



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

Dipartimento di ingegneria industriale e scienze matematiche
(DIISM)

**STUDIO DEL POTENZIALE DI AUTOMAZIONE DEL
DISASSEMBLAGGIO MECCANICO DI BATTERIE
AGLI IONI DI LITIO PER L' AUTOMOTIVE.**

**STUDY OF THE AUTOMATION POTENTIAL FOR
MECHANICAL DISASSEMBLY OF LITHIUM-ION
BATTERIES FOR THE AUTOMOTIVE.**

Relatore
Prof. Ing. Filippo Emanuele Ciarapica

Laureando
Simone Gallina

Anno accademico 2021/2022

INDICE

1. Introduzione	5
2. LIB: problematiche e ostacoli al riutilizzo	7
2.1 Materie prime approvvigionamento e criticità	8
2.2 Problematiche ambientali	10
2.3 Fine vita o second life per batterie LIB	11
2.4 Problematiche tecnologiche nel riciclo delle LIB	13
2.5 Smontaggio e disassemblaggio di LIB: valutazioni economiche	15
3. Batterie al litio: una panoramica	18
3.1 Batterie agli ioni di litio allo stato liquido	19
3.2 Batterie al litio allo stato solido	22
3.3 Batterie semi-solide al litio/flusso di ossigeno	24
4. Design for disassembly ed economia circolare	27
4.1 Design for disassembly per batterie al litio	30
5. Casi di studio	32
5.1 Smontaggio intelligente di LIB	33
5.1.1 Applicazione dell'AI al sistema di smontaggio	34
5.1.2 Sfide applicative	41
5.1.3 Considerazioni sulla sostenibilità	43
5.2 Smontaggio in modalità ibrida uomo-macchina di LIB	45
5.3 Potenziale di automazione nello smontaggio di LIB	49
5.3.1 Studi precedenti	49
5.3.2 Elaborazione e analisi del modello per lo smontaggio LIB	50
6. Conclusioni	55

1. Introduzione

Per far fronte al surriscaldamento globale e tentare di mitigare il problema dell'effetto serra – ormai sempre più evidente – in tutto il mondo si stanno ampiamente promuovendo i veicoli elettrici come una soluzione promettente per affrontare il cambiamento climatico e l'inquinamento atmosferico prodotto dal settore dei trasporti.

Il settore dei trasporti su ruota è stato infatti indicato come uno dei maggiori responsabili del riscaldamento globale in quanto ad esso è imputabile una elevata percentuale della produzione dei così detti gas serra. La competitività odierna dei veicoli elettrici si basa molto sull'autonomia, per questa ragione le batterie utilizzate – principalmente batterie agli ioni di litio – devono essere in grado di trasportare carica sufficiente ad assicurare la massima autonomia possibile a seconda della tipologia di veicolo in questione.

Ad oggi sono infatti tre le principali categorie di veicoli elettrici proposte al pubblico, le quali si differenziano per le modalità di erogazione della coppia e per le batterie.

I veicoli elettrici ad oggi in commercio sono:

- Veicoli elettrici a batteria (BEV): sono in genere i veicoli più grandi e pesanti e utilizzano la sola energia elettrica per muoversi. Non hanno quindi un motore a combustione interna né un serbatoio per il carburante. Le batterie utilizzate su questi veicoli sono molto pesanti e presentano dimensioni generose.
- Veicoli elettrici ibridi (HEV): la propulsione di tali veicoli sfrutta sia un motore elettrico che uno a combustione interna, i due motori lavorano in sinergia per produrre la coppia motrice e fornire potenza al veicolo con l'obiettivo di ottenere un grande risparmio di carburante. Questi veicoli non prevedono una ricarica delle batterie mediante collegamento alla rete elettrica ma il processo di ricarica avviene mediante il recupero di energia durante il moto. È impossibile in questo caso utilizzare esclusivamente l'energia elettrica. Le batterie dei veicoli elettrici ibridi presentano dimensioni e peso ben minori rispetto a quelle impiegate sui veicoli elettrici a batteria.
- Veicoli elettrici ibridi plug-in (PHEV): anche questi veicoli, come i veicoli elettrici ibridi, sfruttano sia un motore elettrico che un motore a combustione interna ma questa volta in maniera combinata e selettiva, fornendo l'opportunità di utilizzare solo il motore elettrico anche se con una autonomia limitata.

L'utente potrà quindi decidere se utilizzare il veicolo con una propulsione esclusivamente elettrica o come un veicolo elettrico ibrido. Lo scopo di questi veicoli è quello di permettere una mobilità totalmente elettrica in città pur conservando l'autonomia illimitata garantita da un motore a combustione interna per le lunghe percorrenze.

Questi veicoli possono essere ricaricati mediante collegamento alla rete elettrica ma allo stesso tempo sono in grado di recuperare energia durante il moto combinato. Le batterie impiegate su questa categoria di veicoli si posizionano nel mezzo, in termini di peso e dimensioni, a quelle utilizzate per BEV e HEV.

Negli ultimi anni la transizione alla mobilità elettrica e la veloce evoluzione dei dispositivi elettronici sta spingendo la richiesta di batterie e di sistemi di accumulo di energia sempre più in alto, provocando una rapida ed esponenziale crescita della mole di batterie prodotte. L'attenzione è posta quindi in maniera particolare alle batterie agli ioni di litio (LIB) utilizzate per i veicoli elettrici di nuova concezione, andando qui ad analizzare quelle che sono le criticità del processo di disassemblaggio di questo genere di batterie e di quella che è l'importanza tecnico-economica dello sviluppo di sistemi efficienti per il disassemblaggio delle unità LIB.

I gruppi di ricerca sono al lavoro in tutto il mondo per affrontare il problema attuale e futuro del ritiro, dello smontaggio e del riutilizzo degli attuali sistemi di accumulo di energia al litio e degli analoghi dispositivi del futuro prossimo. Il fine è quello di creare una filiera consapevole e sostenibile, capace di gestire il processo di recupero di batterie al litio dal ritiro alla commercializzazione dei dispositivi di seconda vita che sia ben integrata nella moderna visione industriale e che rispetti quelli che sono i principi dell'economia circolare e dell'ecologia.

2. LIB: problematiche e ostacoli al riutilizzo

Come già detto la spinta verso una mobilità elettrica sta vivendo in questi anni una forte intensificazione, tale da rendere la produzione di batterie agli ioni di litio e la progettazione di nuovi sistemi di accumulo di energia destinati ai veicoli elettrici per passeggeri una priorità dell'industria moderna.

Tuttavia se da un lato la mobilità viene descritta come la migliore opportunità per abbattere le emissioni di gas inquinanti e quindi per combattere effetto serra e riscaldamento globale dall'altra bisogna osservare bene quello che è e sarà l'impatto dei veicoli elettrici sul pianeta. In particolare quelle che sono e saranno le conseguenze sull'ambiente dovute alla produzione delle batterie al litio che, come vedremo in questo capitolo, portano in dote molteplici problemi spesso anche molto complessi.

Il rischio è dunque quello di trovarsi tra qualche lustro in una situazione paradossale in cui i costi – intesi in termini di inquinamento e impatto ambientale – per la produzione di veicoli full-electric superino quelli che sono i reali benefici dovuti all'impiego di tali veicoli.

In questo capitolo si analizzano quindi le diverse problematiche legate alla produzione e al riutilizzo delle batterie al litio, per meglio comprendere quali siano gli scopi degli studi di ricerca in questo campo volti appunto alla risoluzione e al superamento di tali ostacoli.

2.1 Materie prime, approvvigionamento e criticità

La rapida ascesa, soprattutto dei veicoli elettrici, sta quindi portando a un maggiore consumo delle batterie agli ioni di litio (LIB) ragione per la quale il litio sta assumendo sempre più importanza, potendo essere considerato ormai una materia prima essenziale in diversi settori. Si prevede infatti che la domanda di batterie agli ioni di litio triplicherà entro il 2023 soprattutto a causa della diffusione dei veicoli elettrici. A livello globale si è già osservato che rispetto alla domanda totale del litio, l'aumento dei veicoli elettrici, full hybrid e ibridi plug-in è stato più netto rispetto agli altri dispositivi che utilizzano batterie al litio. Ciò è dovuto a una maggiore consapevolezza ambientale dei consumatori che sono quindi spinti all'acquisto di questi veicoli.

Si stima infatti che da qui a venti anni la domanda globale di litio assumerà dimensioni notevoli raggiungendo un volume compreso tra le due e le sei volte quello dei suoi giacimenti minerari.

Si osserva inoltre che oltre il 70% del litio utilizzato per la produzione di batterie proviene dall'Australia e dal Cile. Inoltre l'estrazione mineraria di altri materiali essenziali per la produzione di batterie agli ioni di litio come grafite e cobalto, è in gran parte controllata da Cina e Repubblica Democratica del Congo. Vista la particolare distribuzione delle risorse minerarie, i materiali necessari alla produzione di nuove LIB – in particolare litio, cobalto e nichel – sono stati designati come elementi strategici e materiali critici da Regno Unito, Unione Europea e Stati Uniti d'America, sia a causa della loro generale scarsità globale ma soprattutto a causa della insicurezza della disponibilità di queste risorse legata indissolubilmente a fattori geografici e geopolitici. Il riciclo assume quindi un'importanza centrale nella direzione della sostenibilità e sarebbe un modo efficace per alleviare la pressione sulla fornitura delle materie prime per molti paesi.

