottimo voltaggio è necessario un anodo ad alta attività di Li (Li metallico, leghe, composti di intercalazione Li-C).

Un elemento particolarmente importante per attivare le batterie agli ioni di litio è l'interfase elettrolitica solido (SEI). Gli elettroliti liquidi nelle batterie agli ioni di litio consistono in elettroliti di sali di litio, come l'*esafluorofosfato* (LiPF_6), il *tetrafluoborato* (LiBF_4), il *perclorato* (LiClO_4) o il *triflato di litio* e solventi organici, come l'*etere*. Un elettrolito liquido conduce ioni di litio, il quale agisce come trasporto tra il catodo e l'anodo quando una batteria fa passare una corrente elettrica attraverso un circuito esterno.

Le batterie agli ioni di litio hanno una tensione di circuito aperto nominale di 3.6 V ed una tensione di ricarica tipica di 4.2 V. La procedura di ricarica è a tensione costante con limite di corrente.

Questi tipi di accumulatori sono stati proposti sia per i veicoli elettrici puri, grazie alla loro grande energia specifica, ben oltre i 200 Wh/kg, sia per i veicoli ibridi, facendo uso di celle appositamente progettate per ottenere altissima potenza specifica, fino anche a 2000 W/kg.

2.4.4.2 BATTERIA LITIO - POLIMERI (Li - Pol)

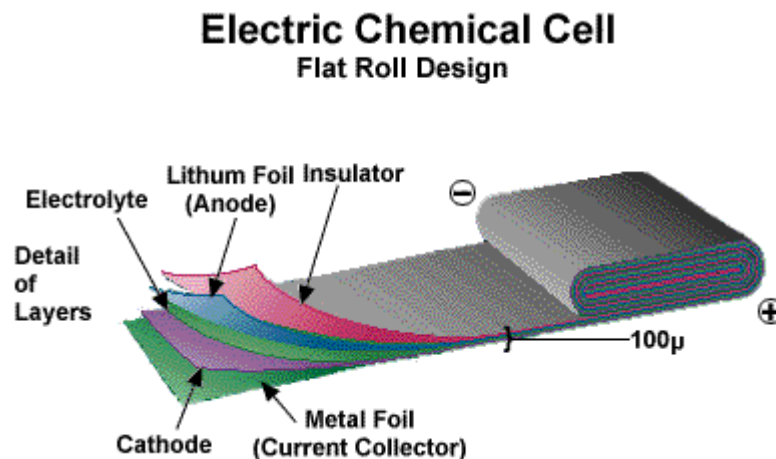
L' **accumulatore litio – polimeri** è uno sviluppo tecnologico della batteria litio-ioni. La principale caratteristica che li differenzia è data dal fatto che l'elettrolita in sale di litio non è contenuto in un solvente organico come nel diffusissimo disegno litio - ione, ma si trova in un composito di polimero solido, come ad esempio il poliacrilonitrile (spesso indicato con l'acronimo PAN, è il polimero ottenuto dalla polimerizzazione dell'acrilonitrile). Queste batterie sono completamente a secco e non contengono elettroliti liquidi. Vi sono alcuni ottimi vantaggi in questo tipo di costruzione rispetto alla classica configurazione litio - ioni, per esempio il fatto che il polimero solido non è infiammabile (a differenza del solvente organico che le celle a Li - Ion utilizzano); queste batterie sono perciò meno pericolose se vengono danneggiate.

La configurazione strutturale delle celle di questi accumulatori si differenzia da quelle degli accumulatori Li – Ion. Mentre le celle in litio-ione sono contenute in minuscoli contenitori rigidi in metallo cilindrici o prismatici (a nido d'ape), le attuali celle polimeriche hanno una struttura a fogli flessibili, spesso pieghevoli (laminato polimerico) e contengono ancora un solvente organico. La maggiore differenza tra le celle in polimero e le celle litio-ioni in commercio è che nelle seconde il

contenitore rigido pressa reciprocamente gli elettrodi ed il separatore, mentre in quelle a polimero questa pressione esterna non è richiesta perché i "fogli" dell' elettrodo ed i "fogli" del separatore (dielettrico) sono laminati ciascuno sull'altro.

Una cella litio-polimeri è generalmente realizzata da cinque lamine differenti: un isolante, un anodo di litio, un elettrolita solido polimerico, un catodo di ossido metallico ed un assorbitore di corrente. Il laminato viene avvolto per formare una cella mentre successivamente più celle vengono connesse in serie per fornire il voltaggio desiderato. Modificando spessore e lunghezza dei materiali nella cella ed il numero e la sistemazione delle celle, si può realizzare una batteria adatta a molteplici esigenze.

Nell'immagine seguente si può vedere schematicamente la composizione di una cella di questo tipo con i vari strati sopra citati:



Per quanto riguarda le tecnologie di questi accumulatori, attualmente in commercio se ne trovano due, entrambe sono agli Li-Ion-Poly (dove Poly sta per "Polimero elettrolita/separatore"); sono chiamate "*Batterie ai polimeri elettrolitici*".

L'idea è quella di usare un polimero permeabile agli ioni al posto della tradizionale combinazione di un separatore microporoso e un elettrolita liquido. Questo promette non solo una migliore sicurezza, dato che l'elettrolita polimerizzato non brucia facilmente, ma anche la possibilità di realizzare batterie molto sottili, dato che non richiederanno una pressione applicata al "sandwich" catodo-anodo. L'elettrolita polimerizzato assicurerà la tenuta di entrambi gli elettrodi come una colla.

Il design è il seguente:

- *anodo*: Li o carbonio-Li;
- *separatore*: elettrolita polimerico conduttore;
- *catodo*: LiCoO_2 o LiMn_2O_4 .

La **reazione chimica** tipica è:

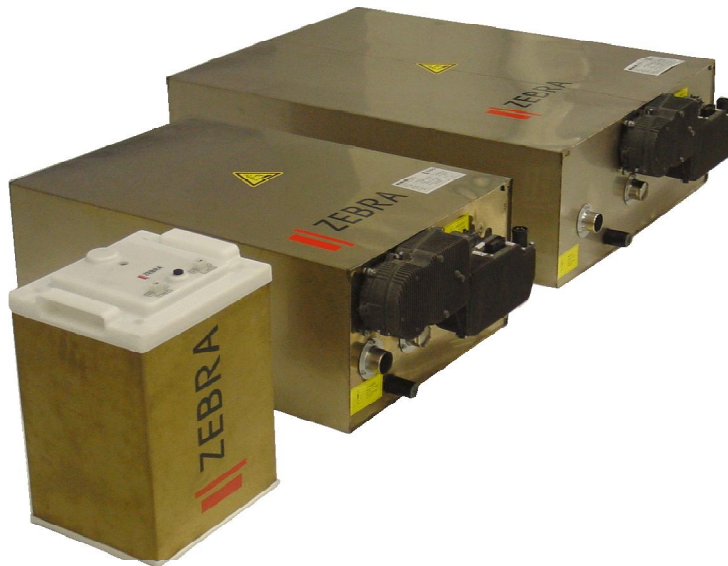
- *anodo*: carbonio - $\text{Li}_x \rightarrow \text{C} + x\text{Li}^+ + xe^-$
- *separatoro*: conduzione Li^+
- *catodo*: $\text{Li}_{1-x}\text{CoO}_2 + x\text{Li}^+ + xe^- \rightarrow \text{LiCoO}_2$

Il polimero elettrolita/separatoro può essere realmente un polimero solido più LiPF_6 o altri sali conduttivi più SiO_2 o altri riempitivi con caratteristiche meccaniche migliori. Alcuni stanno pensando di usare Litio metallico come anodo, mentre altri preferiscono usare il più sicuro anodo ad intercalazione di carbonio. Entrambe le tecnologie usano PVdF (*polivinildenfluoruro*, un polimero) reso gel con solventi convenzionali e sali, come EC (carbonato di etile), DMC (dimetilcarbonato), DEC (carbonato di dietile), ecc. La differenza fra le due tecnologie è che una usa LiMn_2O_4 come catodo e l'altra, più convenzionale, LiCoO_2 .

La tensione delle celle Li-Pol varia generalmente da circa 2,7 V (scariche) a circa 4,23 V (a piena carica).

2.4.5 BATTERIA NICHEL - CLORURO DI SODIO (Ni - NaCl) (batterie Z.E.B.R.A.)

Le batterie ZEBRA (acronimo di *Zero Emission Battery Research Activities*), note anche come batterie nichel-cloruro di sodio, sono prodotte dalla ditta **MES-DEA**, che ha sede nella Svizzera italiana, a Stabio, nel Canton Ticino.



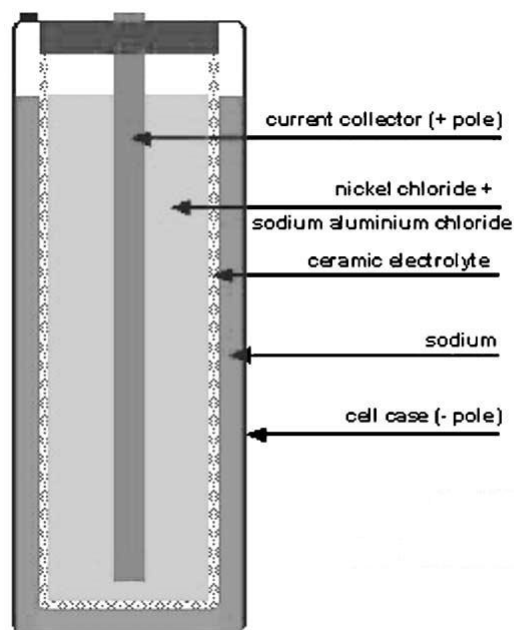
In inglese queste batterie sono chiamate “Sodium-Nickel-Chloride Batteries” e vengono indicate con il simbolo NaNiCl .

Questa classe di accumulatori rappresenta una tecnologia piuttosto recente ed è al centro di studi per le sue grosse potenzialità.

Questo tipo di batteria è costituito da celle funzionanti a caldo, racchiuse in un contenitore termico. La cella opera a circa $270\text{ }^{\circ}\text{C}$ (e oltre anche) ed ha un voltaggio di 2.35 V . Per mantenere gli elettrodi nello stato fuso a $270\text{ }^{\circ}\text{C}$, il catodo (FeCl_2 o NiCl_2) è impregnato di NaAlCl_4 fuso (tali batterie sono talvolta dette *batterie a sali fusi*).

A cause delle elevate temperature di utilizzo è necessario un sistema di controllo di ogni singola cella.

L'elettrolita è normalmente di tipo solido ed è costituito da un tubo di b-allumina.



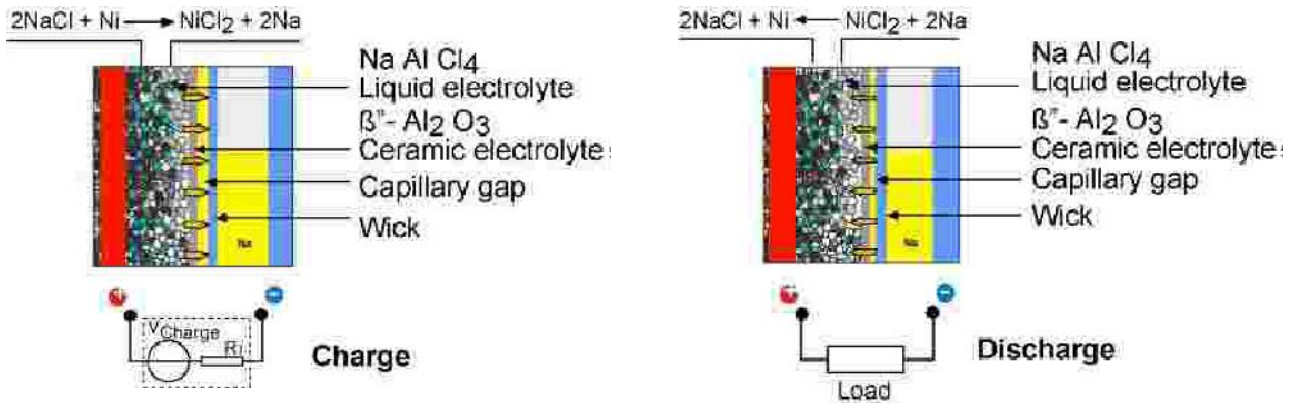
Rappresentazione schematica di una cella ZEBRA

Ogni batteria ZEBRA è composta da un insieme di singole celle collegate in serie o in parallelo; la tipica reazione chimica completa che avviene all'interno della cella è:



→ CARICA
← SCARICA

Durante la fase di carica il sale (NaCl) ed il nichel (Ni) si trasformano in *cloruro di nichel* (NiCl₂) e sodio (Na). La fase di scarica avviene ovviamente in direzione opposta. Non ci sono altre reazioni chimiche, ed in tal modo l'efficienza in termini di capacità (Ah) tende al 100%.



Ogni cella ha una copertura (guaina) stabile in acciaio, mentre gli elettrodi sono separati da una parete di ceramica che risulta essere conduttiva per gli ioni di sodio, ma un isolatore per gli elettroni. La reazione nelle celle può quindi avvenire solamente se al di fuori della cella può fluire una corrente di elettroni attraverso un carico pari alla corrente generata dal movimento degli ioni di sodio. Il catodo solido poroso di NiCl₂ viene impregnato con un sale agli ioni Na⁺ conduttivo (NaAlCl₄) che fornisce la conducibilità tra la parete interna del separatore e la zona di reazione. Un sigillo in metallo-ceramica chiude ermeticamente la cella. Non serve manutenzione durante il ciclo di vita.

Qualsiasi numero geometricamente (in termini di spazio e volume) ragionevole di celle ZEBRA può essere collegato in serie e in parallelo in per poter generare la tensione e la capacità desiderate. Esse sono montate verticalmente nell'alloggiamento della batteria con o senza raffreddamento ad aria.

L'alloggiamento della batteria ha un doppio isolamento in vuoto e segue il principio di un contenitore termico con un efficiente isolamento dovuto a SiO₂ (ossido di silicio) espanso; esso fornisce una bassa conducibilità termica di soli 0,006 W/mK ed è stabile anche per condizioni critiche di sicurezza fino ai 1000 °C.

Quando la batteria è funzionante, le perdite dovute alle resistenze interne mantengono la temperatura di esercizio attorno ai 270 °C; quando invece la batteria rimane inattiva per un tempo prolungato (oltre 24 ore) è necessario un ulteriore riscaldamento (tipicamente utilizzando una potenza di circa 100 W per batteria) per mantenere calda la batteria. Questa necessità rende la

batteria ZEBRA adatta per essere montata su veicoli che vengano utilizzati quotidianamente, come ad esempio mezzi pubblici e mezzi commerciali.

Le alte temperature interne che vanno dai 270 ai 350 °C provocano sicuramente delle perdite termiche, ma offrono più importanti vantaggi come:

- durata di vita e prestazioni pressoché indipendenti dalla temperatura dell'ambiente;
- raffreddamento semplice ed efficace.

Queste batterie sono state implementate con successo in diversi veicoli elettrici, fornendo interessanti opportunità e ottime prestazioni. Le ZEBRA sono degli ottimi accumulatori per quanto riguarda l'*energia specifica* e si prestano quindi bene ad essere utilizzati su veicoli a propulsione elettrica pura, mentre a causa della loro potenza specifica più modesta sono meno adatte per applicazioni su veicoli a propulsione ibrida.

2.5 CONFRONTO TRA I TIPI DI BATTERIA

Le seguenti tabelle vogliono dare una panoramica sui fattori tecnici di prestazione fondamentali (*energia specifica* in Wh/kg, *potenza specifica* in W/kg e *ciclo di vita*) dei diversi tipi di batteria, tenendo conto degli attuali e futuri sviluppi, oltre che della differenza tra le **batterie per energia specifica** (*energy-oriented*), adatte per veicoli a propulsione elettrica (**BEV**, ossia *battery-electric vehicles*), e le **batterie per potenza specifica** (*power-oriented*), adatte ai veicoli ibridi (**HEV**, ossia *hybrid-electric vehicles*). Il ciclo di vita delle batterie per potenza viene espresso in valore relativo, in quanto questo ciclo dipende anche dal modello della batteria utilizzata e non esistono test standard sul ciclo di vita.

E' molto importante precisare che i parametri appena citati dipendono anche dal modo in cui viene utilizzata la batteria; per esempio:

- il numero di cicli di una batteria può dipendere da quanto “profonda” è la scarica (se viene scaricata interamente o meno);
- il reale numero di cicli di una batteria nell'utilizzo vero e proprio su strada è inferiore rispetto al numero di cicli che si ottiene in un test in laboratorio; questo è dovuto al fatto che i test standardizzati sui cicli sono molto meno esigenti rispetto al reale sfruttamento della batteria (nella realtà la batteria è più “maltrattata”);

- un pacco batteria è composto da un certo numero di celle singole. Le caratteristiche dell'intero pacco sono differenti dalle caratteristiche di una singola cella, questo dovuto al fatto che le singole celle possono comportarsi in maniera diversa l'una rispetto ad un'altra.

Le caratteristiche e le prestazioni delle batterie sono influenzate dalla *temperatura*. Il campo di temperatura che viene indicato in tabella è il campo ottimale di utilizzo, ossia quello per il quale si hanno le migliori prestazioni. Per le batteria NaNiCl (ZEBRA) questo parametro è meno rilevante dato che esse comunque funzionano sempre ad una temperatura attorno ai 300 °C.

Bisogna inoltre tener conto che le caratteristiche degli accumulatori variano in base alla specifica applicazione per la quale vengono progettati e sviluppati. **Le batterie per i BEV** (ottimizzano l'energia) **hanno caratteristiche diverse rispetto alle batterie per gli HEV** (ottimizzano la potenza). Queste specifiche caratteristiche per entrambe le applicazioni vengono indicate nelle tabelle che seguono: nella **tabella 1** (Man. significa manutenzione) vengono descritte le batterie per i BEV, nella **tabella 2** quelle per gli HEV. Nella tabella 2 non vengono inserite le caratteristiche delle batterie nichel-zinco, ZEBRA e zinco-aria in quanto queste tecnologie non sono largamente usate (almeno per il momento) nei veicoli a propulsione ibrida.

Tecnologia	Energia specifica (Wh/kg)	Potenza specifica (W/kg)	Cicli (numero)	Campo di temperatura ottimale (°C)	Efficienza (%)	Auto - scarica	Man.	Sistema di gestione
Pb - acido (VRLA)	40	250	500	20 – 40	80 – 85	bassa	no	consigliata
Ni – Cd	60	200	1350	0 – 40	70 – 75	bassa	si	consigliata
NiMH	70	350	1350	0 – 40	70	alta	no	consigliata
Ni – Zn	75	200	n.d.	0 – 40	70	n.d.	no	consigliata
ZEBRA	125	200	1000	n.d.	90 – 95	alta	no	integrante
Litio	125	400	1000	0 – 40	90	bassa	no	essenziale
Zn – aria	200	70	n.d.	20 – 40	n.d.	n.d.	si	consigliata

Tabella 1: Caratteristiche tecniche delle batterie per **BEV**

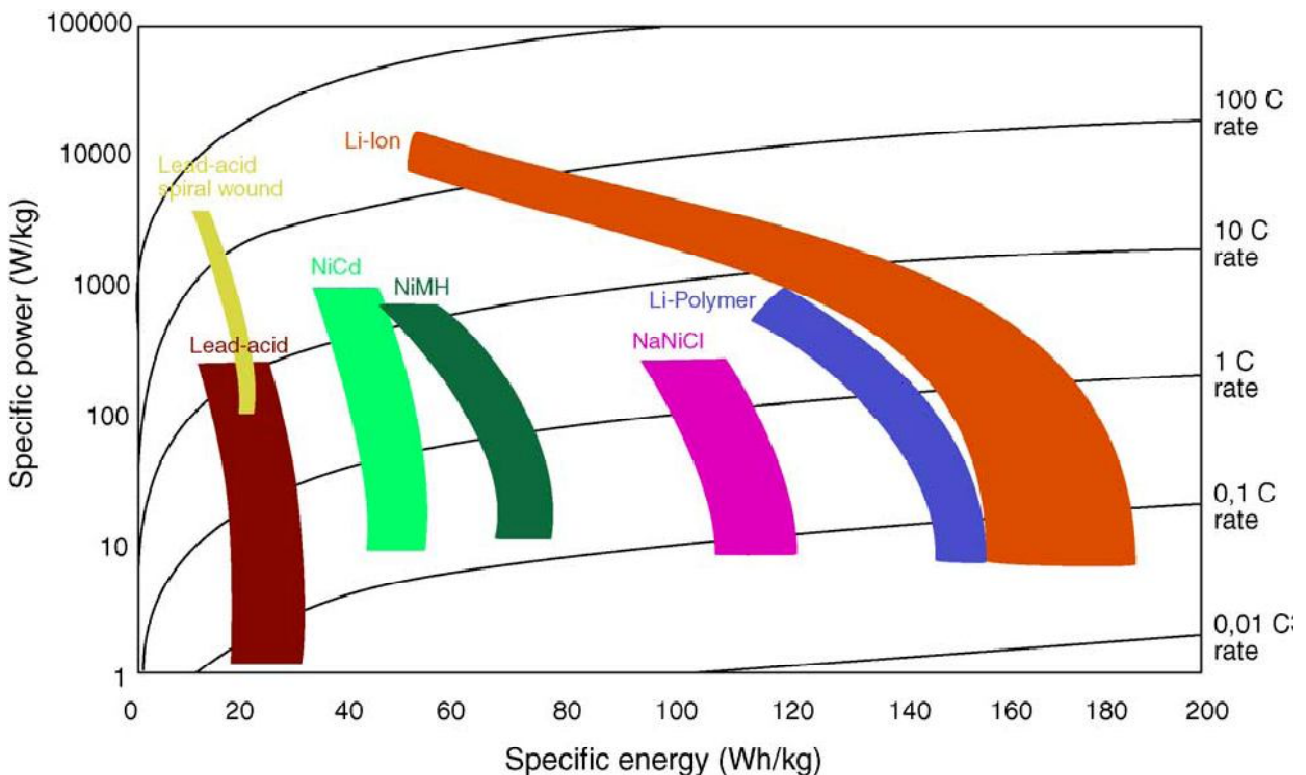
Tecnologia	Energia specifica (Wh/kg)	Potenza specifica (W/kg)	Cicli (numero relativo)
Pb - acido	25	350	1
Ni – Cd	30	500	3
NiMH	55	1500	3
Li - Ion	70	2000	3

Tabella 2: Caratteristiche tecniche delle batterie per **HEV**

Al fine di confrontare i diversi tipi di batteria a livello delle loro prestazioni è possibile utilizzare il cosiddetto **diagramma di Ragone** (Ragone chart), che rappresenta l'**energia specifica in funzione della potenza specifica** (quest'ultima solitamente rappresentata su scala logaritmica), dove si può facilmente fare un confronto tra le batterie adatte sia ad essere utilizzate su BEV (che necessitano soprattutto di energia specifica) sia ad essere utilizzate su HEV (che necessitano soprattutto di potenza specifica).

L'utilizzo della scala logaritmica in ordinata per la potenza specifica permette di confrontare sullo stesso diagramma batteria con potenze specifiche notevolmente differenti.

Ragone chart (cell level)



Si può notare che ciascuna area colorata rappresenta una tecnologia diversa, ma a loro volta sono diversi i modelli e le tipologie che si possono collocare in queste aree in base alla specifica applicazione per la quale vengono sviluppate.

Un parametro importante da considerare è certamente il *tempo di scarica della batteria*: è intuitivo capire infatti che, essendo una batteria in grado di erogare una certa energia (potenza nel tempo), il tempo di scarica dipende dalla potenza richiesta dal carico (per esempio, considerando grandezze

specifiche, ossia per unità di peso, se una batteria è in grado di fornire 200 Wh, con un carico che ha una potenza di 200 W la batteria si scaricherebbe in un'ora, mentre con un carico da 20 W la batteria si scaricherebbe in 10 ore; questo teoricamente, bisogna considerare anche le perdite nella realtà).

Di questo fatto nel diagramma di Ragone si tiene conto considerando il *rapporto P/E* (dove P è la potenza ed E l'energia): questo rapporto è l'inverso di un tempo (s^{-1}). Tale rapporto viene indicato sull'ordinata di destra, dalla quale partono delle curve che stanno a rappresentare un rapporto P/E costante (0,01 - 0,1 - 1 - 10 - ecc.).

Già da questo grafico si evidenzia la chiara potenzialità e superiorità della tecnologia *litio – ioni* rispetto alle altre. ***Dal punto di vista tecnico non ci sono quindi dubbi nel poter affermare che gli accumulatori agli ioni di litio, almeno per il momento, rappresentano il futuro nel campo della trazione elettrica.***

Si evidenziano comunque anche le ottime potenzialità delle *batterie ZEBRA* (NaNiCl), che rappresentano una valida alternativa alla tecnologia al litio per quanto riguarda il campo dei BEV, e delle *batterie NiMH*, che oltre ad essere già una realtà affermata nel campo degli HEV, potranno comunque continuare ad essere un'ottima alternativa al litio quando quest'ultimo diventerà una tecnologia più forte e matura.

CAPITOLO 3

ASPETTI AMBIENTALI

3.1 GENERALITA'

In questo capitolo si vogliono analizzare individualmente le diverse tecnologie di accumulo per permettere un confronto sull'impatto ambientale che hanno le diverse batterie per BEV e HEV. Questo confronto può essere fatto in modo quantitativo oppure qualitativo.

Le tecnologie più diffuse (Ni – Cd, NiMH, ZEBRA, Li – Ion, e Piombo) possono essere analizzate con più precisione in modo quantitativo attraverso una **valutazione del ciclo di vita (LCA, life cycle assessment)**; le altre meno diffuse (come Ni – Zn, Zn – aria e Li – Pol) vengono valutate in modo qualitativo a causa di un loro minore sviluppo e di una diffusione di dati meno esaustiva.

3.2 TOSSICITA'

Tutte le tecnologie di batterie contengono più o meno componenti tossici. Nella tabella seguente si vogliono evidenziare i principali componenti tossici nelle più diffuse tecnologie, evidenziando gli effetti sulla salute a breve e a lungo termine ed i dati relativi all'ambiente. Si tenga presente che questo elenco non è esaustivo e che alcuni composti tossici specifici potrebbero non ancora essere studiati a fondo dal punto di vista tossicologico.

	Effetti sulla salute a breve termine in caso di esposizione	Effetti sulla salute a lungo termine in caso di esposizione	Dati ambientali
Pb – acido			
PbO₂	n.d.	<u>bersagli</u> : ossa, sangue, sistema nervoso centrale, sistema nervoso periferico, reni; <u>effetti</u> : anemia, encefalopatia, malattie ai nervi, crampi addominali, indebolimento dei reni, effetti sulla riproduzione e sullo sviluppo.	Possibilità di bioaccumulazione.
Pb	n.d.	<u>bersagli</u> : ossa, sangue, sistema nervoso centrale, sistema nervoso periferico, reni; <u>effetti</u> : anemia, encefalopatia, malattie ai nervi, crampi addominali, indebolimento dei reni, effetti sulla riproduzione e sullo sviluppo.	Possibilità di bioaccumulazione.

H₂SO₄	<u>bersagli</u> : occhi, pelle, vie respiratorie; <u>effetti</u> : corrosione, edema polmonare.	<u>bersagli</u> : polmoni, denti; <u>effetti</u> : erosione dei denti; cancerogeno.	Nocivo per gli organismi acquatici.
Ni - Cd			
Ni(OH)₂	Può causare irritazione se entra in contatto con la pelle.	Evidenza limitata di un effetto cancerogeno.	Tossico per gli organismi acquatici; a lungo termine può avere effetti negativi sull'ambiente acquatico.
Cd(OH)₂	<u>bersagli</u> : occhi, vie respiratorie; <u>effetti</u> : edema polmonare, febbre.	<u>bersagli</u> : polmoni, reni; <u>effetti</u> : disfunzioni polmonari o renali, probabile effetto cancerogeno.	n.d.
KOH	<u>bersagli</u> : occhi, pelle, vie respiratorie; <u>effetti</u> : corrosione, edema polmonare.	<u>bersagli</u> : occhi; <u>effetti</u> : dermatite.	Pericoloso, soprattutto per gli organismi acquatici.
NiMH			
Ni(OH)₂	Può causare irritazione se entra in contatto con la pelle.	Evidenza limitata di un effetto cancerogeno.	Tossico per gli organismi acquatici; a lungo termine può avere effetti negativi sull'ambiente acquatico.
Idruri di nichel	n.d.	n.d.	n.d.
KOH	<u>bersagli</u> : occhi, pelle, vie respiratorie; <u>effetti</u> : corrosione, edema polmonare.	<u>bersagli</u> : occhi; <u>effetti</u> : dermatite.	Pericoloso, soprattutto per gli organismi acquatici.
Li - Ion			
LiCoO₂	n.d.	n.d.	n.d.
LiPF₆	Tossico per la pelle, pericoloso se ingerito.	n.d.	n.d.
DMC	n.d.	n.d.	n.d.
Li - Pol			
Li	<u>bersagli</u> : occhi, pelle, vie respiratorie; <u>effetti</u> : corrosione, edema polmonare.	n.d.	n.d.
V₂O₅	<u>bersagli</u> : occhi, pelle, vie respiratorie; <u>effetti</u> : irritazione, edema polmonare, bronchite, broncospasmo.	<u>bersagli</u> : polmoni; <u>effetti</u> : colorazione verde-nero della lingua	Nocivo per gli organismi acquatici.

Ni – Zn			
Ni(OH)₂	Può causare irritazione se entra in contatto con la pelle.	Evidenza limitata di un effetto cancerogeno.	Tossico per gli organismi acquatici; a lungo termine può avere effetti negativi sull'ambiente acquatico.
MnO₂	<u>bersagli</u> : vie respiratorie; <u>effetti</u> : irritazione.	<u>bersagli</u> : polmoni, sistema nervoso centrale; <u>effetti</u> : aumenta la predisposizione alle bronchiti, polmoniti e malattie neurologiche, disturbi neuropsichiatrici (manganismo).	Pericoloso, soprattutto per gli organismi acquatici.
KOH	<u>bersagli</u> : occhi, pelle, vie respiratorie; <u>effetti</u> : corrosione, edema polmonare.	<u>bersagli</u> : pelle; <u>effetti</u> : dermatiti.	Pericoloso, soprattutto per gli organismi acquatici.

3.3 ANALISI QUANTITATIVA

METODO DI ANALISI E DI VALUTAZIONE

Effettuare un'analisi dal punto di vista ambientale non è sicuramente una cosa semplice, visti i numerosi aspetti da prendere in considerazione, ed è inoltre difficile quantificare in che modo e quanto una tecnologia possa essere dannosa per l'ambiente. Risulta fondamentale definire delle "condizioni al contorno" che evidenzino la situazione.

Non esiste una metodologia di valutazione universalmente conosciuta ed utilizzata. A causa della soggettività della scelta chi esegue lo studio di impatto ambientale deve descrivere e motivare chiaramente le metodologie e gli strumenti adottati. Tali variazioni possono essere definite per mezzo di opportuni *indicatori* ed *indici ambientali*.

La fase successiva alla stima degli impatti potenziali si pone lo scopo di valutarne la significatività in termini qualitativi e/o quantitativi. Si tratta di stabilire se le modificazioni dei diversi indicatori produrranno una variazione (significativa) della qualità ambientale. A tal scopo è necessario indicare l'entità degli impatti potenziali rispetto ad una scala omogenea che consenta di individuare le criticità ambientali mediante la comparazione dei vari impatti.

Esistono dei software appositamente studiati e realizzati per questo tipo di valutazioni, ed un modo per fare un'analisi ambientale è proprio quello di sviluppare un'analisi del ciclo di vita (**LCA**, *life*

cycle assessment) per i differenti tipi di tecnologia per introdurre poi i dati nell'apposito programma. Uno strumento di questo tipo permette un confronto tra le differenti fasi del ciclo di vita delle varie batterie per trazione, evidenziando anche la più dannosa dal punto di vista ambientale.

Un esempio di questo metodo di analisi è il software usato nel progetto SUBAT (*Sustainable Batteries*) sviluppato dall'Università di Bruxelles pochi anni fa: questo programma utilizza un metodo di valutazione del ciclo di vita chiamato "eco-indicator 99", che ha lo scopo di legare ogni fase del ciclo di vita della batteria con il relativo impatto ambientale. Il risultato di questo software viene espresso attraverso un punteggio "eco-indicatore": un alto punteggio sta a significare un alto impatto ambientale.

In questo elaborato si considera un metodo di valutazione di questo tipo, dove i risultati sono espressi tramite dei punteggi ottenuti attraverso l'utilizzo di un apposito software: questo programma è realizzato per tenere conto (in ogni singola tecnologia considerata) della tossicità e della produzione di elementi o componenti dannosi e/o pericolosi per l'ambiente e per l'uomo durante l'intero ciclo di vita della batteria.

Una tipica LCA si divide nelle seguenti fasi:

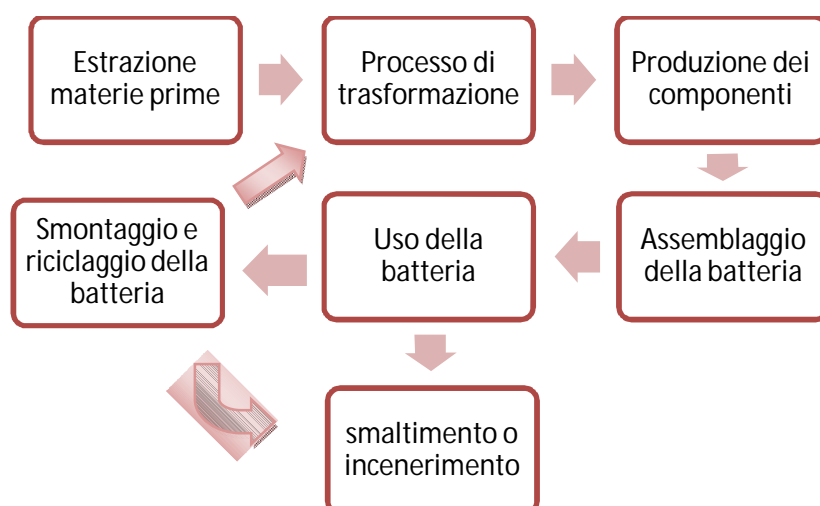
- **classificazione:** i dati relativi all'impatto ambientale devono essere suddivisi in categorie; per esempio la CO₂ (anidride carbonica) e il CH₄ (gas metano) prodotti dalle varie tecnologie vengono inseriti nella categoria "surriscaldamento globale";
- **caratterizzazione:** una volta che i risultati sono stati assegnati alle rispettive categorie devono necessariamente essere definiti dei fattori che indicano il contributo relativo di un particolare elemento (p.e. CO₂) nella relativa categoria; per esempio se il contributo del metano è 23 volte superiore a quello dell'anidride carbonica per quanto riguarda il surriscaldamento globale, allora significa che se il fattore che caratterizza la CO₂ è 1, quello che caratterizza il CH₄ è 23;
- **normalizzazione e ponderazione:** i dati ed i risultati relativi alle varie categorie vengono raggruppati ed uniformati secondo una base comune in modo da essere normalizzati e resi confrontabili;
- **analisi "di sensibilità":** si controllano i dati in base alle ipotesi fatte e si fa una valutazione razionale dei risultati ottenuti in modo da poterne verificare l'attendibilità, ed eventualmente si ripete il procedimento modificando le ipotesi.

Come già evidenziato, prima di eseguire un LCA è necessario porre delle condizioni al contorno, andando innanzitutto a definire quali sono i vari passaggi nella vita della batteria che vengono considerati ed analizzati.

Quando si considera il ciclo di vita di una batteria bisogna considerare tutte le seguenti fasi di vita della batteria stessa:

- **estrazione** delle materie prime;
- **attività di trattamento** dei materiali e dei componenti;
- **uso** della batterie nel veicolo;
- **riciclaggio** di batterie usate;
- **smaltimento finale o incenerimento**.

Di seguito viene riportato un piccolo schema a blocchi che rappresenta in maniera semplice ma efficace il ciclo di vita di una batteria per trazione.



Alcune ipotesi fatte per lo studio

L'auto-scarica della batteria non viene considerata nell'analisi in quanto è fortemente dipendente dal modo di utilizzo del veicolo. Nemmeno la manutenzione viene presa in considerazione in quanto si presume che il suo impatto sia relativamente piccolo. Per quanto riguarda l'energia elettrica prodotta si può fare riferimento al mix di produzione elettrica europeo. Quando si considerano materiali riciclati si suppone che essi abbiano le medesime caratteristiche e proprietà dei materiali nuovi. Per quanto riguarda la percentuale di raccolta delle batterie usate è realistico considerare un tasso del 100 %, viste le grandi dimensioni di queste batterie (non si sta parlando di pile da telecomando o da lettore cd di piccole dimensioni che possono essere gettate ovunque in

modo indisturbato) e visto che la maggioranza degli utilizzatori per la sostituzione dovrebbe comunque rivolgersi a personale specializzato (elettrauto o meccanico per esempio) che provvederebbe poi a portare la batteria da chi di dovere. Per quanto riguarda il riciclaggio si può considerare un tasso del 95 % vista la tecnologia e le conoscenze raggiunte, ad eccezione però per le batterie al piombo: questa tecnologia infatti è la più antica e matura, la più conosciuta, ed è quindi più realistico considerare un tasso più alto, del 98 o 99 % per esempio. Infine si considera che prima di un eventuale smaltimento l'elettrolita venga neutralizzato (ad eccezione della tecnologia al piombo dove l'elettrolita viene per il 90 % recuperato e per il restante 10 % neutralizzato).

IMPATTO AMBIENTALE

Il termine "**impatto**" sottolinea l'effetto che un'azione di origine antropica (come nel nostro caso) o naturale genera su di un bersaglio ambientale o umano. In termini generali gli impatti ambientali devono essere intesi come alterazioni delle singole componenti o dei sistemi ambientali prodotte da interventi di origine esterna.