Ovviamente la costante crescita della produzione di batterie agli ioni di litio sta muovendo anche il mercato delle materie prime e della loro produzione, dove si osserva un costante aumento dei prezzi. La domanda sempre crescente dei metalli preziosi come cobalto e litio e la correlazione della domanda di questi metalli da parte dei produttori di veicoli elettrici per passeggeri, biciclette elettriche e dispositivi portatili sta spingendo tutto il comparto a fare un ulteriore sforzo nella ricerca di tecnologie economicamente

sostenibili volte al recupero dei materiali costituenti le batterie al litio. In particolare litio, cobalto e nichel così come rame e alluminio, sono tutti metalli da considerarsi preziosi contenuti nelle odierne batterie al litio e che possono – mediante opportuni processi – essere recuperati quasi completamente. Tuttavia al momento sappiamo bene che arrivare alla realizzazione di un sistema automatizzato di disassemblaggio per batterie al litio capace di operare in maniera appropriata richiederà ancora del tempo con l'ovvia implicazione della necessità dell'industria di proseguire ancora con l'approvvigionamento dalle risorse primarie per l'immediato futuro.

Osservate quindi quali siano le problematiche legate al consumo sempre maggiore di batterie al litio. Risulta immediato correlare queste problematiche e l'importanza dello sviluppo di opportuni processi di recupero che consentirebbero di ridurre drasticamente l'estrazione di risorse vergini dalle fonti minerarie, quindi ridurre la domanda di risorse limitate ad alto costo nonché di diminuire drasticamente l'inquinamento, evitare il generarsi di sottoprodotti tossici e ridurre la domanda di suolo destinato alle discariche.

2.2 Problematiche ambientali

Molto importante è la valutazione legata all'inquinamento dovuto all'incremento dell'utilizzo di batterie agli ioni di litio. Infatti l'aumento della produzione di questi sistemi di accumulo sta provocando un notevole impatto sull'ambiente. L'incapacità tecnologica nello smontare e riciclare in maniera economicamente sostenibile grossi volumi di batterie sta costringendo a proseguire con l'estrazione di materie prime vergini dalle miniere e provocando l'accumulo di batterie esauste che sono da considerarsi rifiuti ad alto impatto ambientale.

Il riciclaggio di base di questi rifiuti, così come le odierne pratiche per il loro smaltimento, spesso non regolamentate, portano alla produzione di sostanze tossiche e alla lisciviazione di metalli pesanti nell'ambiente. Considerando le previsioni, le dimensioni del problema potrebbero diventare insostenibili dal punto di vista ambientale in pochi anni. Ad oggi la percentuale di batterie che viene riciclata è irrisoria, infatti solo il 5% delle batterie agli ioni di litio viene riciclata in maniera appropriata al fine di recuperarne i metalli preziosi in esse contenute. La restante parte delle batterie viene invece smaltita in maniera approssimativa o non smaltita. In Europa si stima che il 57% delle batterie al litio non riciclate non venga nemmeno ritirato, ma che siano disperse nell'ambiente provocando ingenti danni ambientali, tuttavia le batterie che vengono raccolte non vanno incontro a una sorte migliore. Infatti solitamente le unità LIB raccolte per lo smaltimento vengono spesso stoccate in siti appositi dove trascorrono periodi di tempo molto lunghi in attesa di essere trattate e dove vanno incontro a un danneggiamento irreversibile che ne rende impossibile il riciclaggio o la rigenerazione, lasciando come unica opportunità di recupero di energia l'incenerimento.

Altro aspetto ambientale importante risiede nell'impatto dovuto all'estrazione del carbonato di litio dai giacimenti minerari. Le metodologie per l'estrazione sono infatti particolarmente impattanti e producono il danneggiamento del suolo e la contaminazione dell'aria oltre a richiedere enormi quantità di acqua. Inoltre una volta estratto il carbonato di litio dalle miniere questo deve essere lavorato per ottenere litio in purezza, in questa fase si producono sostanze chimiche tossiche, come l'acido cloridrico, e prodotti di scarto tra cui anche sostanze radioattive.

2.3 Fine vita o second life per batterie LIB

Le batterie al litio utilizzate nei veicoli elettrici o ibridi possono sostenere molteplici cicli completi di carica e scarica a seconda della loro qualità costruttiva. Le batterie di media qualità sopportano circa 1000 cicli, mentre quelle di alta qualità possono raggiungere anche i 3000 - 4000 cicli. Al termine della propria vita utile il pacco batteria non è più in grado di soddisfare le necessità del veicolo e solitamente viene rimosso e sostituito.

Al termine della vita utile quindi le batterie possono essere riutilizzate, ripristinate, riciclate, smaltite o incenerite.

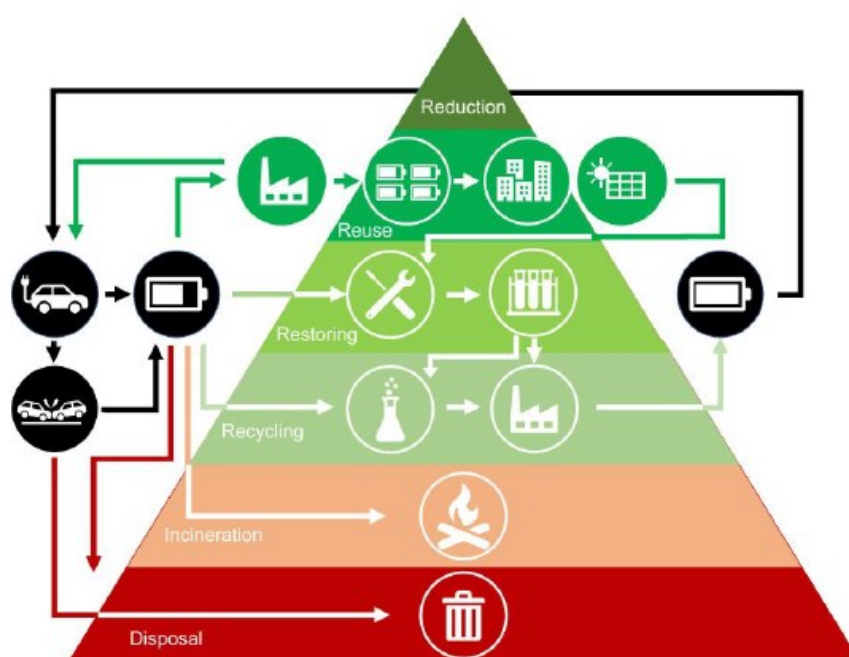


Fig.1: opzioni di fine vita delle unità LIB

Ovviamente lo smaltimento è l'opzione energeticamente meno efficiente ma spesso necessaria qualora le altre opzioni espongono i lavoratori a pericoli per la salute.

L'incenerimento utilizza i materiali delle batterie come combustibili per altri processi consentendo un minimo recupero di energia anche se col rischio di rilascio di gas tossici in aria.

Il riutilizzo – detto anche repurposing e definito anche recupero a cascata – invece consiste di utilizzare la batteria non più efficiente per gli standard di un veicolo elettrico su un altro genere di sistema che necessita di una unità LIB per funzionare, ma che abbia standard minori rispetto a quelli di un veicolo elettrico. Tuttavia dopo aver riutilizzato la

batteria nel secondo sistema fino all'esaurimento del suo potenziale, l'unità LIB dovrebbe comunque essere rimossa e riciclata al fine di recuperare ulteriore potenziale.

Il riciclo consiste nel disassemblaggio completo delle batterie con l'intento di estrarne i materiali preziosi, recuperarli e riportarli ad uno stato primitivo mediante processi fisico-chimici per poi utilizzarli per produrre batterie nuove. Questa è sicuramente la soluzione che più delle altre è oggetto di studi e ricerche per quella che è la complessità tecnologica ed economica del problema.

La rigenerazione – detta anche riciclaggio diretto – consiste in un processo più snello finalizzato a ripristinare le capacità elettrochimiche dei catodi mantenendo la struttura chimica originale e al diretto riutilizzo dei materiali. Nelle LIB esaurite si osserva la formazione di uno strato di interfaccia sull'elettrolita - a causa della perdita di litio, della degradazione superficiale e delle reazioni parassitarie dovute alle impurità depositatesi sulle superfici - che abbassa notevolmente le prestazioni elettrochimiche dei catodi. Il metodo utilizzato per realizzare una buona rigenerazione è quello della ri-litiazione mediante il quale i materiali catodici vengono ripristinati e recuperano le proprietà elettrochimiche iniziali fornendo al termine del processo una batteria agli ioni di litio con prestazioni simili ad una di nuova produzione.

Implementando le tecnologie per la second life delle batterie agli ioni di litio si stima che entro il 2030 le batterie di second life potrebbero essere in grado di soddisfare senza problemi oltre il 60% della domanda totale di batterie agli ioni di litio destinate al settore automotive.

2.4 Problematiche tecnologiche nel riciclo delle LIB

Dal punto di vista del recupero dei metalli preziosi non ci sono particolari problemi in quanto sono già disponibili molteplici tecnologie e diversi metodi chimici o fisici in grado di garantire il recupero quasi totale delle materie prime. Infatti si sono raggiunte percentuali di recupero del litio, del cobalto, del nichel e del rame eccellenti utilizzando tecniche pirometallurgiche o idrometallurgiche – spesso combinate per massimizzare l'efficienza – mediante le quali si riesce a recuperare oltre il 99% del litio e più del 95% del cobalto, così come alluminio, rame e nichel vengono recuperati per oltre il 90%.

Il problema più ingombrante tuttavia si trova a monte del recupero mediante processi chimici dei materiali, ovvero nella fase di separazione. La fase di separazione fisica dei materiali contenuti nelle singole celle all'interno delle LIB è un aspetto che è stato trascurato e che si è rilevato di particolare importanza al fine di ottenere un buon riciclo dei materiali, infatti, una separazione efficace può escludere la necessità di dover utilizzare tecniche di separazione ripetitive riducendo al minimo i costi propri della separazione in termini energetici e temporali nonché la percentuale di materiali preziosi dispersi nella ripetizione delle operazioni di separazione.