Le componenti ambientali fondamentali che devono essere prese in considerazione (in questo caso anche dal software che si utilizza per lo studio) sono le seguenti:

- **atmosfera;**
- **ambiente idrico;**
- **suolo e sottosuolo;**
- **vegetazione, fauna ed ecosistemi;**
- **paesaggio e clima fisico;**
- **salute umana e pubblica.**

Quando quindi viene dato un certo punteggio ad una certa tecnologia, questo punteggio tiene conto di quanto la tecnologia in considerazione va ad incidere sui fattori appena elencati.

Si valuta quindi quanto il ciclo di vita di una certa tecnologia possa essere dannoso per l'uomo e per l'ambiente, considerando tutte le sue fasi e considerando tutti i fattori ambientali che possono essere danneggiati dalla tecnologia stessa: viene considerata la tossicità e la produzione di elementi dannosi (come per esempio la ben nota CO₂) per i fattori prima considerati che la tecnologia comporta sia direttamente che indirettamente nel suo complesso.

Tutto ciò viene espresso dal software attraverso un punteggio ed i dati possono essere poi confrontati prendendo una tecnologia come riferimento e ponendola con valore 100 per facilitare il confronto, adattando tutti gli altri valori di conseguenza.

Nella rappresentazione dei risultati per quanto riguarda i **BEV** viene inoltre fatta una suddivisione dell'impatto ambientale in 3 "categorie":

- **produzione e riciclaggio:** effetti negativi a livello ambientale che si evidenziano durante le fasi di produzione e di riciclaggio della batteria; si considerano in questa fase tutto l' "inquinamento" causato dalla produzione e dal trasporto dei vari elementi della batteria, dal suo assemblaggio, dal suo trasporto fino al montaggio sul veicolo e da tutto ciò che riguarda il suo riciclaggio o lo smaltimento;
- **perdite di energia dovute al peso della batteria:** rappresenta la "fetta" di inquinamento causata dal grande peso della batteria nel complesso del veicolo, peso che fa certamente aumentare le perdite;
- **perdite di energia dovute all'efficienza della batteria:** il fatto che l'efficienza di una batteria non sia chiaramente il 100% è causa di ulteriori perdite di energia, che giocano anch'esse un ruolo a livello di impatto ambientale.

*È comunque importante ricordare che una quota veramente importante (forse la più importante) di produzione di "inquinamento ambientale" è dovuta alla fase di **PRODUZIONE DELL'ENERGIA ELETTRICA** (basti pensare all'impatto ambientale delle centrali che utilizzano combustibili fossili per esempio): una decisa e rilevante svolta nel mix di produzione energetica a livello mondiale (potenziando per esempio la produzione da fonti rinnovabili, il nucleare a fissione e forse un giorno l'affermazione della fusione termonucleare controllata) potrebbe veramente portare ad una drastica riduzione dell'impatto ambientale, e ovviamente non solo per quanto riguarda le batterie per trazione.*

3.3.1 VEICOLI A PROPULSIONE ELETTRICA PURA (BEV)

In questo tipo di veicoli l'alimentazione è totalmente elettrica. La batteria è quindi il cuore del veicolo. La massa della batteria dipende dalla tecnologia scelta. Se per esempio si ha un veicolo con un accumulatore da 12 kWh (valore tipico), se la densità di energia dell'accumulatore fosse 48 Wh/kg la batteria peserebbe 250 kg, mentre se la densità di energia fosse 60 Wh/kg peserebbe 200 kg. Di conseguenza è vero anche che i consumi energetici variano al variare del tipo di batteria.

Un elemento molto importante per la valutazione del ciclo di vita è l'**unità funzionale (F.U., functional unit)**, in quanto fornisce il riferimento in base al quale tutti gli altri dati vengono normalizzati e quindi confrontati. La più indicata F.U. è quella che include batterie che permettono al veicolo di percorrere la medesima distanza con una carica (60 km per esempio) al di là della tecnologia utilizzata. Inoltre la F.U. implica di considerare un certo numero di cicli (3000), che corrisponde alla totale distanza coperta mediamente da un veicolo nella sua "vita" (circa 180'000 km). Si può dunque in base alla tecnologia andare a calcolare il numero di batterie necessarie per la F.U. determinata. L'ipotesi di considerare una F.U. costante permette di confrontare le batterie sulla base delle stesse condizioni.

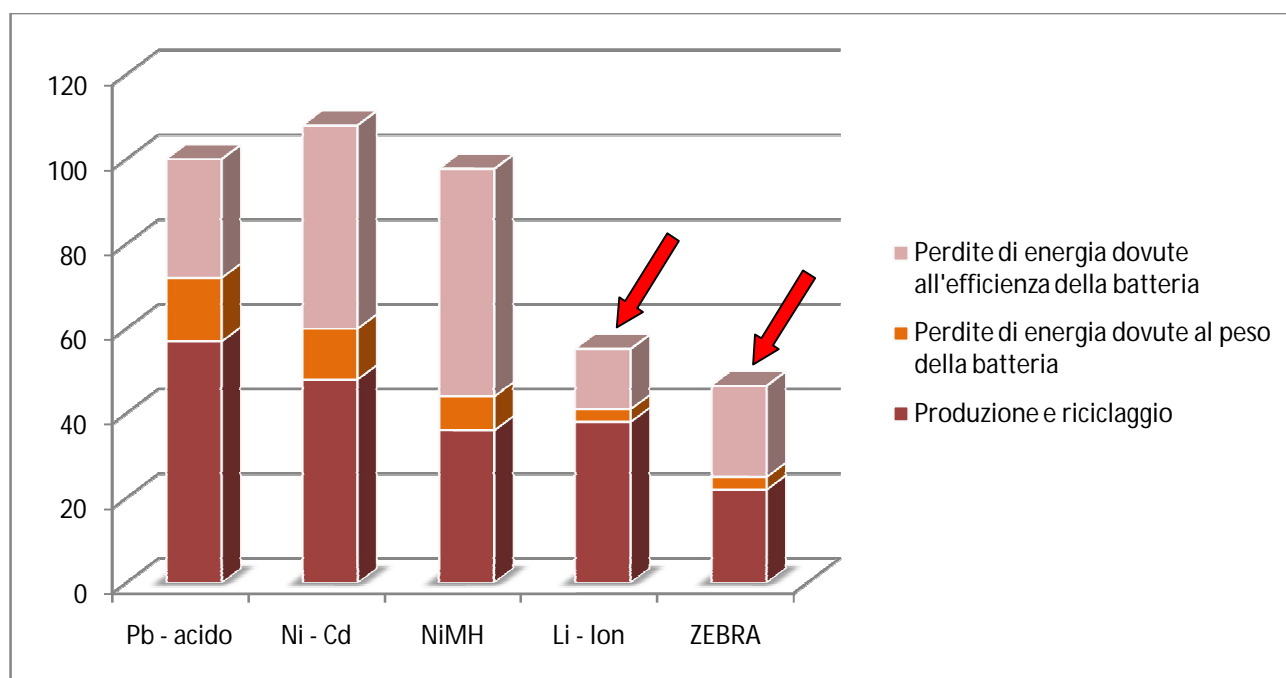
A parità di condizioni quindi (unità funzionale costante) si ottengono i seguenti dati:

Tecnologia	Massa (kg)	Contenuto energetico della batteria (kWh)	Distanza percorsa con un ciclo (km)	Numero di cicli	Numero di batterie necessarie	Distanza percorsa nel ciclo di vita (km)
Pb - acido	344	13,78	60	3000	6	180000
NiMH	222	15,53	60	3000	2,22	180000
Ni - Cd	253	15,16	60	3000	2,22	180000
Li - Ion	92	11,49	60	3000	3	180000
ZEBRA	97	12,07	60	3000	3	180000

Guardando questa tabella è lampante notare per esempio come le batterie al litio risultino notevolmente più leggere ed efficienti di quelle al piombo.

Quando si considera il ciclo di vita di una batteria l'energia persa dalla batteria stessa ha una significativa importanza a livello di impatto ambientale. E' importante però dire che questo impatto dipende dalle tecnologie con le quali l'energia elettrica viene prodotta: un incremento di produzione da fonti rinnovabili potrebbe far drasticamente calare questo impatto.

Nella figura seguente viene rappresentato l'**impatto ambientale** di ogni tipo di batteria considerando la tecnologia Pb - acido come riferimento (valore 100).



Se si considera solamente l'impatto ambientale della sola batteria (produzione e riciclaggio) si nota che la tecnologia Pb – acido è quella con maggiore impatto, seguita da Ni – Cd, Li – Ion, NiMH, e ZEBRA. Quando invece si vanno ad includere gli effetti dovuti alle perdite si vede che tre tecnologie sembrano avere un impatto ambientale superiore rispetto alle altre due. L'inclusione delle perdite produce un impatto ambientale elevato per le tecnologie Pb – acido, Ni – Cd e NiMH e decisamente minore per **litio** e **ZEBRA**. L'impatto delle perdite addizionali di energia dovute all'efficienza ed al peso dipende largamente dal modo di produzione dell'elettricità. Quindi questo impatto potrebbe, come già detto, essere notevolmente ridotto modificando il mix di produzione dell'energia elettrica.

E' giusto però osservare che, essendo le tecnologie al litio e ZEBRA abbastanza recenti, potrebbe essere che gli impatti reali siano leggermente differenti, a causa della complessità degli elettroliti utilizzati nelle batterie al litio e alla possibile mancanza di dati relativi a tali tecnologie (gli impatti in realtà potrebbero essere leggermente peggiori).

Bisogna essere inoltre consapevoli che, per essere proprio precisi, l'impatto ambientale di un singolo veicolo con un certo tipo di batteria dipende anche dal tipo di caricatore, dalla caratteristica di carica, dalla temperatura esterna, dal metodo di produzione dell'elettricità, dal modo di guida del veicolo ed in generale da fattori che difficilmente possono essere messi a confronto in un'analisi complessiva. È dunque chiaro che i dati hanno sicuramente un, seppur non eccessivo, margine di errore.

Un'OSSERVAZIONE interessante è quella di notare che, in certi casi, dal punto di vista ambientale potrebbe risultare più efficiente cambiare o migliorare i metodi di produzione dell'energia elettrica (potenziando le fonti rinnovabili per esempio) piuttosto che migliorare la produzione di batterie o i metodi del loro riciclaggio. Non è comunque sicuramente banale fare valutazioni di questo tipo vista la delicatezza dell'argomento "ambiente".

3.3.2 VEICOLI IBRIDI (HEV)

I veicoli ibridi sono definiti come veicoli che hanno a bordo almeno due diversi fonti di energia per poter dare potenza meccanica all'albero. Il ruolo della batteria in un HEV è diverso rispetto al ruolo che ricopre in un BEV. In un HEV il motore a combustione interna fornisce l'energia, mentre la batteria fornisce gli improvvisi aumenti di potenza. Di conseguenza è la potenza della batteria a giocare un ruolo chiave in questi veicoli.

Nella tabella che segue si vogliono ricordare le caratteristiche tecniche delle batterie per HEV (considerando anche le ZEBRA: questa batteria, come evidenziato negli aspetti tecnici, ha la peculiarità di avere un'alta energia specifica, mentre per quanto riguarda la potenza specifica è decisamente inferiore rispetto ad un accumulatore al litio, come si evidenzia in tabella):

Tecnologia	Potenza specifica (W/kg)	Cicli (numero relativo)
Pb - acido	350	1
Ni - Cd	500	3
NiMH	1500	3
Li - Ion	2000	3
ZEBRA	200	3

Il numero di cicli dipende molto dal modo in cui viene utilizzato il veicolo (soprattutto dalle scariche della batteria) e quindi viene dato in numero relativo.

Si va nuovamente a considerare l'unità funzionale (F.U.) definita nel paragrafo precedente, ma questa volta però si considera come potenza di confronto una potenza di 21 kW (simile a quella della già citata Toyota Prius). La quantità di batterie necessaria, e quindi il peso complessivo dell'accumulatore, si ottiene dividendo tale potenza per la potenza specifica di ciascuna tecnologia. L'obiettivo è quello di confrontare l'impatto ambientale di ciascuna tecnologia. Si suppone inoltre

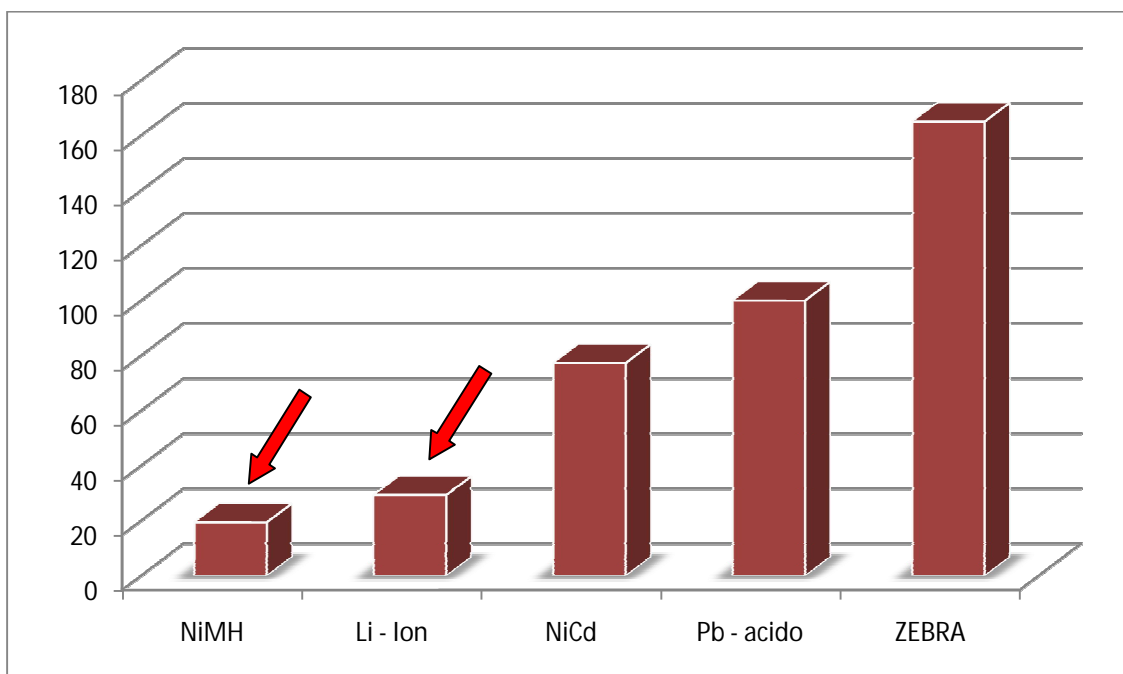
di non dover effettuare mai la sostituzione della batteria durante tutta la vita del veicolo, fatta eccezione per la tecnologia al piombo la quale, avendo un numero di cicli tre volte inferiore, si considera che venga sostituita due volte (quindi in tutto servono tre batterie).

Le caratteristiche sono le seguenti:

Tecnologia	Massa (kg)	Numero di batterie
Pb - acido	60	3
NiMH	14	1
Ni - Cd	42	1
Li - Ion	10,5	1
ZEBRA	105	1

Il confronto a livello di impatto ambientale può essere fatto anche in maniera specifica, considerando cioè l'impatto per kg di ogni tecnologia.

Nell'istogramma seguente viene rappresentato l'**impatto ambientale** di ogni tipo di batteria considerando la tecnologia Pb - acido come riferimento (valore 100).



Si vede chiaramente dal grafico il pessimo impatto ambientale delle batterie ZEBRA seguite da quelle al Piombo, mentre si evidenzia un impatto decisamente migliore per le tecnologie **NiMH** e **litio**. Come detto nel caso dei BEV bisogna sempre considerare un margine di errore possibile nei

dati, causato soprattutto dalla complessità dell'argomento e dall'eventuale mancanza di precisi dati e studi ancora in fase di sviluppo.

Resta comunque vero che le batterie ZEBRA sono ben più adatte per i BEV vista la loro grande energia specifica, mentre sono tutt'altro che una buona soluzione per gli HEV.

3.3.3 DISCUSSIONE DEI RISULTATI

- **Importanza del riciclaggio**

L'impatto ambientale dell'assemblaggio e delle fasi di produzione può essere compensato in larga misura quando la raccolta ed il riciclaggio delle batterie è efficiente e realizzato su larga scala.

- **Importanza dell'efficienza e dei metodi di produzione dell'energia elettrica**

Siccome una consistente fetta dell'impatto ambientale delle batterie è dovuta alle perdite energetiche (dovute all'efficienza ed al peso delle batterie), l'efficienza, così come i metodi di produzione dell'energia elettrica, gioca un ruolo fondamentale nel generale impatto ambientale delle batterie e va perciò preso attentamente in considerazione.

- **Applicazioni**

Come si è potuto notare nei paragrafi precedenti, a seconda del tipo di applicazione (BEV o HEV per esempio) e dei corrispondenti parametri tecnici, il livello di impatto ambientale globale delle diverse tecnologie risulta essere differente. Questo implica che non è possibile stabilire univocamente che una tecnologia sia "amica" dell'ambiente ed un'altra invece no. Si può dunque stabilire solamente che una tecnologia di batterie è a basso impatto ambientale rispetto ad altre in una particolare e precisa applicazione.

Nell'analizzare i risultati bisognerebbe comunque ricordare che l'impatto ambientale delle batterie per veicoli elettrici è comunque piccolo (qualsiasi sia la tecnologia utilizzata) rispetto a quelli che sono invece i danni ambientali provocati dai veicoli con normale motore a combustione interna.

Da un punto di vista tecnico solamente tre (Ni – Cd, NiMH, Li – Ion) sono le tecnologie che possono essere prese in considerazione come potenziali soluzioni per gli HEV; in realtà, al giorno d'oggi vengono considerate solamente le tecnologie **NiMH e Li – Ion** (la tecnologia al cadmio viene eliminata per la sua tossicità) dai produttori di veicoli ibridi. Le tecnologie Pb – acido e ZEBRA non sono assolutamente adatte a causa del loro elevato peso.

Per quanto riguarda invece i **BEV** si può dire che, sia per il loro peso limitato, sia per la loro grande energia specifica e sia per il loro più basso impatto ambientale, le batterie **ZEBRA** e **Li – Ion** rappresentano delle ottime potenziali soluzioni.

3.4 ANALISI QUALITATIVA

Nel paragrafo precedente sono state discusse le principali e comuni tecnologie di accumulo in modo quantitativo. Tuttavia ci sono altre interessanti, seppur di minore diffusione ed utilizzo, tecnologie che possono essere descritte almeno in modo qualitativo (alcune sono ancora in fase di studio e non ancora in commercio su larga scala).

3.4.1 NICHEL - ZINCO (Ni – Zn)

Queste batterie non contengono particolari materiali pericolosi; le batterie non trattate potrebbero però essere considerate come rifiuti pericolosi a causa dell'elettrolita (alcalino) corrosivo, ma questo si potrebbe recuperare risolvendo così il problema. Le batterie Ni – Zn contengono una materia prima pregiata come il nichel, che è altamente riciclabile. Il recupero ed il riciclo del nichel è relativamente semplice ed avrebbe senso sia dal punto di vista ambientale che da quello economico. Per riciclare queste batterie si possono utilizzare metodologie simili a quelle utilizzate per le batterie NiMH o ZEBRA.

La tecnologia Ni – Zn intrinsecamente mostra dei vantaggi dal punto di vista ambientale. Tuttavia questi vantaggi vengono parzialmente oscurati da un basso numero di cicli, che obbliga l'utilizzo di un elevato numero di batterie durante la vita del veicolo. Per quanto riguarda gli HEV l'impatto ambientale di questa tecnologia è abbastanza alto, mentre la potenza messa a disposizione è bassa.

3.4.2 LITIO - POLIMERI (Li – Pol)

Il riciclaggio delle batterie litio – polimeri è un settore dove si deve lavorare. Molti componenti di questa tecnologia sono comuni a quelli della tecnologia agli ioni di litio, ma l'uso di un polimero solido potrebbe complicare lo smaltimento ed il recupero dei nuovi materiali.

Per quanto riguarda le prestazioni tecniche (energia e potenza specifica, numero di cicli) di queste batterie, esse sono leggermente inferiori a quelle delle batterie agli ioni di litio.

Questo tipo di accumulatori può essere una buona potenziale soluzione sia per i BEV che per gli HEV in quanto vanno a compensare il problema della sicurezza relativo alla tecnologia agli ioni. Le

caratteristiche tecniche implicano che l'impatto ambientale dovrebbe essere in qualche modo superiore rispetto alle batterie Li – Ion; questo è alla necessità di una maggiore quantità di materiale necessaria per l'assemblaggio.

3.4.3 ZINCO - ARIA

In questo sistema, gli anodi di zinco usati sono rimossi dalla batteria e vengono trattati elettrochimicamente. I materiali utilizzati non sono tossici e dovrebbero essere abbastanza semplici da gestire. Le celle contengono KOH (idrossido di potassio), che dovrebbe essere neutralizzato, e a parte lo zinco utilizzato per l'anodo, che viene riciclato durante la vita della batteria, i materiali utilizzati sono acciaio, carbonio, plastica, rame e nichel. Una completa valutazione ambientale dovrebbe tenere conto delle emissioni e dei rifiuti dovuti alla ricarica meccanica (fisica) delle batterie (impatto ambientale diretto).

A causa della loro relativamente bassa energia specifica, gli accumulatori zinco – aria non sono adatti ad essere utilizzati sui veicoli ibridi. Tuttavia si prestano bene invece, grazie alla loro più alta energia specifica, ad essere utilizzati sui BEV anche se hanno lo svantaggio della ricarica meccanica (gli elettrodi vanno sostituiti). Teoricamente questa tecnologia permette un numero di cicli molto alto.

Questo tipo di tecnologia si presterebbe bene ad essere utilizzata su veicoli commerciali aziendali, soprattutto se sono in numero consistente (veicoli in serie), in quanto in questo caso sarebbe possibile realizzare una stazione centralizzata per la rigenerazione e la sostituzione degli anodi di zinco. Da un punto di vista ambientale non vi sono problemi cruciali in quanto i componenti della batteria zinco - aria non presentano grande tossicità. La specificità di questa tecnologia (ricarica meccanica) rende però molto più difficile il confronto con gli altri tipi.

3.4.4 CONSIDERAZIONI

Come per tutte le tecnologie, è fondamentale definire l'applicazione nella quale la batteria andrà ad essere utilizzata e scegliere un'appropriata base di riferimento prima di effettuare un qualsiasi confronto. Come già visto nell'analisi quantitativa, le caratteristiche ed i parametri tecnici influenzano la massa della batterie richiesta ed il numero di batterie richieste per l'unità funzionale. Le tecnologie descritte in questo paragrafo non sono largamente utilizzate e sono sicuramente necessarie ulteriori ricerche e sviluppo per ottenere miglioramenti tecnologici e minore impatto ambientale.

Questa breve analisi qualitativa ha fornito le principali caratteristiche sul riciclaggio e sulle applicazioni sintetizzando la fattibilità pratica di queste tecnologie.

Come è stato discusso precedentemente in questo capitolo, il riciclaggio delle batterie è di fondamentale importanza, in quanto si possono risparmiare risorse e ridurre l'impatto ambientale complessivo del ciclo di vita delle batterie. Naturalmente questa conclusione si mantiene valida anche per le batterie appena discusse.

Infine è forse superfluo ricordare che quando si valuta la migliore soluzione da adottare su un veicolo BEV o HEV per quanto riguarda l'accumulatore, bisogna chiaramente prendere in considerazione (forse più di tutti) anche i fattori tecnici ed economici legati alle varie tecnologie. Il costo e le prestazioni sono infatti due elementi essenziali nei progetti di qualsiasi autoveicolo.

CAPITOLO 4

ASPETTI ECONOMICI

4.1 GENERALITA'

Come già precedentemente accennato, per tutti i tipi di veicoli a propulsione elettrica (sia pura che ibrida) la batteria è certamente uno dei componenti più costosi indipendente dalle dimensioni più o meno grandi.

Lo scopo di questa analisi è quello di dare una valutazione economica generale per le varie tecnologie di batterie che risultano interessanti nel campo della trazione elettrica. Un confronto tra i vari prezzi e i vari costi non è sicuramente cosa banale ed immediata vista la complessità dell'argomento, ed è quindi necessario, in alcuni casi, fare alcune ipotesi specificando i metodi di valutazione assunti.

4.2 STIMA DEL PREZZO PER UNA SPECIFICA TECNOLOGIA

Assumendo l'ipotesi di una ben conosciuta tecnologia commercializzata a grandi livelli e prodotta da un diverso numero di produttori, con un preciso design e una precisa composizione chimica (come potrebbe essere ad esempio la batteria NiMH, usatissima per veicoli ibridi), l'attuale stima dei costi e dei prezzi potrebbe essere eseguita secondo queste seguenti fasi:

- studio tecnologico per stabilire i differenti tipi di materiali necessari e l'importo di ciascuno di essi per ogni singola cella tipica della batteria;
- studio tecnico delle prestazioni per stabilire le caratteristiche delle celle tipiche da valutare (se le celle hanno composizione diversa, nel caso di applicazioni con grande potenza o grande energia);
- confronto tra la composizione chimica delle celle a seconda dei diversi produttori;
- stima del valore medio della composizione chimica delle celle (ed impatto sul costo, portando in ogni caso ad un valore minimo e ad un valore massimo);
- analisi e raccolta di dati sul prezzo delle materie prime (valori massimi e minimi);
- costo della cella in base ai prodotti da realizzare (due casi: alta potenza ed alta energia);
- valutazione del costo della cella tenendo conto del costo del lavoro e dei costi aggiuntivi di assemblaggio della batteria con un certo numero di celle.

A questo punto della valutazione si rende necessario scegliere delle specifiche tecniche precise per una data applicazione, in modo da ottenere costi e prezzi realistici per la batteria. A seconda della tecnologia scelta, il prezzo della batteria calcolato può essere diverso per alcune ragioni:

- la dimensione della batteria è diversa a seconda della scelta di potenziare l'energia (BEV) o la potenza (HEV);
- i costi aggiuntivi non sono sempre solo funzione della dimensione della batteria;
- la progettazione della batteria può essere completamente diversa a seconda dei produttori.

Vediamo un piccolo esempio di calcolo del costo di una cella per una batteria agli ioni di litio:

Componente	Peso (%)	Costo max (€/kg)	Costo min (€/kg)	Peso (g)	Costo massimo (€)	Costo minimo (€)	% max	% min
Materiale attivo del catodo	33	45	38	330	14,85	12,54	47,00	45,44
Collettore (Al) e altro Al	8,5	21	19	85	1,79	1,62	5,65	5,85
Materiale attivo dell'anodo	17	21	18	170	3,57	3,06	11,30	11,09
Collettore (Cu) e altro Cu	12	15	14	120	1,80	1,68	5,70	6,09
Separatore	1,5	140	120	15	2,10	1,80	6,65	6,52
Elettrolita	19	21	20	190	3,99	3,80	12,63	13,77
Imballaggio	9	3,5	3,1	90	3,50	3,10	11,08	11,23
			peso totale	1000 (1 kg)				
Costo totale					31,60	27,60		

Il costo completo della batteria viene poi fatto facendo una valutazione del costo complessivo di produzione della batteria (sistema di gestione della batteria, costi di assemblaggio, costo del lavoro, costi aggiuntivi).

Per quanto riguarda invece il prezzo della batteria, quest'ultimo deve tenere conto anche di eventuali altri costi di produzione e trasporto, di costi marginali e del guadagno. Questa fase è tutt'altro che semplice ed è una delle principali cause dei problema nelle stime dei prezzi; solitamente i costi di produzioni e della società produttrice vengono valutati tra il 30 ed il 45 % del prezzo finale della batteria. È comunque difficile reperire un cospicuo numero di dati a riguardo. Al fine di ottenere dei valori attendibili è sempre conveniente esprimere due valori, un minimo ed un massimo, in accordo con i valori più comuni.

I risultati vengono espressi in termini di **prezzo della batteria** e vengono dati in **€/kWh** per le batterie che ottimizzano l'energia specifica (BEV) e in **€/kW** invece per le batterie che ottimizzano la potenza specifica (HEV).

Questo metodo di valutazione risulta essere adatto per le tecnologie NiMH, ZEBRA e Li – Ion, mentre per una tecnologia come quella al piombo sembra inadatta. Infatti a causa di degli enormi miglioramenti tecnologici avvenuti nel corso degli anni (si ricorda che questa è la tecnologia più antica in assoluto) dalle varie compagnie specializzate, diventa quasi impossibile analizzare una relazione tra le migliori prestazioni tecniche ed il conseguente prezzo della batteria. Uno standard per le batterie VRLA AGM (eventualmente le più adatte alla trazione) con prestazioni classiche si aggira attorno ai 120 €/kWh, che possono arrivare fino a 300 €/kWh nel caso di VRLA avanzate di tipo bipolare.

Ma dato che le prestazioni tecniche della tecnologia al piombo sono sempre nettamente inferiori rispetto alle altre tecnologie, si può assumere l'ipotesi che tali batterie possono interessare ai produttori di veicoli elettrici solamente per il loro basso prezzo, e non di certo per le caratteristiche tecniche o di peso.

Per quanto riguarda le batterie Ni – Cd per trazione, solamente un produttore nel mondo (SAFT) commercializza queste batterie, ma è giusto precisare che tale mercato è in continuo calo dal 2000: si cerca di eliminare progressivamente questa tecnologia soprattutto a causa della già citata tossicità del cadmio.

Infine considerando le tecnologie più nuove, come Ni – Zn, Zn – aria o litio polimeri, risulta più difficile fare una valutazione dei prezzi e fare poi un confronto con le altre tecnologie più affermate a causa soprattutto di una grande differenza nello sviluppo industriale, dovuto ad un'ancora bassa diffusione di queste ultime tecnologie, ancora in fase di sviluppo.

Anche se si esprimono i risultati in termini di prezzo delle batterie, solamente la valutazione dei costi di produzione è realmente affidabile e soprattutto è funzione del materiale attivo, utilizzato per la produzione. Quando si fanno delle stime di prezzi si tende a considerare un certo costo di produzione considerando dei valori medi per le spese generali ed i costi aziendali. I risultati che si ottengono vanno confrontati con estrema cautela in quanto esiste una stretta relazione tra l'andamento del mercato e tali prezzi, che talvolta potrebbero verificarsi essere anche poco realistici.

Quando poi si parla di prezzo minimo e prezzo massimo bisogna prestare attenzione al fatto che non sempre il significato è lo stesso. In altre parole, molto spesso i valori massimo e minimo possono

essere ottenuti come media di vari criteri, e non è detto rappresentino esattamente il massimo o il minimo. Per una tecnologia matura, come il piombo, il prezzo minimo risulta essere realmente il minimo valore che si può trovare nel mercato; mentre per tecnologie più avanzate come quella al litio per esempio, il prezzo minimo è il risultato della minimizzazione di vari criteri di valutazione: il risultato quindi risulta essere non un prezzo minimo stimato, ma il limite inferiore della stima (sembra cioè impossibile trovare un prezzo inferiore a questo valore).



Attenzione ... all' "EFFETTO SCALA" ("scale effect" o "volume effect")

Un fattore molto significativo da considerare è il cosiddetto "effetto scala", che consiste in una tendenza alla riduzione del prezzo come conseguenza ad un incremento del volume di produzione da parte delle industrie. Questo effetto è stato al centro di molti studi per parecchi anni per cercare di definire una relazione tra il prezzo delle batterie ed il rispettivo volume di produzione. Questo fattore porta alle seguente importante conclusione:

- è impossibile e poco realistico andare a confrontare i prezzi di tecnologie diverse se i livelli di sviluppo industriale sono troppo diversi;



Il costo del materiale attivo rappresenta la parte principale dei costi di produzione in serie delle batterie (tra il 60 e l'80%). È opportuno distinguere due diverse situazioni:

- per le tecnologie al piombo e per quelle a base di nichel, il consumo industriale di queste materie prime nel campo della produzione di delle batterie è solamente una piccola parte di tutto il consumo industriale mondiale, e quindi il prezzo è fissato dal mercato senza alcuna (o comunque molto piccola) relazione con il volume di produzione delle batterie;
- per le tecnologie a base di litio invece, in caso di produzione di massa, il consumo di questa materia prima nel campo della produzione di batterie sarà il principale al mondo; di conseguenza il prezzo di tale tecnologia sarà enormemente influenzato dal volume di produzione, e si può perciò realisticamente prevedere una diminuzione del prezzo in conseguenza ad un aumento della produzione.

4.3 QUALCHE DATO

Reperire dati riguardo costi e prezzi delle tecnologie che sono state descritte non è cosa semplice, soprattutto a causa della continua variazione del mercato mondiale e dei numerosi fattori che vanno ad influenzare costi e prezzi.

Se una batteria per una data applicazione diminuisce di massa, e quindi di peso, come conseguenza di miglioramenti e sviluppi tecnologici, il suo costo tende a diminuire, ma non è detto che diminuisca anche il suo prezzo. Questo risultato è dovuto alla diminuzione della quantità di materiale attivo necessario per la fabbricazione. Potrebbe verificarsi inoltre che un certo materiale attivo possa essere sostituito da un altro ad un minor prezzo, determinando così un calo del costo.

Per avere un'idea delle cifre si può fare riferimento per esempio ad alcuni dati di pochi anni fa, e vedere poi invece che stima viene fatta per esempio per il 2012, dai quali si può comunque avere un quadro abbastanza chiaro dei prezzi delle tecnologie e delle loro variazioni. Si considerano sempre i veicoli a propulsione elettrica pura (**BEV**), per i quali si considera una batteria da **30 kWh**, e quelli ibridi (**HEV**), per i quali invece si può considerare una batteria da **40 kW** e 1,2 kWh.

... qualche anno fa ...

Batteria per BEV da 30 kWh

Tecnologia	Peso (kg)	Prezzo minimo (€)	Prezzo massimo (€)	€/kWh minimi	€/kWh massimi
Pb – acido	850	3480	4530	116	151
Ni – Cd	550	14700	21600	490	720
NiMH	430	16770	19980	559	666
ZEBRA	270	13500	15000	450	500
Li - Ion	270	15000	25800	700	860

Batteria per HEV da 40 kW e 1,2 kWh

Tecnologia	Peso (kg)	Prezzo minimo (€)	Prezzo massimo (€)	€/kW minimi	€/kW massimi
Pb – acido	111	480	600	12	15
Ni – Cd	75	2080	2160	52	54
NiMH	38	1520	1840	38	46
ZEBRA	200	9920	11240	248	281
Li - Ion	27	2280	2720	57	68

... verso il 2012 ...

Batteria per BEV da 30 kWh

Tecnologia	Peso (kg)	Prezzo minimo (€)	Prezzo massimo (€)	€/kWh minimi	€/kWh massimi
Pb – acido	850	4733	6161	158	205
Ni – Cd	550	14700	21600	490	720
NiMH	430	16770	19980	559	666
ZEBRA	270	6360	7500	212	250
Li - Ion	270	10800	14310	360	477

Batteria per HEV da 40 kW e 1,2 kWh

Tecnologia	Peso (kg)	Prezzo minimo (€)	Prezzo massimo (€)	€/kW minimi	€/kW massimi
Pb – acido	111	653	816	16	20
Ni – Cd	75	2080	2160	52	54
NiMH	38	1520	1840	38	46
ZEBRA	200	9920	11240	248	281
Li - Ion	27	1200	1600	30	40

(Si sono evidenziate le tecnologie più adatte per le rispettive applicazioni).

4.3.1 Pb - ACIDO

Come detto già più volte, questa tecnologia è la più antica e conosciuta; a causa del grande numero di modelli e di tipi di materiali introdotti soprattutto nel corso degli ultimi quindici/vent'anni in questa tecnologia, diventa difficile trovare delle reali relazioni tra prestazioni e prezzi. Il principale interesse per la tecnologia al piombo è sicuramente il basso costo: se dovesse essere persa anche questa peculiarità la tecnologia al piombo diverrebbe ben presto obsoleta e inutilizzata. Sono stati anche avviati dei programmi di ricerca e sviluppo per cercare di migliorare le caratteristiche e le prestazioni, ma i risultati sembrano portare comunque a costi troppo alti che non reggerebbero la competizione con altre tecnologie a parità di prestazioni offerte.

Questa tecnologia comunque non è di certo una buona e potenziale soluzione per i veicoli ibridi e tanto meno lo è per quelli elettrici puri (il peso sarebbe veramente insostenibile ed inaccettabile).

4.3.2 Ni - Cd

Il prezzo di tale tecnologia è funzione principalmente del materiale attivo utilizzato, e soprattutto del costo del nichel, il cui prezzo, dal 1999 in poi, è molto aumentato. Questo tipo di batterie è prodotto in stabilimenti quasi totalmente automatizzati, ed il prezzo dipende molto dal volume di produzione. È comunque una tecnologia sempre più in via di eliminazione e non rappresenta sicuramente il futuro, almeno per quanto riguarda i veicoli elettrici.

4.3.3 NiMH

Anche per questa tecnologia la chiave del prezzo è sicuramente il costo del materiale attivo, con il nichel al primo posto. L'attuale prezzo del nichel si aggira attorno ai 9,5 \$/lb (ossia circa 16 €/kg considerando un tasso di cambio €/€ di 1,25) ma nel corso degli anni ha sempre subito considerevoli variazioni, anche piuttosto forte. Questa tecnologia è matura e già largamente utilizzata nei veicoli ibridi, mentre per i BEV la situazione è un po' diversa e questo tipo di accumulatori non è in grado ancora di dare le garanzie richieste.

4.3.4 LITIO

Questa tecnologia rappresenta probabilmente (per non dire sicuramente) il futuro nel campo della trazione elettrica viste le sue enormi potenzialità. Le batterie al litio per trazione non sono ancora in produzione su larga scala come possono essere invece quelle NiMH o quelle al piombo per esempio, e quindi anche i costi ed i prezzi sono da considerare con estrema cautela. Si può comunque affermare con certezza che, oltre a dare ottime garanzie in termini di prestazione, anche dal punto di vista economico sembrano destinate ad entrare prepotentemente nel mercato con il loro sviluppo e con la loro progressiva diffusione (basti guardare come sono entrate nel mercato dell'oggettistica relativa all'elettronica di consumo; ormai sono l'unico tipo alimentazione per cellulari, computer, lettori, ecc. e nessuna tecnologia sembra poter tenerle testa in termini di prestazioni e costo). Inoltre questi tipi di batterie, in continua fase di studio e sviluppo, si presentano come ottima potenziale soluzione sia per i BEV che per gli HEV. Naturalmente i prezzi poi potranno chiaramente differenziarsi in base ai modelli e soprattutto ai diversi produttori.