Prima ancora di giungere alla separazione dei materiali contenuti nelle singole celle all'interno delle batterie agli ioni di litio è necessario accedere al pacco batteria ed estrarre le celle dai moduli senza danneggiarle. Qui sorgono i primi problemi in quanto un pacco batterie non è realizzato per essere smontato o aperto, pertanto tutte le giunzioni sono realizzate mediante colle e saldature, per accedere quindi alle singole celle è necessario forzare l'involucro del modulo nel punto più debole. A questa difficoltà si aggiunge il fatto che non è stato stabilito alcuno standard nella produzione dei pacchi batteria a livello globale, quindi le batterie agli ioni di litio vengono realizzate ed immesse sul mercato in una grande varietà di design che variano in forma, dimensione e chimica degli elettrodi.

Per una corretta esecuzione dei processi di rigenerazione e riciclo delle batterie agli ioni di litio sono necessarie operazioni di valutazione dapprima dell'integrità meccanica e successivamente delle prestazioni elettrochimiche dei componenti. Nello specifico le valutazioni di integrità meccanica rappresentano la sfida più ardua in quanto ad oggi non esistono ancora sistemi automatizzati dotati di una intelligenza artificiale (IA) tale da

garantire un corretto svolgimento di queste operazioni di valutazione.

Ovviamente la mancanza di sistemi robotizzati e automatizzati in grado di eseguire con successo queste operazioni di valutazione preclude in parte il successo di tutto il processo di riciclo e rigenerazione delle LIB che diviene economicamente poco sostenibile in quanto devono essere impiegati necessariamente operatori specializzati.

In particolare nell'ipotesi di rigenerazione, dopo aver aperto l'involucro esterno della batteria, si lavora in maniera ampia sulla batteria – non a livello della singola cella – perché l'applicazione di second life lo consente le operazioni necessarie sono: selezione, smistamento e classificazione. Lo scopo di queste operazioni è quello di individuare ed escludere gli elementi che non sono più in grado di soddisfare i requisiti necessari alle applicazioni di second life perché troppo degradate e di raggruppare le batterie con un livello di degrado e prestazioni elettrochimiche simili.

Qualora l'applicazione di riutilizzo è a livello del singolo modulo le operazioni necessarie saranno: riparazione, rigenerazione, rimessa a nuovo e riutilizzo.

In caso di riciclo le valutazioni saranno sempre effettuate a livello di cella, in questo caso il problema assume un livello di difficoltà ancora maggiore poiché le valutazioni devono avvenire - contestualmente alla loro separazione - sui singoli fogli dei diversi materiali componenti la singola cella della batteria.

Tutte queste valutazioni assumo un ruolo centrale nel processo di rigenerazione e riciclo perché sono volte a comprendere quale sia la vita residua della batteria esausta e a caratterizzare poi le potenzialità della batteria di second life che può essere prodotta dai materiali recuperati.

2.5 Smontaggio e disassemblaggio di LIB: valutazioni economiche

Considerate tutte le problematiche che orbitano attorno alla produzione e al recupero delle batterie agli ioni di litio è evidente come sia necessario individuare il prima possibile un metodo efficace per il recupero delle batterie esauste.

Tuttavia con le tecnologie odierne nessuno è intenzionato ad intraprendere questa strada dato che risulta essere per nulla redditizia. Il costo del disassemblaggio e del riciclo di una batteria agli ioni di litio, eseguito in maniera corretta e con le odierne tecnologie arriva infatti ad essere prossimo a quello che è il prezzo di mercato di una unità LIB nuova. Pertanto paradossalmente una batteria agli ioni di litio di seconda vita – ottenuta da materiali riciclati o rigenerata – arriverebbe sul mercato ad un prezzo maggiore del prodotto nuovo ottenuto da materie prime vergini.

Al momento quindi il processo di riciclaggio non risulta essere appetibile per le imprese che non vogliono investire in progetti poco redditizi. Tuttavia le notevoli potenzialità economiche del recupero delle LIB e la certa prospettiva di un mercato delle batterie in crescita costante per diversi anni avvenire sono fattori allettanti per l'imprenditoria industriale che si sta spendendo nella ricerca di tecnologie tali da rendere il processo di riciclaggio delle LIB economicamente vantaggioso e molto redditizio.

Si stima che il valore economico dei materiali contenuti nelle batterie agli ioni di litio possa raggiungere circa gli 80 miliardi di euro entro il 2040, di cui il litio contribuisce alla quota maggiore, seguito da nichel, rame, alluminio e cobalto.

Quindi i vantaggi economici del riciclo delle batterie al litio sarebbero davvero ingenti, così come i vantaggi in termini di riduzione dei vincoli posti sulle risorse.

Anche politiche di utilizzo a cascata delle batterie risulterebbero vantaggiose. Nella fase iniziale però questa opzione risulta molto meno redditizia del riciclo, anche se dalle stime si ipotizza che entro il 2040 l'utilizzo a cascata delle batterie agli ioni di litio creerebbe vantaggi economici per circa 150 miliardi di euro – quasi il doppio rispetto al riciclo – offrendo dunque prospettive economiche più interessanti a lungo termine.

Analizzando quelli che sono i costi del recupero delle batterie al litio si è osservato che il maggiore contributo al costo del processo – pari al 56% del costo totale – viene apportato dal ritiro delle LIB a fine vita, i costi di amministrazione generale e mano d'opera si posiziona invece rispettivamente secondo e terzo e insieme determinano un altro 13% del

costo totale del processo, si osservi tuttavia che i costi per la mano d'opera possono variare da paese a paese e quindi si è considerato in questo caso un costo medio.

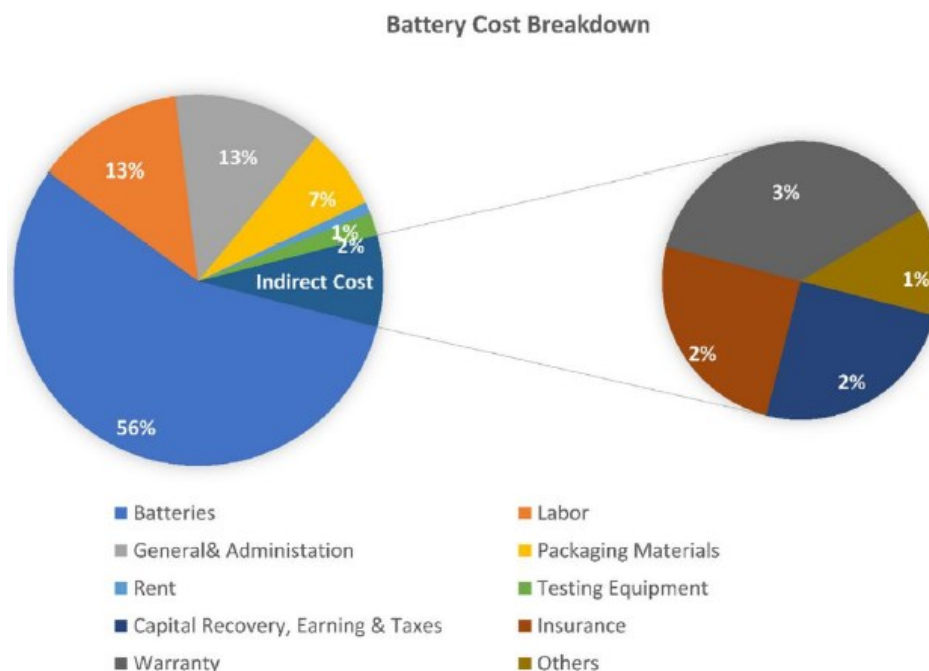


Fig.2: contributi ai costi per il recupero di LIB

Altri fattori analizzati nell'analisi dei costi di recupero delle batterie sono le dimensioni e i tassi di danneggiamento a livello di cella. Si è visto che il tasso di danneggiamento è tendenzialmente basso e comporta una riduzione dei costi rispetto ai rari casi in cui questo assume valori più elevati, tale aumento di costo è dovuto non direttamente al danneggiamento del dispositivo bensì al maggior lavoro necessario in fase di test per identificare le celle difettose.

Considerati i costi necessari al riutilizzo delle unità LIB si può definire il prezzo di mercato di una unità LIB di seconda vita come la somma dei costi per il ritiro e la rigenerazione con il margine profitto.

Gli studi economici condotti sul recupero delle batterie agli ioni di litio promettono – in presenza di grandi percentuali di recupero LIB a fine vita – una riduzione dei costi delle batterie variabile dal 2,2% al 12%. Tuttavia la percezione dei clienti potrebbe non essere molto favorevole all'utilizzo di batterie di seconda vita in quanto il loro prezzo si aggirerebbe ancora intorno all'80% o più del prezzo di una LIB nuova.

Per rendere la filiera del riutilizzo e del riciclaggio delle batterie economicamente sostenibile ed appetibile appare quindi necessario sviluppare un modello di business evoluto che consideri tutti i costi, includendo un fattore di sconto capace di promuovere

l'uso di LIB di seconda vita sia tra i produttori dei veicoli elettrici che tra i consumatori. Tenendo in considerazione il fatto che i costi per la produzione di nuovi dispositivi di accumulo di energia al litio sono in costante riduzione è chiaro che la creazione di tale modello di business potrebbe diventare una vera e propria sfida per gli economisti. Potrebbe risultare anche impossibile realizzare dei profitti in questo settore, infatti gli studi dei diversi modelli di business mostrano che un profitto accettabile è possibile solo nel caso in cui si riesca a diminuire il costo di produzione delle LIB di seconda vita alla stessa velocità con cui si sta assistendo al calo dei prezzi delle unità LIB nuove, che sono sempre più economiche grazie all'evoluzione degli strumenti produttivi.

Sono infatti diversi gli ostacoli del settore che limitano il mercato delle batterie al litio di seconda vita. Molte delle problematiche descritte in questo capitolo sono di grande interesse e vanno verso una risoluzione in fase di studio, tuttavia è necessario dire che un ostacolo importante – e potenzialmente facilmente risolvibile – è la mancanza di una normativa adeguata riguardo questi dispositivi.