4.3.5 ZEBRA

Questa tecnologia, come già detto, è sviluppata solamente da un'azienda (MES-DEA, in Svizzera) e quindi a livello di prezzi è sotto un certo senso monopolizzata. Anche in questo caso, un confronto

realistico dei prezzi potrebbe essere effettuato solamente su grandi volumi di produzione. È comunque una tecnologia che rappresenta una validissima soluzione nel campo dei BEV assieme alle batterie al litio e merita dunque la dovuta attenzione.

4.4 MERCATO MONDIALE

Per quello che riguarda il mercato mondiale delle batterie per trazione elettrica, è abbastanza intuitivo che il suo andamento dipende, e soprattutto dipenderà, innanzitutto dagli sviluppi tecnologici delle batterie stesse, ma poi anche dal mercato dei veicoli elettrici (HEV e BEV). Questo mercato è influenzato soprattutto dai seguenti aspetti:

- fattori politici, come leggi, regolamentazioni, incentivi ed obiettivi riguardanti l'inquinamento, le emissioni di CO₂ e forse anche il consumo di petrolio;
- andamento del mercato del petrolio;
- il prezzo dei nuovi veicoli elettrici rispetto ai classici con motore a combustione interna;
- l'aumento del senso di responsabilità civica nei confronti dell'ambiente e dell'inquinamento.

Anche il mercato delle singole batterie si trova, e si troverà sempre più, a fare i conti con tutti questi aspetti che possono influenzare, e non poco, gli andamenti dei prezzi delle varie tecnologie.

CAPITOLO 5

VALUTAZIONI GENERALI, VERSO IL FUTURO

5.1 GENERALITA'

Dopo aver considerato, nei capitoli precedenti, i principali aspetti in ambito tecnico, ambientale ed economico, si può cercare di realizzare un confronto a livello generale tra le tecnologie, soprattutto per quello che riguarda il futuro imminente. Si vuole cercare di combinare quelle che sono state le principali considerazioni in modo da poter avere una panoramica generale più completa.

I parametri più rilevanti per fare delle considerazioni sulle tecnologie descritte si possono raggruppare nella seguente tabella, e sono comuni sia per i BEV che per gli HEV.

Aspetti tecnici	<i>Energia specifica</i>	BEV: indicazione delle prestazioni tecniche;
	<i>Potenza specifica</i>	BEV: indicazione della possibilità di ricarica veloce; HEV: indicazione delle prestazioni tecniche;
	<i>Cicli</i>	Indicazione sul tempo di vita della batteria e sul numero di sostituzioni necessarie;
	<i>Efficienza energetica</i>	Indicazione sulle perdite di energia nella batteria;
Aspetti ambientali	<i>Valutazione del ciclo di vita (LCA)</i>	Impatto ambientale durante il ciclo di vita della batteria (montaggio, assemblaggio, riciclaggio);
Aspetti economici	<i>Costo</i>	Costo totale del pacco batteria;
	<i>Maturità</i>	Indicazione sul livello di maturità della tecnologia;
	<i>Facilità d'uso</i>	Limitazioni tecniche e tecnologiche per gli utilizzatori finali;

È importante notare che il peso dato ai vari aspetti può variare a seconda dei soggetti e quindi anche le valutazioni possono essere diverse tra di loro, a secondo dei punti di vista. Le tre grandi “categorie” di soggetti che possono essere considerate sono la **politica**, i **consumatori** ed i **produttori**. Ognuna di queste classi tende a dare un diverso peso ai vari aspetti e di conseguenza anche i risultati ottenuti si diversificano tra di loro.

5.2 IL CONFRONTO

Dopo aver definito il peso e l'importanza che viene data a ciascun aspetto è possibile realizzare un confronto. Un modo molto interessante e facilmente comprensibile di rappresentare i risultati (utilizzato nel progetto SUBAT dell'università di Bruxelles) è quello di considerare dei flussi negativi e dei flussi positivi per ogni tecnologia e per ogni aspetto (tecnico, ambientale, economico). *I flussi positivi stanno a rappresentare quanto una tecnologia è dominante sulle altre (e quindi quanto sia una potenziale soluzione), mentre un flusso negativo sta ad indicare quanto una tecnologia sia dominata dalle altre (e quindi quanto sia una tecnologia debole da quel punto di vista).* Anche in questo caso si può fare riferimento alla situazione di pochissimi anni fa, e vedere invece poi come è stimato sarà la situazione nell'imminente futuro (2012) separando sempre il caso dei BEV da quello degli HEV. Il vantaggio di questo metodo è che, guardando i grafici, si può intuire immediatamente la forza (o la debolezza) di una tecnologia rispetto alle altre.

Si ricorda comunque di tenere sempre presenti le considerazioni fatte sui vari aspetti nei capitoli precedenti, ed inoltre che i risultati sono comunque sempre da osservare con cautela, perché ottenuti sotto certe precise ipotesi e condizioni: in fin dei conti sarebbe veramente impossibile poter fare confronti di questo tipo con la massima certezza dei dati a livello completamente generale senza entrare nello specifico delle varie tecnologie. Gli aspetti da considerare sono talmente tanti che diventa necessario porre delle condizioni al contorno.

Vediamo dunque la situazione dal punto di vista delle tre macrocategorie prima citate.

5.2.1 DA UN PUNTO DI VISTA POLITICO

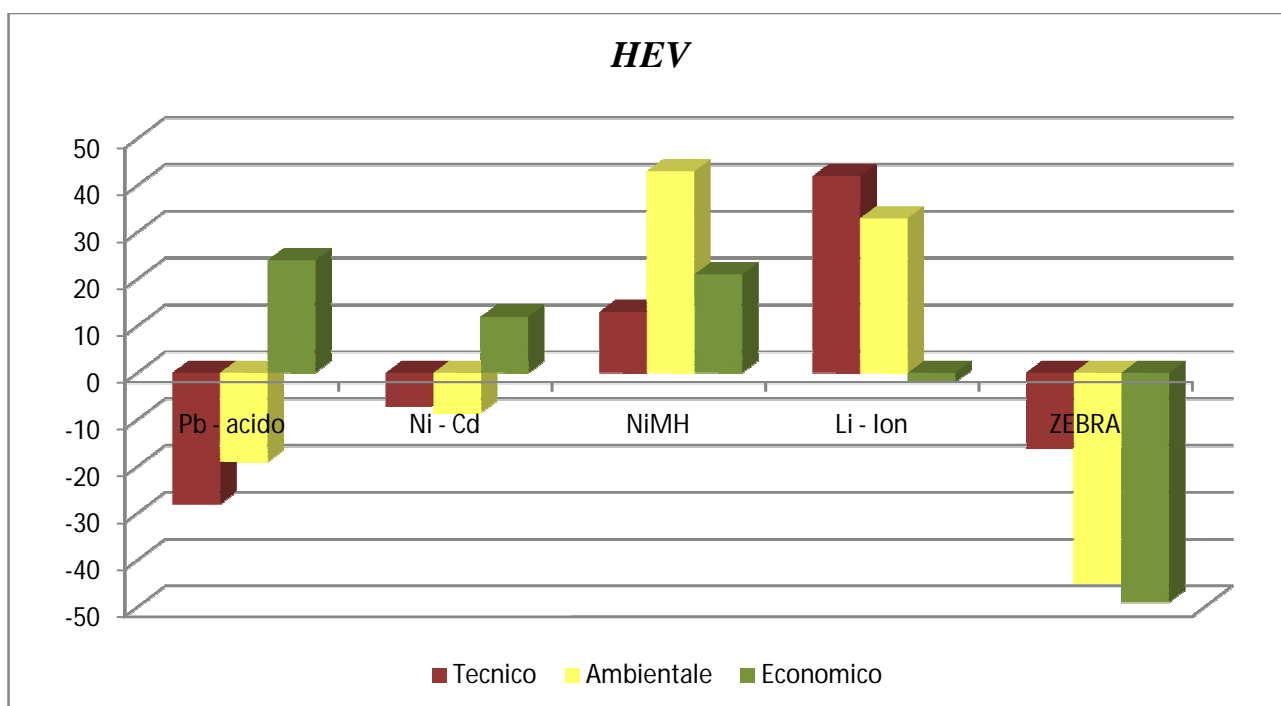
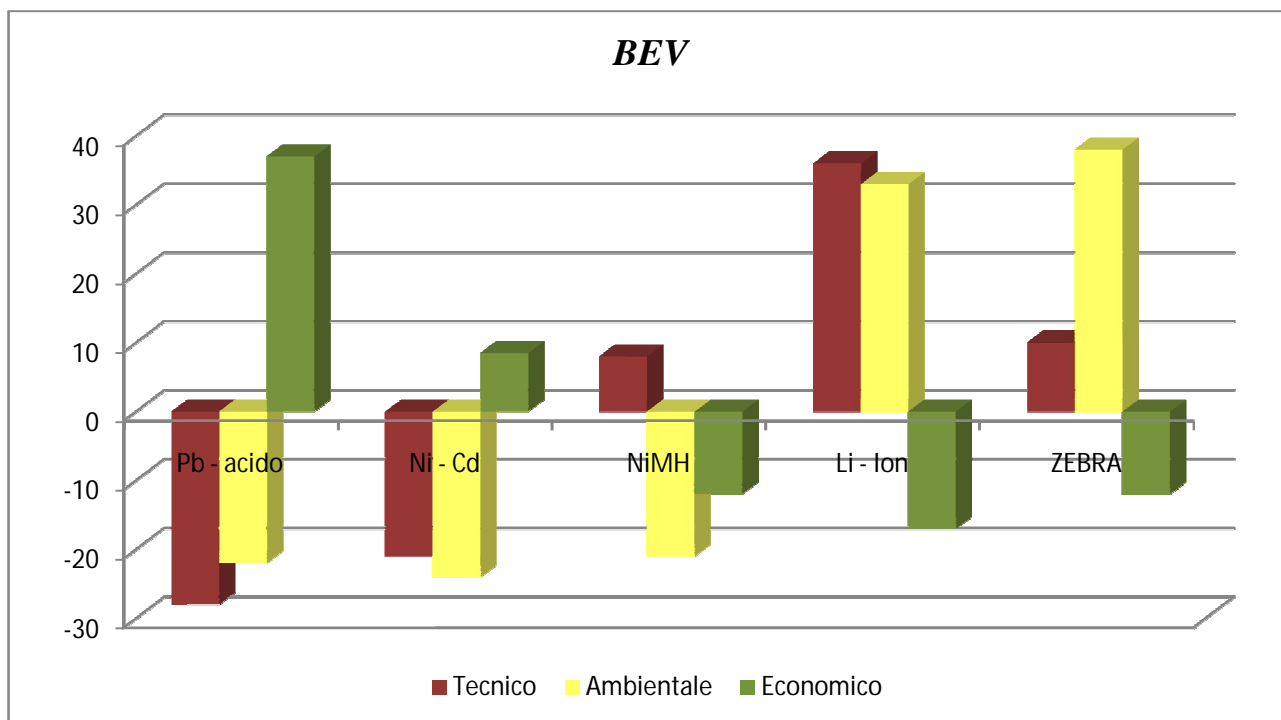
Il punto di vista politico è basato su di un approccio equilibrato della situazione, dando un eguale importanza agli aspetti tecnici, ambientali ed economici. Nel dettaglio, un approccio politico potrebbe essere rappresentato schematicamente in questo modo:

	Parametri tecnici (50)				Parametri ambientali (50)	Parametri economici (50)		
	Energia specifica	Potenza specifica	Cicli	Efficienza energetica	LCA	Costo	Maturità	Facilità d'uso
BEV	25	15	5	5	50	30	10	10
HEV	10	30	5	5	50	30	10	10

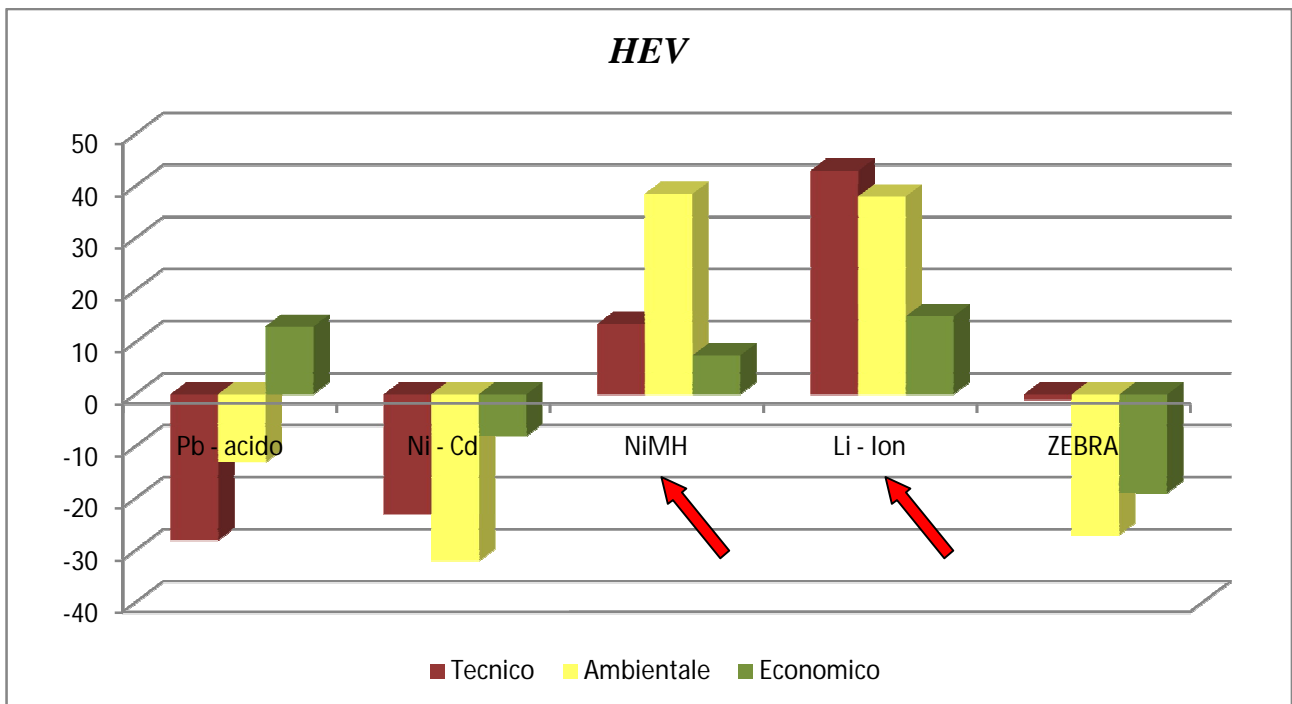
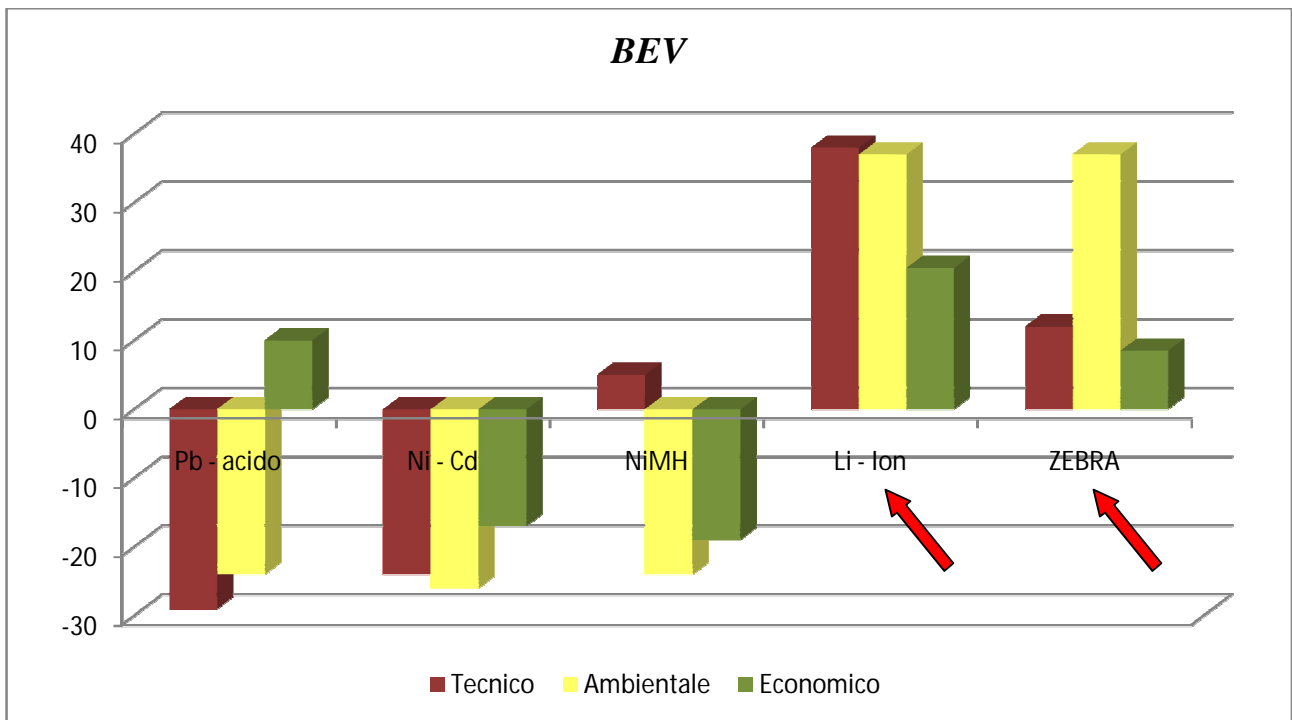
Si ipotizza perciò di dare un ugual peso ai tre aspetti, ciascuno dei quali viene poi pesato nei suoi sottoaspetti (in questo caso si nota la sola differenza per quanto riguarda energia e potenza specifica).

Vediamo i risultati a confronto:

... poco tempo fa ...



... verso il 2012 ...



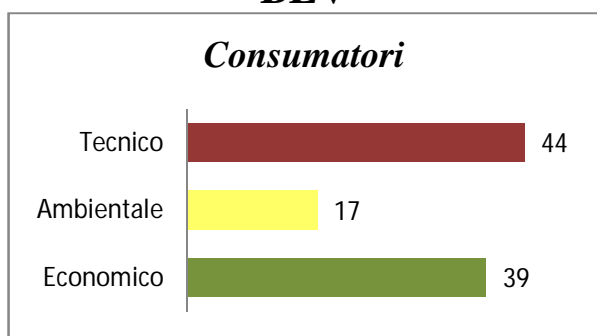
Si può ben vedere un fatto che era stato già precedentemente anticipato, ossia la forte predominanza delle tecnologie litio e ZEBRA nei BEV, mentre negli HEV risultano chiaramente migliori le tecnologie NiMH e litio. Si può già comunque affermare che le tecnologie al litio rappresentano dunque una delle migliori soluzioni nel campo della trazione elettrica, soprattutto in un'ottica

futura, accompagnate sicuramente dalla tecnologia ZEBRA, per quanto riguarda i BEV, e dalla tecnologia NiMH, per quanto riguarda gli HEV.

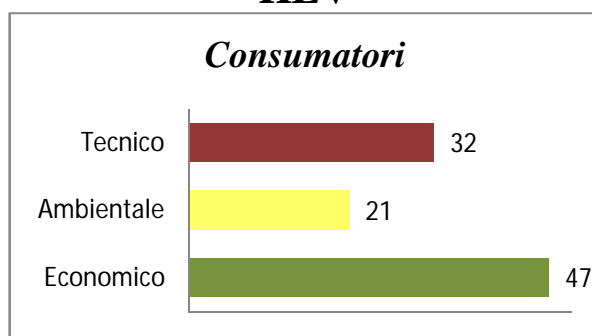
5.2.2 DA UN PUNTO DEI PRODUTTORI E DEI CONSUMATORI

Come detto prima, è corretto “mettersi nei panni” di diversi soggetti per fare un’analisi più realistica. Dopo aver considerato un punto di vista politico, si può prendere in esame il punto di vista dei produttori di batterie e dei consumatori. È chiaro che sarà dato un peso diverso ai diversi aspetti, peso che può essere sinteticamente riassunto nei seguenti schemi, dove viene data una panoramica complessiva (valori espressi in %):

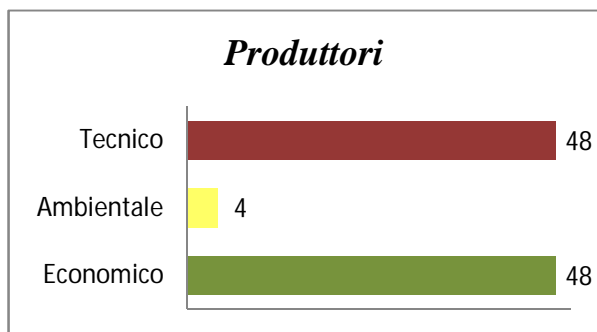
BEV



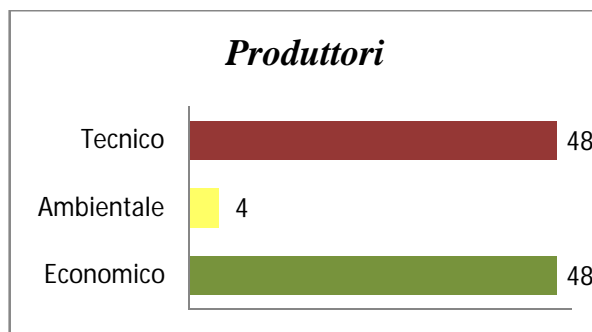
HEV



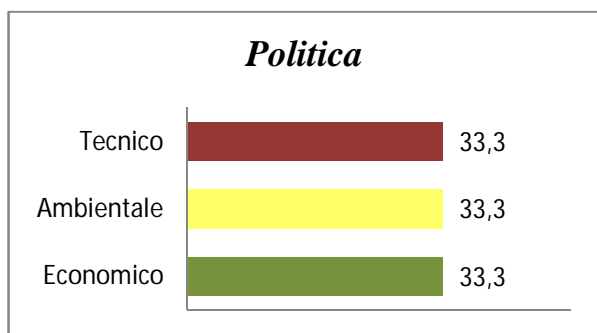
Produttori



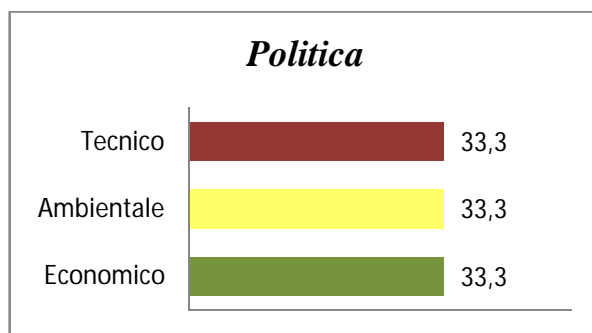
Produttori



Politica



Politica



Risulta lampante che da parte dei consumatori e dei produttori, e soprattutto da parte di questi ultimi, l'aspetto ambientale passa in secondo piano, a favore invece degli aspetti tecnici (e prestazionali) ed economici.

Anche in questo caso si ottengono i medesimi risultati, ossia le tecnologie più forti continuano ad essere il litio e la ZEBRA per i BEV, ed il litio e la NiMH per gli HEV.

Tutto questo è più che sufficiente per confermare, al di là dei punti di vista (politico, consumatori o produttori), la supremazia di tali tecnologie nei confronti delle altre, destinate ad essere progressivamente e velocemente abbandonate come soluzioni potenziali nel campo della trazione elettrica, almeno per mezzi di un certo tipo.

5.3 CONCLUSIONI GENERALI E VALUTAZIONI COMPLESSIVE

Le conclusioni generali vanno viste nell'ambito di tutti gli aspetti considerati e valutati (tecnico, ambientale, economico) e sono sicuramente una conseguenza ed una combinazione delle conclusioni tratte dai vari aspetti trattati.

Il confronto tra "prodotti" diversi è sempre una cosa difficile, soprattutto quando si devono prendere in considerazione numerosi parametri, ed una valutazione sulle tecnologie di accumulo per veicoli elettrici (puri ed ibridi) di certo non costituisce un'eccezione per questa regola.

Nell'analisi fatta sono state prese in considerazione cinque principali tecnologie (Pb – acido, Ni – Cd, NiMH, litio, ZEBRA) in quanto risultano essere le più mature e concrete possibilità di soluzione, ma è giusto ricordare che numerose attività di ricerca e sviluppo sono in fase di lavoro per studiare, sviluppare e migliorare, oltre alle tecnologie appena citate (soprattutto litio e ZEBRA), anche altre tecnologie meno mature (citate e commentate negli aspetti tecnici) che possono rappresentare delle potenziali soluzioni future, ma che per il momento sono ancora troppo distanti dalle esigenze richieste, e per questo non confrontabili con soluzioni nettamente più efficaci.

È inoltre forse superfluo precisare che le conclusioni che si arrivano a trarre in questo contesto rimangono valide nel campo dei BEV e degli HEV, e non possono essere di certo estese ad altri campi (come per esempio treni, aeroplani ecc.) senza il supporto di studi specifici ed approfonditi.

Per quanto riguarda i veicoli a propulsione elettrica pura (**BEV**), considerati tutti gli aspetti di valutazione, si può affermare che attualmente la migliore soluzione potenziale è rappresentata dalla tecnologia al *litio*, seguita da vicino dalla tecnologia *ZEBRA*. La grande forza di queste tecnologie è rappresentata soprattutto dalle grandi potenzialità tecniche, oltre ad essere tecnologie

“amiche” dell’ambiente, o per lo meno molto più pulite rispetto ad altre tecnologie concorrenti (Ni – Cd per esempio, forse la peggiore dal punto di vista ambientale assieme a quella al piombo). Anche la tecnologia al piombo ha, nel complesso, una posizione favorevole, ma la sua “bontà” è dovuta esclusivamente al basso costo (le prestazioni tecniche sono infatti nettamente inferiori rispetto alle batterie al litio per esempio): questo fatto comunque spesso non è sufficiente a rendere adatta questa tecnologia, che infatti rappresenta tutt’altro che una buona soluzione per i veicoli elettrici, a maggior ragione per i BEV. Tornando alle tecnologie ZEBRA e litio, l’unico punto dolente rimane quello economico: infatti il loro costo può rappresentare attualmente un limite e forse per il momento è uno dei principali fattori responsabili della loro difficile diffusione su larga scala. Resta comunque vero che lo sviluppo tecnologico è molto avanzato e veloce, e anche dal punto di vista economico queste tecnologie stanno diventando sempre più competitive, forti anche della loro supremazia tecnica e delle loro prestazioni sempre più efficienti.

Per quanto riguarda invece i veicoli ibridi (**HEV**), la supremazia è sicuramente detenuta dalle tecnologie *NiMH* e *litio*, mentre la tecnologia ZEBRA rappresenta tutt’altro che una buona soluzione, vista la sua bassa potenza specifica (parametro fondamentale per gli HEV). Attualmente la tecnologia NiMH è la più usata in assoluto nei veicoli ibridi di tutto il mondo, ma gli accumulatori al litio rappresentano sicuramente un futuro non molto distante dai nostri giorni e sono destinati a sostituire progressivamente la tecnologia NiMH, che rimarrà comunque una validissima alternativa.

• **CONSIDERAZIONI TECNICHE**

Le batterie al piombo hanno una bassa energia specifica, e quindi comporterebbero la necessità di grandi volumi e pesi elevati, cosa assolutamente inaccettabile per un mezzo di trasporto come un autovettura.

Per quanto riguarda le batterie ZEBRA, queste lavorano ad alte temperature, attorno ai 300 °C, e quindi si verificano consistenti perdite di energia quando il veicolo rimane inutilizzato per tempi prolungati (oltre 24 ore): questo fatto comporta che questo tipo di tecnologia risulta adatto soprattutto per applicazioni su veicoli che raramente devono rimanere utilizzati per lungo tempo, come per esempio veicoli aziendali, taxi, veicoli pubblici, corrieri, ecc. L’alta temperatura e la conseguente perdita di energia con veicolo fermo potrebbe invece rappresentare un ostacolo nello sviluppo di tale tecnologia nel campo delle autovetture destinate a privati (non tutte le persone chiaramente fanno il medesimo uso di un’automobile) in quanto certe modalità di utilizzo dell’auto

potrebbero portare rapidamente ad un calo delle prestazioni fino all'esaurimento della batteria, e questo non è certamente accettabile.

Passando in fine alla tecnologia al litio, quest'ultima è risultata essere la migliore potenziale soluzione sia per i BEV che per gli HEV, ed è quindi destinata ad essere il futuro (e nemmeno tanto lontano) nel campo dei veicoli elettrici (numerose sono già i prototipi con ottime prestazioni e qualità). Il principale problema è rappresentato però dalla sicurezza: il litio è infatti un materiale molto reattivo, ed una sovraccarica incontrollata della batteria, potrebbe per esempio portare ad un aumento incontrollato del flusso di energia rilasciato, con conseguenti situazioni di pericolo. Questo ha reso indispensabile l'implementazione di sistemi di gestione a livello di singola cella per tutti i sistemi a base di litio. Nonostante tutti i sistemi elettronici di sicurezza, l'uso di un elettrolita organico porta comunque ad alcune difficoltà nel campo della tolleranza di usi anomali o scorretti della batteria. Nonostante la tecnologia a base di litio abbia praticamente monopolizzato il campo delle batterie portatili (cellulari, notebook, lettori multimediali, ecc.), bisogna riconoscere che il suo utilizzo in applicazioni di potenza, come la trazione elettrica, è sicuramente più complesso e presenta maggiori problematiche. È comunque una tecnologia che rappresenta il futuro, e se oggi per certi aspetti è ancora una sfida, potrebbe diventare molto presto una realtà che si diffonde su larga scala, aiutata dalla richiesta e dalla diffusione sempre maggiore di veicoli elettrici.

• **CONSIDERAZIONI AMBIENTALI**

Per quanto riguarda i BEV, se si considerano le sole batterie, si può affermare che la tecnologia al piombo ha il peggiore impatto ambientale, seguita dalla tecnologia Ni – Cd (enorme tossicità del cadmio), mentre le tecnologie al litio, ZEBRA e NiMH sono più rispettose dell'ambiente.

Se si vanno ad includere anche le perdite di energia dovute all'efficienza ed alla massa degli accumulatori, le tecnologie ZEBRA e litio risultano ancor meno dannose dal punto di vista ambientale rispetto alle altre, aumentando così ancor di più la loro peculiarità.

Quando si considera l'intero ciclo di vita di una batteria, l'energia persa dalla batteria stessa ha un peso significativo a livello di impatto ambientale. Tutta via questo impatto dipende fortemente dal modo di produzione dell'energia elettrica, e può quindi essere drasticamente ridotto modificando il mix di produzione dell'elettricità, potenziando per esempio la produzione da fonti rinnovabili.

Passando invece agli HEV, il miglior impatto ambientale è detenuto invece dalla tecnologia NiMH, seguita da quella al litio.

Talvolta le batterie contengono delle sostanze tossiche, o comunque dannose sia per l'ambiente, sia soprattutto per l'uomo. È un problema non da poco quello legato alla tecnologia Ni – Cd: gli effetti negativi del cadmio sulla salute umana sono da tempo noti all'uomo, e di conseguenza ci sono diverse ottime ragioni per cercare di eliminare del tutto l'uso di cadmio e quindi anche questa tecnologia nel campo degli accumulatori. Questa tecnologia è dunque da non considerare come soluzione per il futuro.

Si ricorda comunque che l'impatto ambientale degli accumulatori per veicoli elettrici è veramente piccolo (qualsiasi tecnologia si prenda in considerazione) rispetto all'impatto sull'ambiente causato dai classici veicoli con motore a combustione interna. A livello di studio specifico è però doveroso e necessario prendere in considerazione anche questo aspetto.

• **CONSIDERAZIONI ECONOMICHE**

La batteria, in un veicolo elettrico (soprattutto in un BEV), costituisce un costo non indifferente, ed è per questo che una buona fetta del costo totale del veicolo è dovuta quindi proprio alla batteria; di conseguenza l'accumulatore va ad incidere pesantemente anche sul prezzo finale di mercato che viene presentato ai clienti, influenzando fortemente la penetrazione di questi veicoli nel mercato a livello nazionale ed internazionale.

Il prezzo della batteria è largamente influenzato dai prezzi di mercato dei suoi componenti metallici, nonché dal volume di produzione. Da quest'ultimo punto di vista, la tecnologia al litio è la più promettente, in quanto destinata ad essere sviluppata e prodotta sempre più su larga scala, e questo è uno dei fattori che potranno permettere un abbassamento del suo prezzo, rendendola ancora più competitiva. Anche per la tecnologia ZEBRA possono valere considerazioni simili, anche se la prospettiva è sicuramente inferiore a quella del litio.

Sotto l'aspetto economico, le tecnologie litio e ZEBRA sono ancora disponibili a costi poco competitivi, e questo è sicuramente uno dei fattori a causa dei quali lo sviluppo di BEV è ancora limitato.

È inoltre opportuno ricordare che quando si considera il costo/prezzo di una batteria, bisogna anche considerare il numero di batterie necessarie durante il ciclo di vita del veicolo (in altre parole bisogna considerare quante volte risulta necessario sostituire l'accumulatore) in modo da avere un quadro economico più realistico della situazione. In altre parole, oltre al costo per kWh o per kW, vanno considerate le prestazioni della batteria, e quindi il numero di cicli, l'energia, la potenza specifica, ecc.

CAPITOLO 6

BATTERIE AL LITIO: STATO, PROSPETTIVE E FUTURO

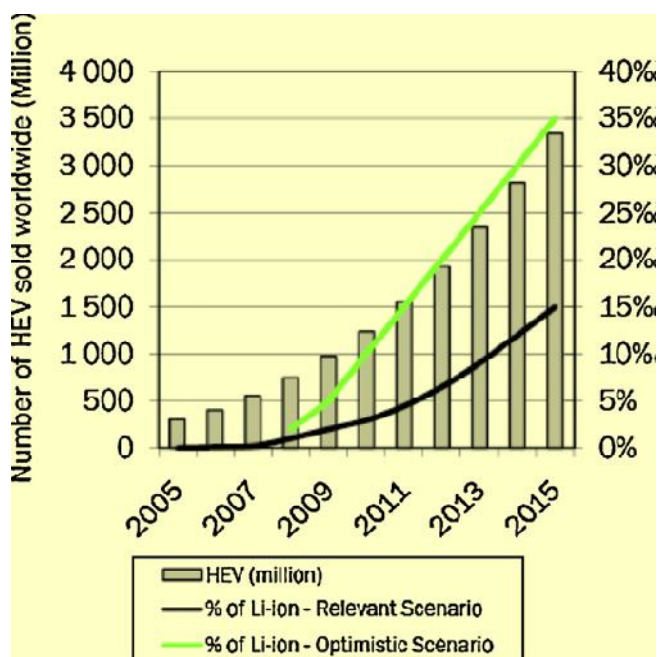
6.1 GENERALITA'

Le batterie al litio sono caratterizzate da un'alta energia specifica, alta efficienza e lunga vita. Queste proprietà hanno già fatto delle batterie al litio il principale mezzo di accumulo di energia nel campo dell'elettronica di consumo, con un mercato enorme che può vantare una produzione di miliardi di unità all'anno. Queste batterie sono però destinate ad assumere un ruolo di primo piano come sistemi di accumulo elettrochimico anche in impianti ad energia rinnovabile, così come nel mondo dei *veicoli sostenibili*, ossia i veicoli elettrici (BEV) ed i veicoli ibridi (HEV). Tuttavia il potenziamento di questa tecnologia per queste ultime applicazioni (*applicazioni di potenza*) presenta ancora delle problematiche dal punto di vista della sicurezza, dei costi, del vasto intervallo di temperatura di lavoro e della disponibilità di materiale.

L'attuale economia dell'energia basata sui combustibili fossili è a serio rischio a causa di una serie di fattori, tra cui il continuo aumento della domanda di petrolio, l'esaurimento delle risorse non rinnovabili e le varie problematiche ed instabilità a livello politico. Un altro aspetto molto preoccupante dell'attuale economia energetica è associato alle emissioni di CO₂ (uno dei principali gas ad effetto serra), che tendono costantemente ad aumentare, con un salto drammatico negli ultimi trent'anni, nei quali il livello di emissioni è quasi duplicato, con gravi conseguenze ambientali. L'urgenza di un rinnovo energetico richiede l'uso di fonti di energia pulite ad un livello molto più elevato di quello attualmente in vigore. Il livello di emissione di CO₂, ed il conseguente inquinamento atmosferico delle grandi aree urbane, per esempio, può essere, almeno idealmente, risolto (o per lo meno fortemente attenuato) solo con una progressiva sostituzione dei veicoli a combustione interna (ICE) con veicoli a zero emissioni, cioè veicoli elettrici puri (BEV), o almeno da veicoli ad emissione controllata, come i veicoli ibridi (HEV) o i veicoli ibridi plug-in (PHEV). Come si è concluso dai precedenti capitoli, la tecnologia delle batterie al litio rappresenta forse la principale soluzione nel campo dei veicoli sostenibili, in quanto rappresenta la migliore opzione che può concretamente permettere la diffusione di veicoli elettrici su larga scala.

Considerando per esempio gli HEV, dove c'è una sinergica combinazione tra un motore a combustione interna ed un motore elettrico, si può constatare (vedi la figura di seguito) che si è

passati piuttosto rapidamente dalla produzione di prototipi di batterie alla produzione di prodotti di successo richiesti su larga scala.