3. Batterie al litio: una panoramica

Ad oggi le batterie al litio sono disponibili sul mercato in diverse configurazioni, con alcune particolari architetture che sono ancora in fase di sviluppo ed implementazione ma che con tutta probabilità in poco tempo soppianderanno quelle utilizzate attualmente.

Le batterie agli ioni di litio attualmente in uso sulla maggior parte dei veicoli elettrici per passeggeri sono quelle allo stato liquido che possono essere scelte tra una varietà di alternative in relazione alla loro composizione chimica, in base alla quale variano le proprie prestazioni. Le batterie agli ioni di litio tradizionali per il momento sono ancora le padrone incontrastate del mercato in quanto riescono ad unire diverse caratteristiche che le pongono in vantaggio rispetto alle altre ancora in fase di sviluppo e perfezionamento. Le LIB riescono infatti a garantire alta efficienza e densità energetica, buona durata del ciclo e costi moderati – dettati anche dalla continua crescita della loro diffusione che ne sta abbattendo i costi per la produzione – ma si stanno allo stesso tempo sollevando preoccupazioni legate alla disponibilità degli elementi necessari alla produzione come litio e cobalto visto il loro difficile riciclo.

Queste preoccupazioni stanno suscitando molto interesse nello sviluppo di nuove tecnologie come le batterie agli ioni di litio allo stato solido e di quelle semi-solidi a flusso di ossigeno – dette anche Redox o Nessox – che sembrerebbero essere in grado di alzare gli standard sia dal punto di vista energetico che dal punto di vista della sicurezza e promettono anche di essere più semplici da riciclare.

3.1 Batterie agli ioni di litio allo stato liquido

Come già accennato le batterie agli ioni di litio attualmente utilizzate praticamente da tutti i produttori di veicoli elettrici per passeggeri sono le batterie allo stato liquido. In queste batterie la cella è immersa nell'elettrolita – che si trova quindi allo stato liquido – per mezzo del quale può avvenire il flusso di elettroni dall'anodo al catodo e viceversa.

Queste possono presentare composizioni chimiche differenti:

- Batteria al litio – ossido di manganese (LMO): utilizzata su molte auto, specie Nissan e BMW, assicura elevate correnti di accelerazione e una buona autonomia. L'ossido di manganese al catodo favorisce il flusso di elettroni e riduce la resistenza elettrica consentendo un ottimo controllo della corrente.
- Batteria al litio – ossido di cobalto (LCO): impiegata soprattutto per i dispositivi elettronici portatili utilizza un anodo in grafite e un catodo in ossido di cobalto. Presenta una vita relativamente corta, bassa potenza specifica e una bassa stabilità termica, ragioni per le quali non vengono impiegate nella produzione di veicoli elettrici.
- Batteria al litio – ossido di nichel, manganese, cobalto (NMC): sono le più impiegate del settore automotive in quanto il catodo in nichel, manganese, cobalto consente di soddisfare al meglio gli standard richiesti. L'alta energia specifica del nichel unitamente alla struttura cristallina del manganese consente di ottenere vantaggi sia elettrici che strutturali permettendo l'ottimizzazione della batteria e consentendo di massimizzare la disponibilità di energia e potenza.
- Batteria al litio – fosfato di ferro (LFP): il fosfato di ferro al catodo consente una bassa resistenza, cicli di vita lunghi e una buona sicurezza dovuta alla grande stabilità termica. Tuttavia non sono ampiamente utilizzate in quanto presentano una maggiore corrente di auto-scarica rispetto alle altre composizioni e soffrono molto l'umidità.
- Batteria al litio – ossido di nichel, cobalto, alluminio (NCA): presentano caratteristiche simili alle NCM ma sono più costose e meno sicure. Rispetto alle NCM l'aggiunta di alluminio conferisce maggiore stabilità chimica, hanno ancora grossi margini di sviluppo motivo per il quale sono le principali candidate per la trazione elettrica.

- Batteria al titanio di litio (LTO): il titanio all'anodo le rende molto sicure e presentano eccellenti caratteristiche di scarica a basse temperature, la loro vita stimata è maggiore nelle altre batterie agli ioni di litio. Rispetto alle batterie con anodo in grafite presentano maggiore resistenza e l'assenza di deposito di litio sull'anodo permette cicli veloci di carica e scarica.
- Batteria agli ioni di litio e zolfo: in fase di sperimentazione sembra possano garantire una capacità di accumulo – a parità di peso – tripla rispetto alle concorrenti grazie all'impiego delle nuove celle Li-S.

Tutte queste batterie condividono le medesime caratteristiche costruttive, ovvero sono assemblate in maniera molto simile le une dalle altre. Si utilizzano nella costruzione oltre alle materie prime anche additivi, leganti e conduttori elettrici.

Partendo nella descrizione dall'interno della batteria si osserva che la batteria si compone di diversi moduli – o pacchetti – al cui interno troviamo diverse celle contenenti le materie prime - ridotte in lamine ad alta conduttività e tagliate in fogli - impilate in sequenza. Ogni singola cella deve essere impilata rispettando un ordine preciso dei materiali, troviamo al suo interno una pila di fogli così composta: anodo – separatore – catodo – separatore – anodo e così di seguito fino al completamento della cella.

Ogni cella è contenuta in un primo involucro termoformato – solitamente a forma di sacchetto e detto anche pouch - impermeabile e nel quale le pile di fogli risultano immerse nell'elettrolita. I pouch, provvisti di polo negativo e positivo, risultano a loro volta contenuti in un involucro più grande per formare un modulo batteria. Questo secondo involucro è normalmente di alluminio preformato e risulta sigillato in maniera tale da scongiurare infiltrazioni di acqua e perdita di elettrolita al fine di prolungare al massimo la vita della batteria.



Fig. 3: disposizione dei pouch nel modulo batteria

Si possono quindi distinguere le diverse componenti di una batteria al litio come:

- Cella: pila di lamine di materie prime ridotte in fogli disposte in sequenza ordinata: anodo – separatore – catodo – separatore – anodo e così via;
- Pouch: involucro impermeabile e termoformato contenete le singole celle immerse nell'elettrolita;
- Modulo: involucro in alluminio preformato opportunamente sigillato contenente più pouch.

Ogni batteria contiene al suo interno diversi moduli, opportunamente disposti e collegati mediante conduttori ad una unità di controllo della batteria che la amministra. Solitamente si presenta alloggiata in un involucro di dimensioni generose composto da un vassoio inferiore provvisto di coperchio rimovibile.

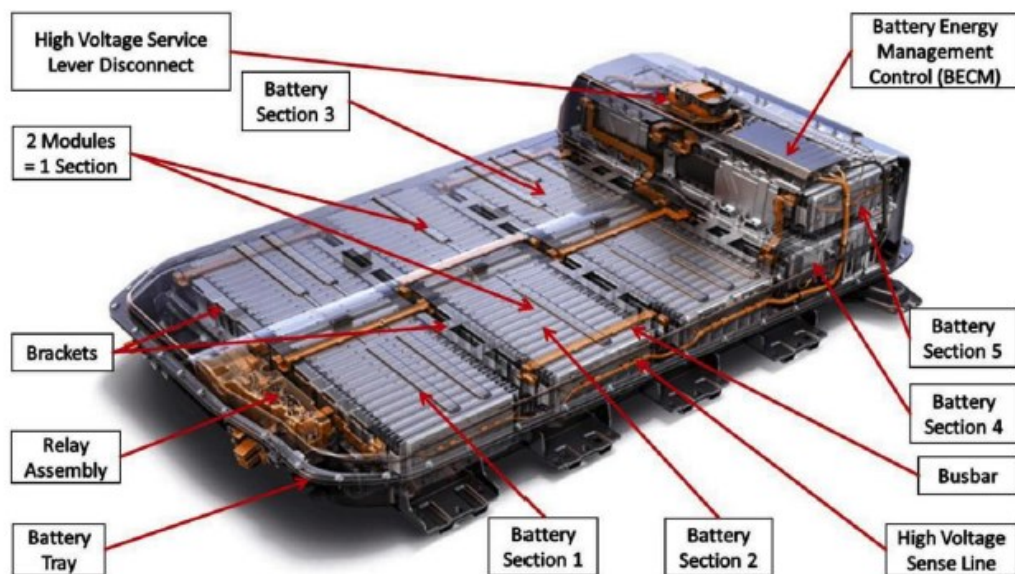


Fig.4: batteria agli ioni di litio senza coperchio

3.2 Batterie al litio allo stato solido

Recentemente c'è stato un rinnovato interesse per le batterie agli ioni di litio allo stato solido. Le quali rappresentano l'avanguardia della tecnica nel campo delle batterie per veicoli elettrici poiché risultano essere migliori sotto molti aspetti rispetto alle tradizionali batterie agli ioni di litio allo stato liquido.

Le batterie allo stato solido infatti sono in grado di assicurare una maggiore sicurezza rispetto a quelle allo stato liquido, data l'assenza dell'elettrolita liquido infatti si possono scongiurare sia il pericolo di infiammabilità – tipico delle batterie allo stato liquido, per le quali possono verificarsi combustioni spontanee che proseguono anche in assenza di ossigeno – che il pericolo della produzione di gas nocivi.

Inoltre questo genere di batterie permette di ottenere prestazioni maggiori rispetto alle batterie tradizionali consentendo di raggiungere densità di energia superiori e di soddisfare i futuri requisiti di autonomia delle vetture elettriche assicurando al contempo un volume ridotto e una maggiore longevità.