Evoluzione del mercato degli HEV

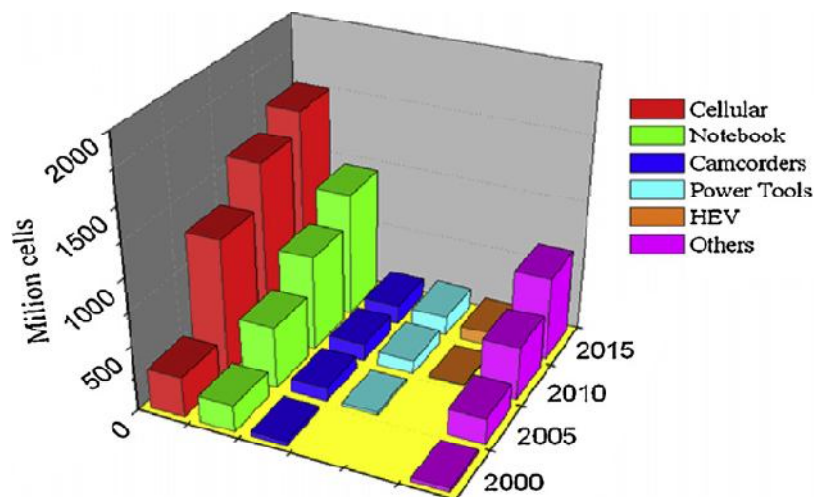
Tuttavia ci sono però ancora delle problematiche relative alla tecnologia al litio e numerosi paesi (in Europa, Giappone e Stati Uniti) hanno già stanziato cospicui investimenti per programmi di ricerca e sviluppo (*R&D*, research and development), con l'obiettivo di cercare di risolvere i problemi attuali e sviluppare batterie sempre più efficienti ed affidabili.

6.2 TECNOLOGIA AGLI IONI DI LITIO

Le batterie agli ioni di litio sono le più diffuse e mature nel campo della tecnologia al litio; sono leggere, compatte e lavorano con una tensione di cella attorno ai 4 V, con un'energia specifica compresa tra i 100 e i 150 Wh/kg. La struttura convenzionale è composta da un anodo in grafite, un catodo formato da un ossido metallico di litio ed un elettrolita costituito da una soluzione di sale di litio mescolata con un solvente organico.

Grazie alla loro grande capacità di immagazzinare energia in piccoli volumi e picco pesi (rispetto ad altre tecnologie) queste batterie hanno già invaso il mercato dell'elettronica di consumo, mentre per quanto riguarda i veicoli elettrici si è ancora un po' indietro sotto questo punto di vista. Nel campo dei BEV non si è ancora arrivati alla produzione su larga scala, mentre negli HEV la diffusione e lo

sviluppo rimane ancora comunque limitato nonostante questi veicoli si stiano rapidamente diffondendo. Il seguente grafico può aiutare a capire lo stato del mercato di queste batterie nel campo delle applicazioni di potenza (come i veicoli elettrici) rispetto alle altre applicazioni più comuni:



Si può ben notare quanto il mercato di queste batterie nel campo dei veicoli elettrici sia decisamente limitato rispetto ad altri settori, facendo anche intuire quanto sia necessario ancora investire in ricerca e sviluppo di questa tecnologia per poterla portare ad un mercato di larga scala.

6.2.1 *PROGRESSI A BREVE TERMINE*

Migliorare la chimica delle comuni batterie agli ioni di litio in vista di applicazioni per veicoli elettrici è abbastanza problematico. Ostacoli di varia natura impediscono ancora questo importante passo, soprattutto problemi di sicurezza, durata, ampia gamma di temperature di lavoro e disponibilità di materiale. D'altra parte, l'intrinseco beneficio ottenibile da questo tipo di tecnologia ed il suo uso in mercati in continua evoluzione (come quello dei veicoli elettrici destinato ad un grande sviluppo) ha innescato gli sforzi da parte di tutto il mondo per cercare di risolvere questi problemi e poter collocare la tecnologia al litio in una posizione dominante.

È ormai universalmente accettato che le scoperte in questa tecnologia richiedono processi chimici innovativi sia per gli elettrodi che per i componenti dell'elettrolita: l'obiettivo è quello di individuare materiali che abbiano prestazioni superiori rispetto a quelle offerte dai comuni materiali che attualmente compongono anodi e catodi. Infatti la chimica di queste batterie, dalla loro introduzione nel mercato nei primi anni '90, non è cambiata consistentemente, ed è quindi possibile compiere passi avanti attraverso una svolta negli elettrodi e negli elettroliti.

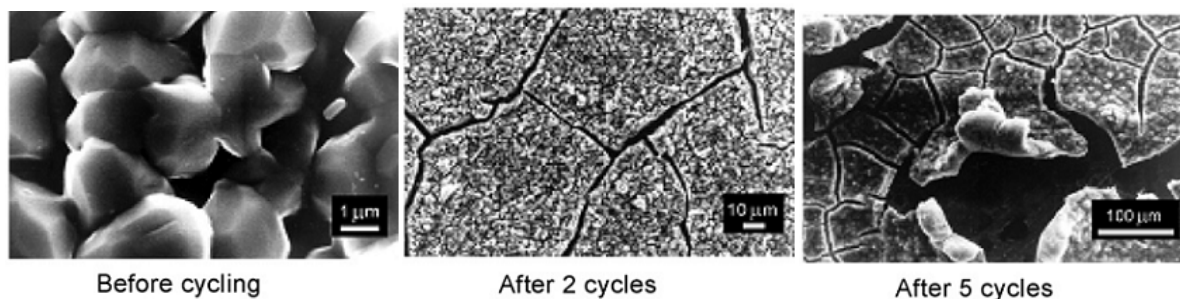
Di conseguenza, la ricerca in tutto il mondo e gli sforzi di sviluppo sono diretti verso la sostituzione degli attuali componenti delle batterie con nuovi materiali aventi prestazioni più elevate in termini di energia, potenza, costo, affidabilità, durata e sicurezza.

Gli approcci per raggiungere questi obiettivi si concentrano principalmente in due direzioni:

1. sostituzione della grafite e dell'ossido di litio-cobalto con materiali alternativi che abbiano maggiore capacità di accumulo e minori costi;
2. sostituzione della soluzione elettrolitica organica con soluzioni più sicure ed affidabili.

➤ *Miglioramenti nell'energia specifica*

Fin'ora l'energia specifica è stata aumentata soprattutto attraverso miglioramenti nella fabbricazione, usando progressivamente materiali più leggeri per esempio (si è passati dall'acciaio all'alluminio), oppure ottimizzando il design della singola cella in modo da aumentare il caricamento del materiale attivo dell'elettrodo. È stato però ormai raggiunto un limite oltre il quale diventa necessario provvedere ad una modifica della cella a livello chimico per poter aumentare ulteriormente l'energia specifica. Leghe metalliche di litio come ad esempio litio-silicio (Li-Si) o litio-stagno (Li-Sn) sono tra i più promettenti elettrodi negativi in sostituzione dei comuni materiali a base di carbonio. Queste leghe hanno una capacità specifica nettamente maggiore rispetto alla composizione litio-grafite a base di carbonio (Li-C), vale a dire 4000 mAh/g per Li-Si e 990 mAh/g per Li-Sn, contro i 370 mAh/g di Li-C. Purtroppo però le leghe di litio non possono essere utilizzate direttamente come tali in una cella, in quanto il principale problema consiste nella grande variazione di volume nella fase di espansione-contrazione che avviene durante il processo di carica-scarica: queste variazioni inducono delle sollecitazioni meccaniche che tendono a disintegrare l'elettrodo con conseguente rottura nel giro di pochi cicli. Si può notare il fenomeno dalle figure:



Il problema è stato aggirato attraverso un'ottimizzazione della morfologia dell'elettrodo, con lo sviluppo di configurazioni nanostrutturali capaci di ammortizzare le variazioni di volume e di assicurare così un più lungo ciclo di vita combinato ad un'alta capacità specifica. Un buon esempio

è dato da elettrodi con struttura basata su nanocompositi metallici al carbonio (per esempio stagno-carbonio).

Approcci simili sono stati adottati per favorire le prestazioni degli elettrodi metallici litio-silicio (Li-Si). I risultati ottenuti da laboratori di tutto il mondo hanno dimostrato che un lungo ciclo di vita (lunga durata) della batteria può essere realizzato sfruttando delle precise modifiche agli elettrodi, utilizzando composti al silicio-carbonio, morfologie nanostrutturali e particelle porose tridimensionali. Grazie a questi importanti risultati, le leghe metalliche di litio sono oggi pronte per essere introdotte nella produzione di batterie al litio.

Per quanto riguarda i materiali per l'anodo la ricerca è indirizzata verso gli ossidi di titanio, mentre, riguardo ai catodi, i materiali di maggior interesse sono oggi i composti a base di manganese ed i fosfati metallici a base di litio e olivina: gli ossidi di manganese, grazie alle loro proprietà favorevoli di disponibilità e compatibilità ambientale, appaiono come potenziali sostituti ideali dei comuni, costosi e parzialmente tossici, ossidi di cobalto. Nella ricerca di nuovi catodi l'attenzione è indirizzata verso i materiali che appartengono alla famiglia delle olivine, in particolare il fosfato ferroso di litio (LiFePO₄).

➤ *Miglioramenti nella potenza specifica*

Le comuni batterie agli ioni di litio sono basate su elettrodi con processi che comprendono l'inserzione – rimozione di ioni di litio tra anodo e catodo con un “trasporto” attraverso l'elettrolita. Questo processo è caratterizzato dalla velocità con cui avviene la diffusione di litio dentro e fuori dalla struttura degli elettrodi. Così, per migliorare la cinetica, sono state considerate nuove morfologie nanostrutturali degli elettrodi, come nanoparticelle, nanofibre o altre strutture che hanno almeno una dimensione nanometrica. Si prevede che l'evoluzione delle nanostrutture possa svilupparsi in una riduzione della lunghezza di diffusione degli ioni di litio fuori e dentro gli elettrodi e quindi in un miglioramento dei tassi di carica – scarica.

D'altra parte, grazie al grande rapporto superficie – volume garantito dalle nanostrutture, ci si aspetta un aumento della superficie elettrochimica attiva di parecchi ordini di grandezza, rendendo così la reale densità di corrente minore a parità di corrente totale (a parità quindi di potenza) che la batteria è in grado di generare.

In generale la ricerca nel campo delle nanostrutture richiede la progettazione di nuove configurazioni elettrodiche e di grande preparazione tecnica. In questo senso è molto promettente la sintesi a bassa temperatura di polveri di LiFePO₄.

➤ *Miglioramenti in sicurezza ed affidabilità*

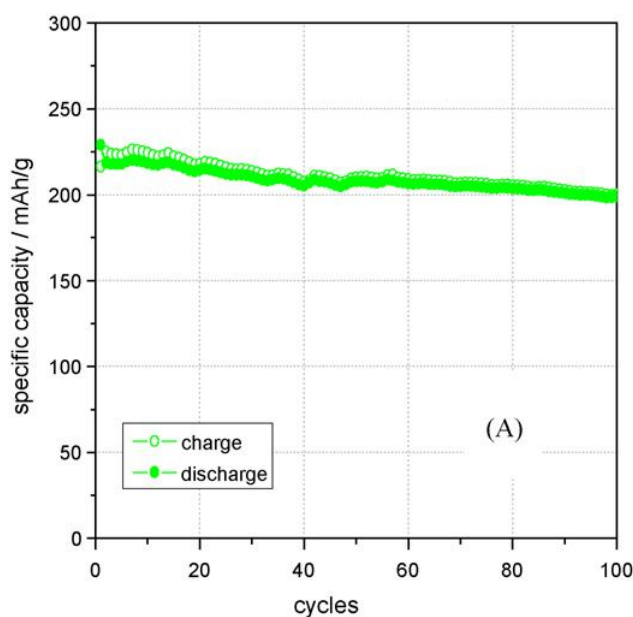
La sicurezza è un problema molto serio nella tecnologia al litio e di conseguenza ci sono diversi studi in corso con l'obiettivo di ridurre la pericolosità di questi accumulatori; purtroppo però tutte le possibili soluzioni tendono a causare delle riduzioni in termini di energia specifica. Così il valore pratico di questi approcci dipende anche dal compromesso tra sicurezza ed energia che si è disposti ad accettare.

Approcci più radicali considerano di eliminare drasticamente la pericolosità, sostituendo la soluzione liquida organica con un sistema più inerte ottenendo vantaggi sostanziali: il passaggio ad una configurazione solida (come la configurazioni Li – polimeri) dà una concreta garanzia di aumento di affidabilità della cella e, allo stesso tempo, offre una maggiore duttilità di progettazione e facilità di manipolazione.

Il rinnovo dei componenti degli elettrodi rappresenta sicuramente un passo avanti nel progresso di questa tecnologia; tuttavia anche con una modifica della composizione sia del catodo che dell'anodo, non si può dare piena fiducia e garanzia sulle prestazioni offerte a causa di alcuni problemi legati alla chimica convenzionale che non possono essere totalmente prevedibili. La soluzione liquida organica, ancora utilizzata come elettrolita nel separatore, può essere fonte di reazioni imprevedibili che possono incidere pesantemente sulla sicurezza della batteria.

La vera svolta in questo campo è rappresentata da progetti rivoluzionari della batteria, nei quali tutti e tre i componenti convenzionali (anodo, catodo, elettrolita) vengono rimossi in favore di componenti rivoluzionari, più efficienti e più sicuri.

Attualmente comunque nessuna di queste nuove tecnologia ha ancora avuto sbocchi commerciali, in quanto ancora in fase di studio e sviluppo, e in quanto ancora non abbastanza mature ed affidabili dal punto di vista tecnico. Eppure questa missione non è impossibile: la grande varietà di materiali disponibili per questa tecnologia offre reali possibilità di riuscire ad individuare la formula giusta per creare nuove batterie tecnicamente avanzate ed affidabili. L'approccio migliore è quello che prevede l'utilizzo di nuove combinazioni elettrode combinate con la sostituzione della soluzione elettrolitica convenzionale mediante un elettrolita polimerico più stabile. Ci sono degli ottimi esempi che confermano questa teoria: uno dei migliori prevede una batteria litio – polimeri che utilizza un anodo con TiO_2 ed un catodo con $\text{LiNi}_{0,5}\text{Mn}_{1,5}\text{O}_4$, separati da un elettrolita polimerico in gel a base di PVdF (polivinildenfluoruro). Combinando i vantaggi derivanti dalla sostituzione degli elettrodi (funzionamento sicuro, lunga vita) con quelli derivanti dal nuovo elettrolita (plasticità, elevata conducibilità) si possono prevedere eccellenti prestazioni sia in durata di vita (vedi figura seguente) che in capacità della batteria, oltre che in termini di sicurezza.



In generale si può comunque affermare che attraverso scelte intelligenti riguardo i materiali attualmente disponibili per i nuovi elettrodi ed elettroliti, possono essere efficacemente sviluppate nuove tipologie di batterie al litio con prestazioni veramente interessanti.

6.3 LE BATTERIE AL LITIO NEL FUTURO

Le batterie al litio sono uno dei più grandi successi dell'elettrochimica moderna e, dopo aver ottenuto il dominio incontrastato nell'elettronica di consumo, sono destinate ad ottenerlo anche nel campo del trasporto automobilistico e non solo: i settori di applicazione potenziali diventano infatti sempre più numerosi.

Per un ulteriore progresso scientifico e tecnico nella tecnologia del litio è però necessario “aprire nuove porte” ed i cambiamenti a livello chimico prima accennati non sono sufficienti. Ulteriori progressi sono assolutamente necessari per quanto riguarda la sicurezza, la compatibilità ambientale ed il contenuto energetico: questi progressi possono essere raggiunti solamente con un rinnovo radicale del concetto di batteria al litio. Inoltre tutti i materiali necessari alla chimica di queste batterie vengono prodotti quasi interamente da minerali, e la loro estrazione e lavorazione richiede una quantità di energia sempre crescente: questo fa porre delle domande sulla sostenibilità a lungo termine di questa tecnologia di batterie.

6.4 CONCLUSIONI

La tecnologia al litio evolve con un passo così rapido che una valutazione del suo progresso può facilmente e velocemente diventare obsoleta.

La rilevanza della scelta dei materiali è evidente: i parametri cruciali della batteria, come l'energia e la potenza specifica, il ciclo di vita e la sicurezza dipendono chiaramente dalle prestazioni degli elettrodi e dell'elettrolita.

Tra i vari laboratori industriali e universitari c'è quasi una vera e propria "gara" per il miglioramento di questa tecnologia per far in modo che le nuove batterie possano al più presto entrare con successo nel mercato. Un settore molto attento e dedicato a questo sviluppo è proprio quello automobilistico, e presto diverranno disponibili automobili elettriche con accumulatori agli ioni di litio (già realizzati numerosi prototipi con ottimi risultati). Il settore dell'automobile, e dei trasporti in generale, è stato quello che ha indotto maggiormente la ricerca di nuove soluzioni per questa tecnologia in quanto, come si è visto nei capitoli precedenti, si è capito che gli accumulatori al litio rappresentano la migliore soluzione sia per i BEV che per gli HEV (e PHEV, veicoli ibridi plug-in), e sono quindi il futuro di questo settore nel quale è giusto e doveroso continuare ad investire.

Tuttavia, nonostante i continui ed importanti progressi, questioni fondamentali sono ancora da risolvere; in questo senso è doveroso tener bene a mente che la vittoria delle sfide oggi in atto richiederà l'impegno congiunto di una serie di studi interdisciplinari, ed il loro successo dipenderà molto dall'efficienza e dalla disponibilità di scambio di idee e risultati: in altre parole la collaborazione è, e sarà, alla base di un futuro grande successo.

CAPITOLO 7

BATTERIE Z.E.B.R.A., UNA VALIDA ALTERNATIVA

Nel campo dei veicoli a propulsione elettrica pura (**BEV**), si è visto che le batterie sodio-nichel cloruro (Z.E.B.R.A.) rappresentano una potenziale soluzione assieme agli accumulatori al litio ed è quindi giusto considerarle un po' più da vicino.

7.1 GENERALITA'

Le batterie ZEBRA, già descritte nel capitolo riservato agli aspetti tecnici, sono appunto batterie a base di sodio nichel cloruro, prodotte in quantità limitata in Svizzera dalla MES-DEA e destinate quasi esclusivamente ad applicazioni per veicoli elettrici. Questi accumulatori vengono prodotti in un numero di circa 30'000 unità all'anno (nulla se si pensa alla produzione di batterie al litio per esempio).

Il pacco batteria finale ha una energia specifica che va **dai 90 ai 130 Wh/kg** (dipende dal modello) ed una densità di energia volumetrica di circa 166 Wh/l. È una batteria compatta e robusta, e la tecnologia al giorno d'oggi è abbastanza collaudata arrivando ad avere in alcuni casi prestazioni vicine a quelle offerte dalla tecnologia agli ioni di litio. Può sopportare oltre 1'000 cicli completi di carica-scarica avendo la peculiarità di essere quasi indifferente all'effetto memoria (sono infatti ben sopportate anche scariche e cariche parziali); la sua grande robustezza la rende anche inoltre adatta ad operare in condizioni ambientali avverse. La sua ricarica è abbastanza rapida, in quanto in poco più di un ora è in grado di arrivare ad un livello di carica di circa l'80%.

Le tipologie ed i modelli sono numerosi, ognuno dei quali ha diverse caratteristiche, come si può notare dalla tabella che viene proposta nella pagina seguente, e di conseguenza in base all'applicazione per la quale l'accumulatore è destinato si va a scegliere il modello più adatto.