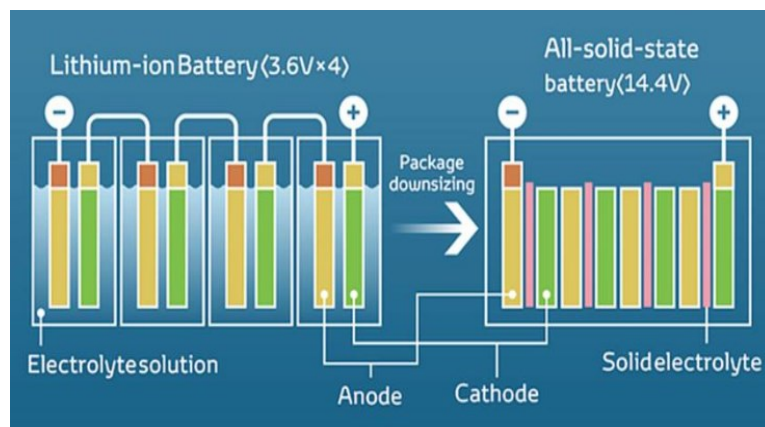


Fig.5: confronto tre LIB allo stato solido e liquido

La sfida più grande nella produzione di batterie agli ioni di litio allo stato solido è legata a fattori economici. Infatti, ad oggi produrre una batteria allo stato solido risulta essere ancora troppo costoso, ragione per la quale si continuano ad impiegare prevalentemente batterie agli ioni di litio allo stato liquido.

In queste batterie, a differenza di quelle tradizionali di cui si è parlato in precedenza, tutti i componenti della cella – compreso l'elettrolita – sono allo stato solido ed è questa l'unica reale differenza dalle precedenti, l'architettura della batteria resta la medesima delle batterie allo stato liquido quindi anche in questo caso la batteria contiene al suo

interno un'unità di controllo che la amministra collegata ai diversi moduli, i moduli a loro volta contengono i pouch in cui risiedono le celle e l'elettrolita solido.

Il flusso di elettroni dall'anodo al catodo avviene dunque per mezzo dell'elettrolita solido. Solitamente nella cella sono posti in sequenza anodo – elettrolita solido – catodo.

Si osserva nella struttura della cella che l'anodo è composto sempre da uno strato solido di litio puro – evitando così l'impiego della grafite – e l'assenza del separatore tra i diversi componenti, ciò è dovuto al fatto che l'elettrolita allo stato solido è in grado di assolvere anche alla funzione di separazione tra anodo e catodo. Tipicamente l'elettrolita solido è scelto in un'ampia gamma tra conduttori ceramici e polimerici, la produzione di tali elettroliti è però al momento troppo onerosa e rappresenta la causa degli alti costi di produzione.

La sfida maggiore nella produzione di batterie allo stato solido risiede appunto nella ricerca di un elettrolita solido che sia in grado di soddisfare gli standard di velocità e capacità assicurando le elevate prestazioni tipiche di queste batterie ma che sia allo stesso tempo economico da produrre e capace di superare i processi di degradazione alle interfacce che avvengono a livello di cella. Inoltre si sta ricercando un metodo di infiltrazione nel pouch dell'elettrolita solido in grado di assicurare l'assenza di vuoti durante tutta la vita della cella. Al momento le metodologie più usate per l'infiltrazione dell'elettrolita sono quella mediante solvente e la fusione diretta dell'elettrolita su fogli catodici preformati. Contestualmente allo sviluppo di questi sistemi di accumulo si sta pensando anche al loro riciclo e riutilizzo, cercando pertanto di non ripetere gli errori commessi durante lo sviluppo e la diffusione su larga scala delle batterie agli ioni di litio allo stato liquido si sta approcciando la progettazione e lo sviluppo delle batterie allo stato solido nell'ottica più lungimirante del design for disassembly.

3.3 Batterie semi-solidi al litio/flusso di ossigeno

Un altro fronte di sviluppo molto interessante è quello delle batterie semi-solidi a flusso di ossigeno. La prima applicazione di questo genere è derivata dalla tecnologia delle batterie statiche litio/ossigeno a respirazione d'aria (LAB), nelle quali la cella è continuamente alimentata da ossigeno – il quale svolge il ruolo di catodo – e che teoricamente permettono il raggiungimento di densità di energia estremamente elevate. L'incapacità delle batterie LAB di scaricare energia velocemente ha portato come primo sviluppo alla progettazione delle batterie al litio/ossigeno a flusso di aria (LAFB) in cui l'ossigeno viene fatto fluire nella cella mediante l'impiego di un elettrolita ma che non si sono rilevate comunque in grado di sfruttare al meglio l'elevata energia specifica prodotta dalla cella litio-ossigeno. Una svolta in questo senso è stata ottenuta utilizzando una specie elettroattiva solida disciolta nell'elettrolita, dando origine a un flusso semi-solido e alle batterie al litio/ossigeno a flusso semi-solido (SLAFB).

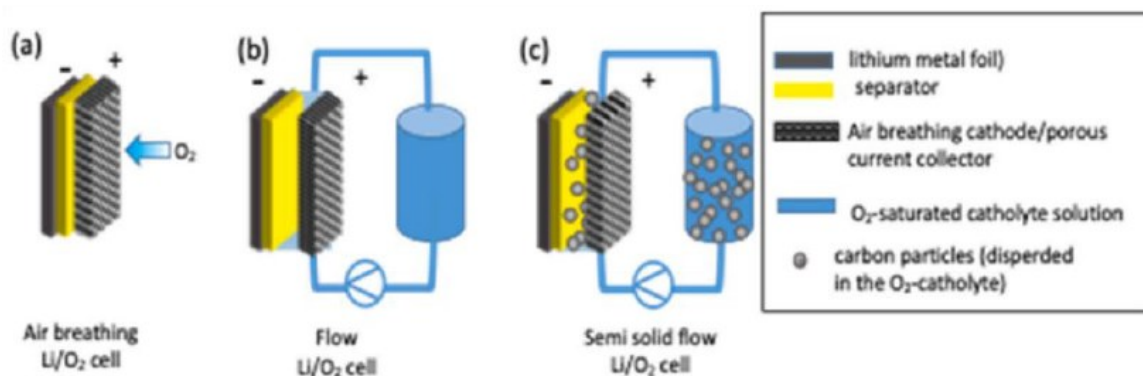


Fig.6: schemi celle Li/O₂: a respirazione (a), a flusso (b), a flusso semi-solido (c)

Una ulteriore evoluzione delle batterie SLAFB è rappresentata dalle batterie semi-solidi al litio/ossigeno a flusso Redox (SRFB) – dette anche semplicemente batterie Redox – che si caratterizzano per il fatto che i materiali che permettono l'accumulo di energia sono immagazzinati all'esterno delle celle della batteria ed offrono caratteristiche distinte. In particolare, le specie elettroattive sono tipicamente solide e vengono disciolte in un elettrolita per poi essere immagazzinate all'interno di serbatoi esterni alla cella e pompate in un reattore elettrochimico nel quale avviene la conversione dell'energia, da energia chimica a energia elettrica.

Le caratteristiche delle batterie a flusso che stanno suscitando particolare interesse sono tuttavia diverse: in primo piano la scalabilità indipendente di energia e potenza, la loro

semplice riciclabilità e la loro lunga durata che consente una notevole autonomia. Nella pratica queste batterie utilizzano l'ossidazione del litio all'anodo e la riduzione dell'ossigeno al catodo per indurre un flusso di corrente, questa combinazione permetterebbe teoricamente di ottenere dispositivi in cui l'energia specifica sia massima. D'altra parte questa tecnologia ha ancora bisogno di essere messa a punto per eguagliare o superare quella che è la densità di energia ottenuta per le batterie agli ioni di litio tradizionali che risulta essere ancora ben distante da quella offerta dalle batterie Redox. Inoltre è evidente che queste batterie non sono ancora in grado di scaricare energia con la stessa velocità delle LIB il che risulta essere un ostacolo all'impegno di questa tecnologia nel settore dei trasporti dato che si riuscirebbe ad ottenere notevole autonomia ma con una minima potenza, immaginando l'impiego di una RFB su un'auto elettrica si potrebbe ad oggi percorrere più di 800km con una sola carica ma essendo incapaci di accelerare velocemente.

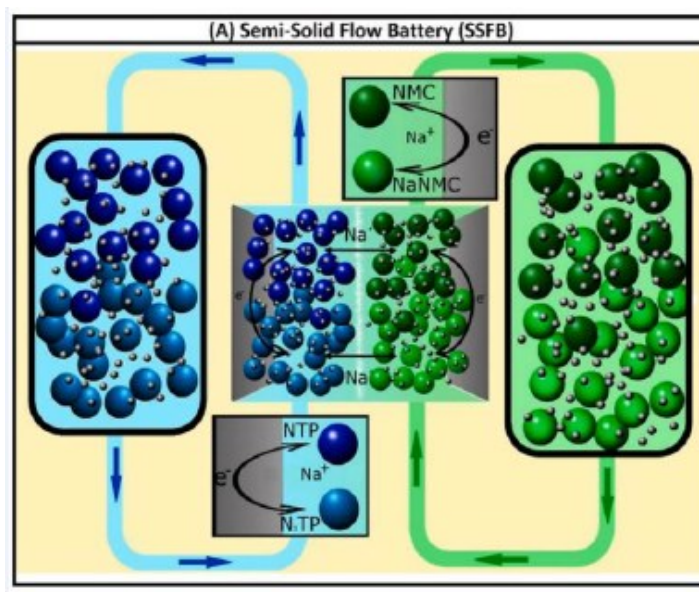


Fig.7: schema di una batteria semi-solida a flusso Redox

Per ovviare a questi problemi gli studi di ricerca si stanno concentrando sul superamento del limite di solubilità delle specie attive negli elettroliti al fine di produrre un aumento significativo della capacità volumetrica e quindi della densità di energia delle RFB. Inoltre si stanno cercando nuovi fluidi semi-solidi basati su diverse sostanze chimiche che sono tipicamente adoperate in batterie statiche con elettrodi solidi come gli ioni di litio, litio-zolfo, litio-ossigeno, ioni di sodio, zinco-nichel e zinco-ferro e vanadio.

Il miglioramento delle batterie semi-solidi al litio/flusso di ossigeno, mirato all'aumento delle prestazioni in termini sia di potenza nominale che di risposta in velocità e ciclabilità richiede l'ottimizzazione dei separatori, la formulazione di una miscela elettrolitica migliorata, lo sviluppo di una unità di gestione delle celle potenziata nonché di uno studio approfondito sull'interfaccia del litio metallico e sul corretto assemblaggio. Il primo prototipo di batteria SLAFB potenziata è stato già prodotto dalla Spinoff battery srl e denominato new semi-solid flow lithium oxygen battery – abbreviato nessox – ottenendo notevoli risultati, anche se su piccola scala e in laboratorio, capaci di aprire la strada ad un ulteriore sviluppo di questa tecnologia.

4. Design for disassembly ed economia circolare

Nell'ottica di una visione sempre più ecologica e nel rispetto delle politiche green adottate e condivise ormai da quasi tutti i governi mondiali, l'economia circolare riveste un ruolo centrale nella direzione della così detta transizione ecologica e il settore industriale si trova a dover fare i conti con le nuove normative vigenti e a prepararsi per le future disposizioni che si prevedono sempre più stringenti in questa direzione.

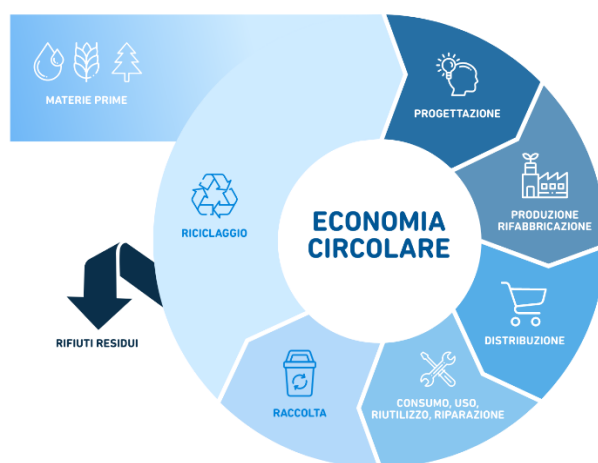


Fig.8: concezione di economia circolare

Considerato lo scenario odierno e le prospettive future dunque le industrie sono incoraggiate a considerare l'intero ciclo di vita del prodotto – dalla produzione alla dismissione – e a trovare soluzioni appropriate ai nuovi modelli di business con particolare attenzione al riutilizzo, alla rigenerazione al riciclo dei prodotti.

Una economia circolare che sia efficace mira a ottimizzare sia l'utilizzo delle materie prime che la vita dei beni al fine di favorire il passaggio dal consumo di risorse limitate a quello di risorse rinnovabili.

Per l'industria, il riutilizzo e il recupero dei materiali è una vera e propria sfida in questo momento. In particolar modo si sta ponendo una grande attenzione nella considerazione dello smontaggio e del disassemblaggio dei beni dato che queste operazioni costituiscono ormai un processo sistematico e selettivo di separazione delle componenti di un prodotto al fine permettere poi il riciclo dei materiali. Inoltre bisogna considerare in quest'ottica che un prodotto che sia facilmente smontabile permette la sostituzione dei componenti danneggiati e quindi la semplice riparazione del dispositivo, consentendo così di

prolungare la vita utile di un bene mediante semplici ed economiche operazioni di sostituzione dei componenti.

È in questa visione che si sviluppa il design for disassembly (DFD), ovvero una nuova concezione di progettazione in cui si vada a considerare come rendere il prodotto finito facilmente smontabile e correttamente riciclabile ancor prima di progettare il prodotto stesso. Si può in un certo senso affermare che il design for disassembly implica che la progettazione di un nuovo prodotto origini dal suo fine vita col fine di far convergere la produzione di beni industriali verso processi più circolari e con impatto ambientale ridotto al minimo.

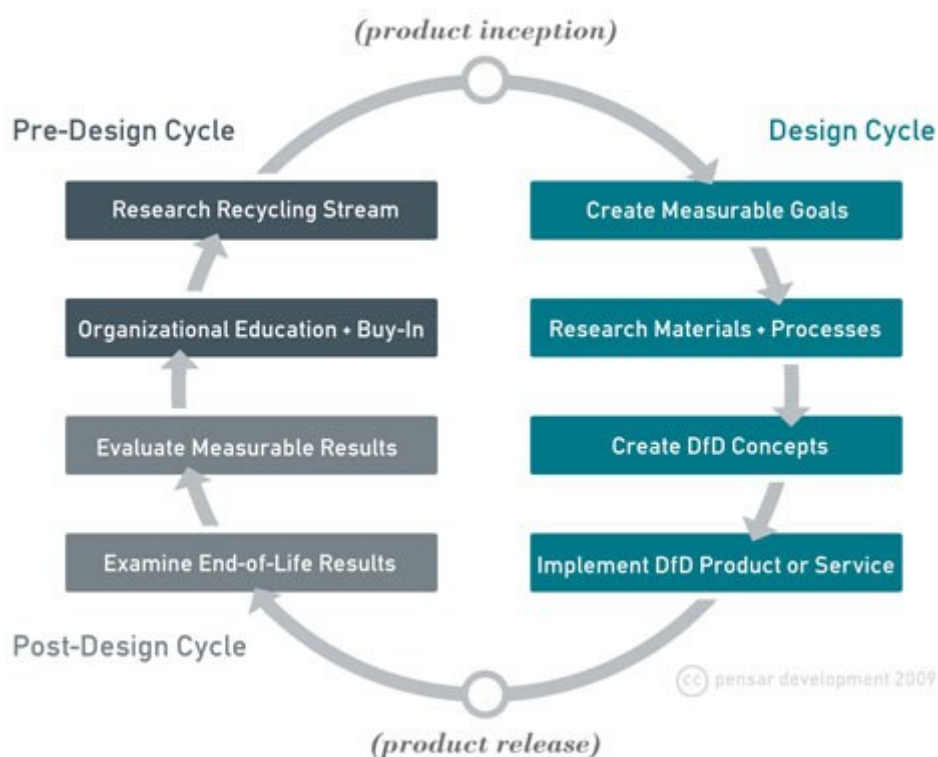


Fig.9: schema della procedura di progettazione DfD

Le prime applicazioni sulle quali è stato sperimentato il design for disassembly – per poi studiarne e comprenderne i possibili benefici e le reali potenzialità in termini di rispetto dell'ambiente – hanno interessato gli elettrodomestici. Dagli studi è emerso dunque che una progettazione che consideri il completo ciclo di vita del prodotto apporta notevoli benefici per l'ambiente, consentendo allo stesso tempo l'impiego di materiali di maggiore qualità. Si è osservato infatti che utilizzando le tecniche di DfD si possono ridurre significativamente i costi di produzione ottenendo al contempo una maggiore efficienza

tecnica, maggiore flessibilità e una riduzione dei tempi e dei costi per sviluppo del prodotto oltre a ridurre la quantità di risorse necessarie per creare nuovi prodotti.

Dopo le sperimentazioni sugli elettrodomestici il design for disassembly ha iniziato a suscitare grande interesse nel mondo industriale. Le grandi potenzialità di questa concezione progettuale non potevano infatti essere trascurate dai produttori di qualsivoglia tipologia di bene – sia in termini economici e di redditività che in termini ecologici – ed ha iniziato ad essere una metodologia di progettazione molto diffusa.

La progettazione secondo il design for disassembly prevede la considerazione di tre parametri fondamentali: architettura, connessioni e materiali.

- **Architettura:** lo scopo della progettazione deve essere quello di minimizzare il numero di componenti e materiali, favorire l'assemblaggio e il disassemblaggio meccanico e non chimico utilizzando strutture modulari facilmente separabili, massimizzare l'accessibilità ai componenti ed ai materiali nocivi nonché a quelli di maggior valore, minimizzare il numero di movimenti necessari al disassemblaggio e ridurre il numero di componenti difficili da maneggiare.
- **Connessioni:** la fase più dispendiosa in termini di tempo nel disassemblaggio di un prodotto è quella della rimozione degli elementi di connessione. Le linee guida per l'ottenimento di un prodotto di facile disassemblaggio suggeriscono di ridurre al minimo la varietà degli elementi di fissaggio e quindi minimizzare le tipologie di utensili necessari alla loro rimozione, utilizzare sistemi di giunzione reversibili e di facile rimozione e migliorare l'accessibilità e la riconoscibilità degli elementi di connessione.
- **Materiali:** al fine di ottenere materie prime post-consumo di buona qualità ed economicamente sostenibili è necessario che i materiali siano separati in flussi di materiale puro prima del riciclo. Per semplificare e snellire queste operazioni la via più semplice ed economica è quella di ridurre la varietà dei materiali e di codificarli al fine di minimizzare – o meglio evitare quando sia possibile – l'utilizzo etichette adesive e trattamenti superficiali.

4.1 Design for disassembly per batterie al litio

Osservando più da vicino quella che è l'attuale situazione riguardante le batterie agli ioni di litio si può facilmente comprendere che nella progettazione delle batterie ad oggi impiegate sulla grande maggioranza dei veicoli elettrici non si sia data la dovuta centralità al design for disassembly in fase di progettazione e si riscontrano dunque grossi problemi nell'applicazione di processi circolari a salvaguardia dell'ambiente.

La veloce ascesa dei veicoli elettrici non ha concesso ai progettisti tutto il tempo di cui avevano bisogno per elaborare dei dispositivi di accumulo di energia che rispondessero al meglio alle necessità dell'economia circolare. Inoltre bisogna osservare che le batterie agli ioni di litio possiedono intrinsecamente una complessità tale da rendere arduo il loro disassemblaggio automatizzato e il loro riciclo, per questioni di sicurezza, di valutazione dei materiali e delicatezza dei processi. Una progettazione secondo i criteri del DFD avrebbe quindi richiesto tempi lunghi, impossibili dato l'andamento del mercato.