Modello	Energia	Capacità	Tensione	Energia specifica	Potenza specifica	Perdite termiche	Numero Di celle	Peso
-	kWh	Ah	V	Wh/kg	W/kg	W	-	kg
Z12-278-ML3X-152	42,3	152	278	120	181	165	432	358
Z12-557-ML3X-64	35,7	64	557	101	181	165	432	358
Z21-310-ML8X-50	15,5	50	310	112	171	< 115	240	142
Z23-232-ML3X-76	17,6	76	232	120	170	< 90	180	152
Z36-371-ML3X-64	23,8	64	371	99	168	< 130	288	243
Z36-371-ML3X-76	28,2	76	371	118	168	< 130	288	243
Z37-310-ML3X-64	19,8	64	310	101	171	< 105	240	201
Z37-310-ML3X-76	23,5	76	310	119	170	< 105	240	201
Z37-620-ML3X-32	19,8	32	620	101	171	< 105	240	201
Z40-85-ML3X-418	35,6	418	85	119	89	< 150	363	302
Z5-278-ML3X-64	17,8	64	278	100	179	< 105	216	182
Z5-278-ML3X-76	21,2	76	278	119	169	< 105	216	182
Z5-557-ML3X-32	17,8	32	557	100	179	< 105	216	182
Z5-557-ML3X-38	21,2	38	557	119	169	< 105	216	182
Z50-206-ML3X-38	7,8	38	206	117	177	< 52	80	72
Z55T-263-ML3X-76	20,0	76	263	112	159	< 75	204	183
Z57-253-ML3X-76	19,2	76	253	120	170	< 105	196	165

7.2 EFFICIENZA

Il principale svantaggio di tale tecnologia (e che può perciò limitarne l'applicazione) è la necessità di lavorare ad alta temperatura: come già spiegato, la batteria deve essere mantenuta in un range di temperatura che va dai 270 ai 350 °C per operare in maniera efficiente. Mentre la batteria è in uso non ci sono problemi, in quanto le resistenze interne della batteria convertono energia in calore con efficienza del 100% circa mantenendo quindi la temperatura necessaria. Qualora però il calore prodotto dalle resistenze interne dovesse diventare eccessivo deve intervenire un sistema di raffreddamento che aiuti a smaltire il calore in eccesso (in qualsiasi batteria avviene un riscaldamento dovuto alle resistenze interne).

Tuttavia però quando il veicolo non è in uso la batteria tende ovviamente a raffreddarsi; dopo circa 4 ore di inutilizzo del veicolo diventa necessario applicare del calore dall'esterno in modo da mantenere la temperatura della batteria: la batteria contiene un riscaldatore che può essere alimentato dalla rete o dalla batteria stessa. Quindi per esempio se il veicolo dovesse rimanere fermo durante la notte basterebbe collegarlo ad una sorgente di energia elettrica (lo si mette sotto carica), oppure se dovesse rimanere inutilizzato in una zona priva di punti di collegamento alla rete elettrica, dopo circa 4 ore dei sensori termici fanno scattare dei riscaldatori presenti nella batteria che provvedono a fornire il calore necessario.

Può però allora sorgere spontanea una domanda: *quanta energia elettrica in più consuma una batteria ZEBRA rispetto ad un'altra tipologia di batteria che lavora a temperatura ambiente?*

A questo proposito nel 1995 è partito un programma di prova nella città di Mendrisio (Svizzera) che è durato fino al 2005, al termine del quale la MES-DEA ha fornito dei risultati.

“The Mendrisio Operating Trial”: questo programma è partito con una Peugeot 106 elettrica alimentata con un pacco batteria Ni – Cd da 14 kW e con un motore elettrico da 20 kW in corrente continua.

Nel 2001 è stata poi presa una Renault Twingo elettrica con motore ad induzione da 36 kW (in corrente alternata) ed è stata alimentata con una batteria ZEBRA da 21,2 kW.

Un'importante differenza tra i due veicoli è che la Peugeot era equipaggiata con un piccolo riscaldatore a gasolio per la cabina passeggeri, mentre la Renault utilizzava un riscaldatore elettrico da 3 kW alimentato dalla batteria principale.

Le principali conclusioni di questo progetto hanno evidenziato che *nei normali usi giornalieri la batteria ZEBRA non consuma più energia di quanto consumi una batteria che lavora a temperatura ambiente. Ci sono infatti talmente tanti modi di utilizzare un'automobile che l'energia in più*

necessaria per mantenere la temperatura delle ZEBRA non sembra influenzare in maniera considerevole l'efficienza energetica totale.

7.3 COSTO POTENZIALE DELLE BATTERIE ZEBRA

Il prezzo di vendita delle batterie, come di qualsiasi prodotto, dipende anche dal volume di produzione e quindi dalla domanda del prodotto stesso.

La MES-DEA ha stimato che un prezzo di vendita delle sue batterie potrebbe aggirarsi attorno ai 240 \$/kWh (circa 190 €/kWh) per un basso volume di produzione (10'000 unità all'anno per esempio), mentre se il volume dovesse salire (100'000 unità all'anno) il prezzo potrebbe abbassarsi a 109 \$/kWh (circa 87 €/kWh) diventando quindi meno della metà.

La ripartizione del **costo di produzione** delle batterie ZEBRA è riportata di seguito (valori medi):

	\$ / kWh	\$ / batteria (21,2 kWh)
Nichel	17,75	376,30
Altri materiali interni	10,53	223,24
Cassa della batteria	9,37	198,65
Fabbricazione della cella	13,82	292,98
Fabbricazione della cassa	9,37	198,65
Sistema di controllo	-	250
TOTALE		1'540 \$

Il totale costo di produzione è stimato attorno ai 1'540 \$ (circa 1230 €) o 73 \$/kWh (circa 58 €/kWh). La MES – DEA assume che il costo di produzione possa essere circa i 2/3 del prezzo di vendita, e di conseguenza al cliente finale una batteria ZEBRA verrebbe a costare attorno ai 109 \$/kWh (circa 87 €/kWh).

L'elemento più costoso della batteria è il nichel usato per il catodo. La tecnologia ZEBRA fa un utilizzo più efficiente del nichel rispetto ad altre tecnologie (vedi tabella nella pagina seguente): questo in parte è dovuto al fatto che il potenziale di una cella ZEBRA è di 2,58V, più del doppio delle altre tecnologie (circa 1,2V).

Batteria	Nichel utilizzato per kWh
ZEBRA (NaNiCl)	1,53 kg/kWh
LiNiO ₂	2,5 kg/kWh
NiMH	6,8 kg/kWh
Ni - Cd	3,5 kg/kWh

È giusto ricordare che il prezzo del nichel è comunque variato negli anni e potrà ancora variare nel futuro (l'attuale prezzo del nichel si aggira attorno ai 9,5 \$/lb, ossia circa 16 €/kg). La produzione mondiale di nichel va oltre 1,2 miliardi di tonnellate all'anno, con nuove miniere pronte ad essere sfruttate. Con questa produzione di nichel si potrebbero fabbricare oltre 40 milioni di batterie ZEBRA da 21,2 kWh ogni anno.

Considerando che le stime fatte dalla MES-DEA sono di qualche anno fa, quando il nichel costava meno, ora, considerando le attuali quotazioni del nichel, un prezzo finale potrebbe aggirarsi attorno ai **135 \$/kWh** (circa 108 €/kWh).

Le altre sostanze essenziali per la costruzione di queste batterie sono il ferro, il sale (NaCl, cloruro di sodio) e la boehmite (minerale inerte), una forma di allumina. Queste sostanze sono economiche ed disponibili in quantità pressoché illimitata: il costo totale di tutto questo è inferiore ai 40 \$/kWh (circa 32 €/kWh).

Il costo della cassa della batteria (l'involucro che la contiene) è abbastanza significativo, in quanto vi è la necessità di un grande isolamento termico per i motivi già spiegati. La cassa è formata da una doppia parete di acciaio inox e all'interno viene creato il vuoto, in modo da limitare al minimo le dispersioni termiche per conduzione. Tuttavia però il costo dell'involucro esterno non aumenta proporzionalmente alle dimensioni delle batterie, e quindi nelle batterie più grosse tale costo incide meno nel costo totale.

Il costo del sistema di controllo è invece praticamente indipendente dalle dimensioni della batteria e può essere considerato quasi come un costo fisso.

Al giorno d'oggi comunque questa tecnologia rimane comunque costosa, anche se il suo sviluppo e la sua diffusione la stanno rendendo sempre più competitiva (rispetto ad alcuni anni fa è già diventata molto più accettabile a livello economico).

Se la disponibilità di nichel o il suo prezzo dovessero diventare un problema per lo sviluppo e la diffusione di questa tecnologia, si potrebbero avere funzionamenti con prestazioni simili utilizzando

parzialmente o totalmente il ferro al posto del nichel: in questo caso si avrebbero batterie *Sodio Ferro Cloruro*. Il potenziale della cella sarebbe leggermente più basso (2,35V invece di 2,58V) ma la temperatura di lavoro potrebbe essere ridotta da 300 a 250 °C. Il costo della batteria potrebbe essere ulteriormente ridotto se il ferro sostituisse interamente il nichel (batterie NaFeCl₂); in questo caso non ci sarebbe praticamente alcun problema di approvvigionamento di materie ed una quantità praticamente illimitata di questo tipo di batteria potrebbe essere prodotta a partire da ferro e sale comune (batterie di questo tipo sono già state costruite e sperimentate).

7.4 SICUREZZA

Questo tema è importante in ogni tipo di batteria, e anche relativamente alle tecnologia ZEBRA più volte si sono manifestate preoccupazioni a causa dell'alta temperatura e della presenza di metalli e sali fusi.

Quando queste batterie sono esposte a situazioni esterne estreme, come ad esempio un incidente stradale, pare non provochino ulteriori rischi e pericoli per i passeggeri a bordo se non quelli comunque derivanti dalla situazione anomala in cui gli stessi si vengono a trovare. Le celle sono sicure per quanto riguarda il sovraccarico o il sottocarico e sono fabbricate senza l'uso di sodio metallico. La loro esposizione in ambienti a "bassa temperatura" non rappresenta comunque una situazione altamente rischiosa e può essere tollerata senza conseguenze pericolose.

Un eventuale problema potrebbe essere dovuto ad un eventuale rilascio di sodio ed ai suoi possibili effetti, anche se il fenomeno è abbastanza difficile che si verifichi, in quanto sarebbe necessario un trauma veramente forte, in grado di rompere, oltre la cella, anche il separatore ceramico; nei test di sicurezza comunque non è mai avvenuto rilascio di sodio (le batterie hanno una struttura veramente compatta e robusta).

Dal punto di vista della sicurezza la tecnologia ZEBRA può veramente rappresentare una concreta e possibile alternativa alle batterie agli ioni di litio.

7.5 ALTA TEMPERATURA

Lavorando ad alta temperatura, la batteria ZEBRA usa circa 90W di potenza per mantenere la sua temperatura quando non viene utilizzata. La batteria può essere collegata alla rete oppure, se questo non è possibile, intervengono automaticamente dei riscaldatori (presenti nella batteria) che la mantengono in temperatura quando questa tendesse a scendere sotto un valore limite.

Questo obbligo di mantenere calda la batteria non sarebbe un problema per veicoli pubblici ed aziendali (usati quotidianamente e di proprietà di aziende o società) e non sarebbe nemmeno un costo significativo per i privati.

D'altra parte tale tecnologia ha il vantaggio che le minori prestazioni in ambienti a bassa temperatura, come succede per le batterie Li – Ion, sono evitate, e la cosa non è sicuramente di poco interesse.

Se la batteria dovesse rimanere inutilizzata per periodi piuttosto lunghi di tempo, i riscaldatori possono essere staccati e la batteria si lascia solidificare: è come se la batteria venisse congelata con il suo stato di carica. Nei moderni accumulatori ZEBRA, può essere effettuato un altissimo numero di congelamenti (e poi scongelamenti) senza subire danni o perdere capacità. Un'altra peculiarità è che al momento dello “scongelamento” la quantità di carica presente al momento del congelamento è di nuovo disponibile: quindi non c'è autoscarica durante i periodi di inattività. Per tornare in funzione a regime dopo che è stata congelata la batteria necessita di circa 12-15 ore a seconda dei modelli in questione.

7.6 CONSIDERAZIONI COMPLESSIVE

Le batterie zebra hanno numerosi vantaggi, riassumibili schematicamente in:

- densità energetica pari (o anche superiore) a quella della tecnologia al litio;
- disponibilità abbondante dei materiali necessari;
- buona resistenza a sovraccarico;
- grande sicurezza delle celle in caso di guasti o situazioni anomale;
- lunga durata;
- grande compattezza e robustezza;
- prestazioni elevate anche a basse temperature esterne.

I principali svantaggi sono però:

- lungo tempo per ritornare funzionante dopo un “congelamento” (12 – 15 ore);
- consumo di energia nei periodi di non funzionamento (necessità di mantenerla in temperatura).

Questo tipo di batterie risulta particolarmente adatto per veicoli che vengono utilizzati con una certa regolarità e costanza, dove di conseguenza le perdite di energia sono ridotte al minimo.

CONCLUSIONI

Nell'elaborato si è voluto andare a caratterizzare le batterie per la trazione elettrica in maniera piuttosto completa ed esauriente, in modo da poter avere una panoramica complessiva esaustiva, che possa dare l'idea dello stato attuale delle tecnologie e delle prospettive per il futuro. Si ricorda che la batteria, in un veicolo elettrico, rappresenta un punto davvero cruciale e delicato in quanto è uno dei componenti più importanti, se non il più importante: è l'anima del veicolo.

Il confronto è stato sviluppato sotto i profili *tecnico*, *ambientale* ed *economico*: tutti questi aspetti risultano avere un'importanza cruciale nella valutazione della soluzione migliore da scegliere per un veicolo elettrico, considerate ovviamente le esigenze da soddisfare, gli obiettivi da raggiungere e le regole da rispettare.

La prima importante conclusione riguarda sicuramente la tecnologia al *piombo*: questo tipo di accumulatori è il più antico e conosciuto ed ha raggiunto un livello di maturità davvero importante; nonostante anche i progressi in questo campo siano stati numerosi, e a volte davvero considerevoli, un ruolo da protagonista di questa tecnologia nell'ambito della trazione elettrica è davvero poco esplicabile a causa del livello di prestazioni tecniche troppo lontano dagli standard richiesti in questo campo. Questo tipo di batteria può essere considerata solamente per il suo basso costo, ma non è assolutamente adatta come serbatoio di energia in un veicolo elettrico.

Passando poi alla tecnologia *Nichel – Cadmio (Ni - Cd)*, questa è stata una valida soluzione per i veicoli elettrici, soprattutto per gli ibridi (HEV); negli ultimi anni però si è cercato sempre più di abbandonare questa tecnologia a causa del suo forte impatto ambientale dovuto soprattutto alla tossicità del cadmio: questo fattore ha sempre fatto sì che questo tipo di accumulatore fosse oggetto di critiche e preoccupazione. Tale tecnologia è dunque destinata a scomparire o comunque ad essere messa da parte a favore di soluzioni più adatte, soprattutto dal punto di vista ambientale.

Le analisi fatte sotto i tre aspetti prima citati hanno evidenziato abbastanza nettamente la superiorità di alcune tecnologie rispetto alle altre: per quanto riguarda i veicoli elettrici puri (BEV) sono emerse le qualità della *tecnologia al litio* e della *tecnologia ZEBRA*, mentre passando ai veicoli ibridi (HEV) si sono dimostrate maggiormente adatte le *tecnologie al litio* e quella *metallo – idruri (NiMH)*.

Risulta chiaro quindi che, almeno attualmente, la tecnologia al **litio** (quella *litio – ioni* soprattutto, in quanto decisamente più matura, affermata, e già sperimentata con successo, mentre

quella *litio – polimeri* è ancora in fase di studio e sviluppo) rappresenta in assoluto la soluzione potenziale migliore che si abbia a disposizione nel campo della trazione elettrica: uno dei punti dolenti di questa tecnologia può essere il fattore economico. Il costo di questi accumulatori è infatti ancora relativamente elevato rispetto ad altri tipi di batterie, ma d'altro canto è pur vero che un mercato dell'auto elettrica destinato ad espandersi potrà solo che giovare all'economia di tale tecnologia: è infatti abbastanza intuitivo capire che un forte aumento della domanda porterà ad un grosso aumento della produzione, che a sua volta potrà indurre una riduzione dei costi e dei prezzi, con vantaggi sia per i produttori, che per i clienti finali.

È comunque giusto sottolineare che questa tecnologia ha ancora ampi margini di sviluppo e miglioramento, e gli investimenti in questo senso da parte di numerosissimi paesi in tutto il mondo sono sempre più considerevoli. Tale tecnologia è insomma in continua via di sviluppo, e risultati e dati che vengono ottenuti rischiano di divenire obsoleti in tempi non molto lunghi.

Accanto alla supremazia del litio si sono però anche distinte anche le tecnologie **ZEBRA** e **NiMH** per le loro qualità.

Per quanto riguarda gli accumulatori **NiMH**, questi rappresentano una tecnologia piuttosto matura e già largamente utilizzata nella maggior parte dei veicoli ibridi oggi in circolazione e in commercio. Quando la tecnologia al litio prenderà piede definitivamente (numerose case automobilistiche stanno già lanciando automobili ibride ed elettriche pure con batteria agli ioni di litio) le batterie metallo – idruri rimarranno comunque una validissima alternativa o potenziale soluzione, e solamente le esigenze specifiche del veicolo in questione potranno indicare quale sarà l'opzione migliore.

Un discorso analogo può essere fatto per la tecnologia **ZEBRA** nel campo dei BEV: anche queste batterie hanno raggiunto un discreto livello di maturità anche se comunque hanno un campo di produzione ancora ristretto rispetto per esempio a quelle NiMH (non sono ancora arrivate ad un livello di produzione su larga scala); questo è dovuto anche al fatto che attualmente sono molto più diffusi e maturi i veicoli ibridi rispetto a quelli elettrici puri, e come si è visto le batterie ZEBRA non sono per niente adatte agli HEV a causa della loro scarsa potenza specifica. Ciò non toglie però che le ZEBRA rappresentino, nel campo dei BEV, una valida alternativa alla tecnologia al litio.

Infine è doveroso dire che ci sono anche altri tipi di accumulatori che vengono considerati nel campo della trazione elettrica, come per esempio le batterie *zinco – aria* e quelle *nichel – zinco*, che sono però ancora troppo poco mature per essere considerate e messe a confronto con tecnologie ancora troppo superiori sotto tutti i punti di vista.

BIBLIOGRAFIA

- “L’Energia Elettrica” (AEIT)
- “Journal of Power Sources”
- “Energy Conversion & Management”
- “Energy Policy”
- Progetto SUBAT (sustainable batteries) – Università di Bruxelles
- “Renewable & Sustainable Energy Reviews”
- www.elsevier.com
- www.sciencedirect.com
- www.energoclub.it
- www.electricitystorage.org/ESA/technologies/
- firstsite.axu.it/fz/ (sito Mes – Dea, batterie ZEBRA)