Tuttavia nonostante il ritardo, si sta tentando di accorciare i tempi per risolvere il problema del riciclo delle batterie agli ioni di litio e si sono già mossi i primi passi in questa direzione, si stanno quindi sperimentando metodi efficienti di riutilizzo delle batterie e al contempo si sta ricercando il miglior metodo di disassemblaggio per il riciclo. Ad oggi il mercato delle batterie al litio per autoveicoli immesse sul mercato europeo conta circa 800.000 tonnellate per anno, le stime indicano che entro il 2030 potremmo arrivare a 7.300.000 tonnellate annuali e che si avranno ogni anno circa 4000 tonnellate di batterie da riciclare. L'elaborazione di un sistema basato su un approccio olistico per favorire la circolarità dei materiali entro tale data rappresenta quindi una sfida in termini tecnici e logistici – perché bisogna creare un sistema di raccolta adeguato prima ancora di ottimizzare il recupero dei materiali – ma al contempo anche una grossa opportunità in termini economici.

Sebbene nella progettazione delle batterie agli ioni di litio oggi in uso non siano state rispettate le linee guida del DFD, nello sviluppo delle nuove tecnologie di accumulo di energia – quali batterie allo stato solido o semi-solido a flusso - questo approccio è centrale. Si sta quindi guardando con attenzione alle caratteristiche di riciclabilità e disassemblaggio richieste dai nuovi standard al fine di garantire prodotti quanto più recuperabili e sostenibili.

Nel design delle batterie di moderna concezione, destinate ai veicoli elettrici futuri, si sta infatti cercando di massimizzare la riciclabilità e la circolarità.

Si sta lavorando al fine di evitare tutte le componenti che rappresentano un ostacolo a questi obiettivi, si stanno cercando soluzioni che permettano di escludere qualsiasi connessione adesiva e consentano l'utilizzo di mezzi di fissaggio più facilmente rimovibili e che non richiedano l'uso di solventi chimici. Soluzioni interessanti in questa direzione riguardano la ricerca di connessione attivamente rimovibili, ovvero dispositivi di connessione che quando opportunamente stimolati – mediante riscaldamento per esempio – siano in grado di cambiare la propria morfologia e quindi di consentire uno smontaggio non distruttivo. Una soluzione di questo tipo già testata è quella di dispositivi di connessione in lega-polimero a memoria di forma, tuttavia l'impiego di queste soluzioni risulta ostico per via dei rischi termici legati alle batterie al litio.

Allo stesso tempo la ricerca per passare a sistemi solidi o semi-solidi per superare l'elettrolita liquido è in una fase ormai avanzata.

Anche nella progettazione di anodi e catodi la ricerca si sta spingendo oltre, l'obiettivo è di rendere indipendenti questi due componenti in modo che non sia richiesto l'utilizzo di rame e alluminio e così da agevolare il disassemblaggio delle unità LIB semplificando notevolmente il processo di classificazione dei materiali.

Negli ultimi tempi si sta impiegando anche l'intelligenza artificiale che, congiuntamente all'apprendimento automatico, sta portando buoni risultati e un ottimo aiuto anche nell'eco-design delle batterie. Queste moderne tecnologie si stanno rivelando abili nel prevedere le prestazioni dei materiali e nello screening dei materiali energetici. Lo studio mediante intelligenza artificiale permette quindi di progettare migliori materiali per elettrodi ed elettroliti attraverso esperimenti robotici e analisi automatiche intelligenti. L'intelligenza artificiale potrà quindi giocare un ruolo fondamentale nell'assistenza al processo di progettazione delle future batterie e del loro sistema congiunto di smontaggio utilizzando le conoscenze del DFD già acquisite.

5. Casi di studio

Mirando alla creazione di un sistema circolare e sostenibile, il disassemblaggio delle batterie al litio è riconosciuto come una criticità. Gli attuali processi di riciclaggio delle batterie infatti prevedono la triturazione e il successivo impiego di tecniche pirometallurgiche o idrometallurgiche molto inquinanti e pericolose.

Per risolvere questo problema è importante adottare strategie che consentano uno smontaggio di qualità, in questo momento è chiaro che operare uno smontaggio che sia fine e selettivo è l'unica via per ottenere la circolarità e la sostenibilità ricercate.

Bisogna inoltre osservare che ad oggi i sistemi automatizzati proposti sono in grado di smontare una batteria al litio solo a livello di moduli e le operazioni di disassemblaggio si basano principalmente sul lavoro manuale. Mentre lo smontaggio a livello cellulare, per il momento, viene eseguito solo in laboratorio.

Lo studio del disassemblaggio delle batterie al litio si concentra in questo documento sulle attuali capacità e sulle potenzialità dei sistemi automatizzati per lo smontaggio di LIB, osservando da vicino quelli che sono i problemi maggiori riscontrati durante i processi in piccola e grande scala e su quali siano gli approcci proposti per la loro risoluzione.

5.1 Smontaggio intelligente delle batterie LIB

L'utilizzo dell'intelligenza artificiale (AI) offre forse la migliore prospettiva che nel campo dello smontaggio delle batterie al litio per veicoli. Lo sviluppo dell'intelligenza artificiale – in particolare dell'apprendimento automatico – si sta rinnovando e sta crescendo rapidamente grazie ai notevoli progressi registrati su hardware e algoritmi.

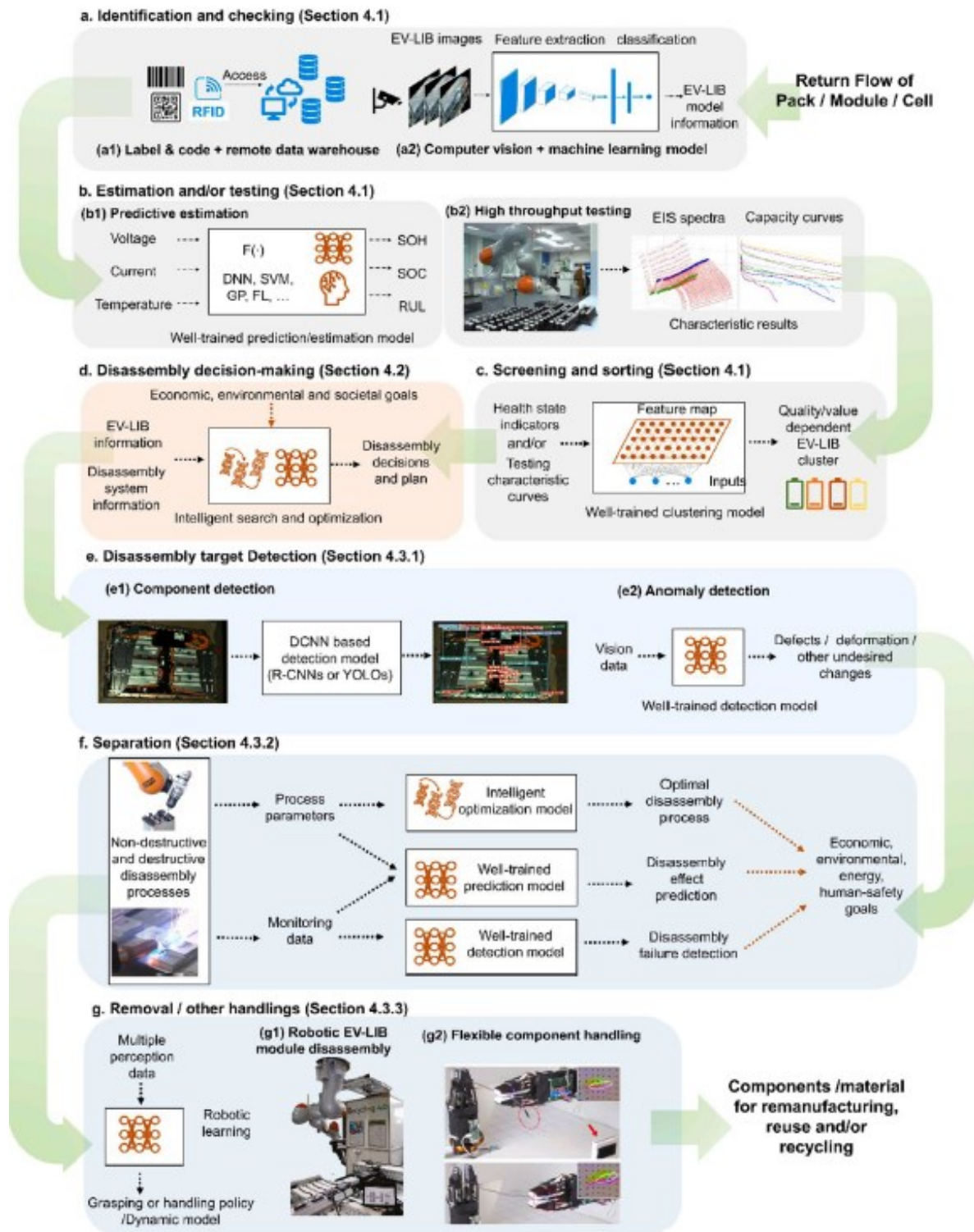


Fig.10: schema di disassemblaggio LIB mediante l'adozione dell'intelligenza artificiale

Si stanno sviluppando diverse tecniche di intelligenza artificiale ispirate alla natura – ad esempio alle reti neurali – grazie alle quali le macchine stanno assumendo capacità di apprendimento avanzate che potrebbero renderle capaci di affrontare circostanze complesse e non lineari. Lo sviluppo di tali tecniche di apprendimento, unitamente a servizi di cloud, sistemi di supporto e robot all'avanguardia potrebbe rendere possibile la realizzazione di una catena di approvvigionamento chiusa, sono infatti diverse le ricerche che indicano l'AI come una strategia vincente per le attività di riciclo delle LIB.

Bisogna inoltre osservare che lo sviluppo di tecniche di intelligenza artificiale avanzata apporterebbe anche altri benefici nel settore, infatti sarà possibile conoscere meglio quali sono le motivazioni a monte di eventuali guasti delle batterie. Grazie all'AI sarà infatti possibile studiare lo stato di salute residuo di una batteria, rilevare cortocircuiti interni, studiare le caratteristiche dei materiali e redigere una prognostica basata su cloud.

Tuttavia sono diverse le questioni che ancora si sollevano attorno allo sviluppo di queste tecnologie. Ci si domanda infatti come selezionare e applicare i diversi metodi per lo smontaggio intelligente delle LIB, quali siano i progressi e le opportunità legate allo smontaggio intelligente e perché questa tecnologia sia di così centrale importanza nel riciclo delle LIB.

5.1.1 Applicazione dell'AI al sistema di smontaggio

Per capire meglio come lo sviluppo dell'intelligenza artificiale e dell'apprendimento automatico possano essere integrate nel processo di smontaggio delle LIB è necessario descrivere cinque aspetti chiave del disassemblaggio.

- Pre-elaborazione dello smontaggio: processo critico per mezzo del quale si identificano le specifiche delle batterie, si valuta il loro stato di salute e si ordinano in funzione della loro qualità residua.
- Pianificazione dello smontaggio e processo decisionale: sulla base delle precedenti valutazioni si decidono le modalità di gestione dello smontaggio. Si definisce e quindi si pianifica il processo di smontaggio, il bilanciamento della linea, si progettano i layout e si valutano i rischi.
- Operazioni di smontaggio: esecuzione operativa di quanto stabilito precedentemente. In generale le operazioni di smontaggio sono rilevamento, separazione e manipolazione dei target di smontaggio.

- Interazione uomo-macchina: aspetto cruciale nello smontaggio di LIB, ne dipendono la qualità del processo, il funzionamento della linea e il controllo dello smontaggio. Questo aspetto è di grande interesse per la ricerca.
- Progetto per lo smontaggio: sono indispensabili approcci progettuali di DFD.

Bisogna altresì comprendere al meglio alcune caratteristiche delle LIB per osservare a pieno il problema del loro disassemblaggio. Lo smontaggio delle batterie al litio infatti presenta diversi rischi per la sicurezza – data la tensione elettrica, i metalli pesanti, le sostanze tossiche in esse contenute – e dipende dalle condizioni spesso incerte dell'unità LIB. Inoltre lo smontaggio robotizzato risulta difficoltoso in quanto la propria manipolazione robotica dei componenti e dei materiali risulta complessa e delicata.

La necessità di sviluppare sistemi robotici automatizzati e intelligenti è di primaria importanza per ridurre il rischio ed aumentare la sicurezza del processo di smontaggio delle batterie al litio, la riduzione dei rischi per la salute umana è il principale motivo d'urgenza di tale sviluppo. L'obiettivo dell'implementazione dell'AI è quello di massimizzare il livello di autonomia dello smontaggio e quindi di ridurre al minimo il coinvolgimento dell'uomo nel processo. Tuttavia la complessità e la varietà delle incertezze legate al processo di smontaggio rappresentano un grosso ostacolo alla realizzazione di sistemi completamente autonomi che siano sufficientemente flessibili, adattabili e che abbiano capacità percettive tali da escludere l'uomo. È evidente che un sistema di disassemblaggio LIB non avrebbe successo se sprovvisto di un certo livello di intelligenza, per questo si lavora parallelamente allo sviluppo dell'intelligenza artificiale e di macchine robuste ed affidabili considerando l'eventualità di una collaborazione tra uomo e macchine.

L'intelligenza artificiale dovrà rendere le macchine adattive e flessibili per consentire al sistema automatizzato una percezione multidimensionale e una capacità decisionale avanzata.

Riprendendo quindi gli aspetti chiave del disassemblaggio illustrati in precedenza analizziamo ora quale sia il contributo dato dall'intelligenza artificiale al processo.

- Pre-elaborazione intelligente dello smontaggio: le proposte di impiego dell'AI per questa fase sono fondamentalmente due, molto diverse tra loro ma entrambe con aspetti a favore.

La prima proposta è quella di impiego di una etichettatura intelligente per LIB basata sul riconoscimento della frequenza radiale (RFID) tale da fornire una identificazione univoca e senza contatto il cui fine è semplificare il riconoscimento e il tracciamento delle LIB. Questo sistema di etichettatura necessita tuttavia di un sistema internet of things ben costruito, di standard riconosciuti e di condivisione aperta di dati.

La seconda proposta invece prevede di combinare l'AI con visione artificiale e rete neurale. Questo metodo risulta più adattivo rispetto il precedente e più facile da implementare ma l'accuratezza e l'affidabilità sono inferiori rispetto alle tecniche di identificazione univoca.

Le due proposte di identificazione sopra potrebbero condividere una delle tecniche intelligenti per la valutazione dello stato di salute della batteria, valutazione sulla quale i sistemi intelligenti sono già evoluti. Sono diversi i modelli allo studio – basati su modelli fisici, analitici e ibridi – in grado di soddisfare le esigenze industriali.

- Pianificazione intelligente dello smontaggio: i problemi della pianificazione di un sistema di smontaggio sono tipicamente più complessi di quelli che si incontrano nell'assemblaggio per via delle incertezze che caratterizzano il processo. Sono quindi necessari nello smontaggio capacità cognitive e adattabilità. Nell'intento di muovere verso un'industria sempre più digitale, l'idea è quella di ottenere sistemi capaci di adattarsi in maniera intelligente man mano che il flusso di LIB e di ordini di smontaggio varia

L'integrazione dell'AI in questo caso è stata proposta secondo tre differenti soluzioni.

La prima proposta prevede algoritmi di evoluzione o di calcolo iterativo che permettono l'ottimizzazione della sequenza di smontaggio e il bilanciamento della linea in maniera dinamica. In questo caso è previsto l'uso dell'apprendimento automatico per permettere ai robot una migliore interazione con l'ambiente e prendere decisioni sulla sequenza di smontaggio.

La seconda proposta prevede invece di combinare tecnologie hardware intelligenti – come la realtà aumentata (AR) – con l'apprendimento automatico al fine di facilitare il processo decisionale di disassemblaggio. Il principale problema di questa proposta sta nella lentezza della risposta e dell'interazione del sistema.

La terza ed ultima proposta prevede di basare la pianificazione del disassemblaggio su cloud - che siano pubblici, privati, dei produttori e delle società addette al recupero di LIB – con l'intento di creare una rete di condivisione di dati e conoscenze per ottimizzare risorse e capacità dei servizi.

- Operazioni di smontaggio intelligenti: questo è il campo in cui sono già stati fatti i primi passi nell'uso dell'intelligenza artificiale. I metodi intelligenti sviluppati finora hanno già contribuito e contribuiranno in maniera ancor più significativa nei prossimi anni.

La prima tecnologia intelligente attuata nel disassemblaggio delle LIB è il rilevamento intelligente del target. Questa tecnologia fa in modo che il sistema automatizzato sia in grado di comprendere la geometria e le caratteristiche fisiche delle unità LIB e di riconoscere eventuali difetti o stati anomali del target da smontare. In caso vengano rilevate delle anomalie sul target il sistema decide autonomamente di annullare o modificare lo smontaggio. Questo approccio è consentito dall'impiego di vari sensori tra cui telecamere industriali 2D e 3D, sensori di forza, di coppia e tattili. La visione artificiale in questa applicazione viene implementata al massimo ed è fondamentale per la classificazione delle caratteristiche delle batterie da parte dell'intelligenza artificiale. Recentemente sono stati sviluppati sistemi che combinano la visione artificiale con metodologie di deep learning. Si sono così ottenuti risultati entusiasmanti nell'esecuzione del rilevamento, si è così riusciti ad eseguire in maniera simultanea estrazione, classificazione ed etichettatura dei componenti delle LIB applicando sui robot un apprendimento multi-task. Questo secondo metodo è attualmente molto efficace specie sulla componentistica di dimensioni minute, dove risulta essere straordinariamente veloce e preciso. Tuttavia sono ancora in corso di sperimentazione aggiornamenti che potrebbero presto apportare un nuovo grosso miglioramento della precisione, della robustezza e della velocità di rilevamento intelligente dei difetti.

La seconda tecnologia intelligente applicata allo smontaggio delle LIB riguarda l'ottimizzazione del processo di separazione. Nelle LIB il processo di smontaggio passa per la separazione di diversi componenti connessi in maniera differente, le connessioni sono realizzate mediante elementi meccanici, saldature e giunzioni adesive. Inoltre è necessario smontare anche gli elementi di connessione elettrica, e i giunti di isolamento elettrico, oltre ai conduttori di calore e ai sigillanti.

Le linee guida raccomandano metodi di disassemblaggio non distruttivi anche se per le geometrie e gli standard odierni lo smontaggio delle batterie non può ancora essere realizzato senza l'utilizzo di mezzi distruttivi.

Vista la varietà delle tipologie di connessione realizza sulla singola unità LIB è evidente come per il disassemblaggio sia necessario un sistema automatizzato e intelligente in grado di essere flessibile e adattabile, che possieda rapide capacità di riconoscimento e cambio utensile. L'impiego dell'AI in questo contesto è volto a rendere il processo di smontaggio più efficiente dal punto di vista energetico e a migliorare la sicurezza per l'uomo, allo stesso tempo però si cerca di limitare il più possibile la produzione di rifiuti.

Le tecnologie intelligenti permettono l'ottimizzazione del processo di separazione utilizzando metodi di misura per un controllo ottimale delle operazioni, per esempio, durante la rimozione delle connessioni meccaniche mediante viti il robot intelligente è capace di regolare la coppia e la posizione dell'utensile per ottenere uno svitamento preciso ed evitare danni all'utensile. Durante le operazioni di taglio l'intelligenza artificiale consente la realizzazione di tagli di qualità identificando e regolando i parametri di processo ottimali come pressione, proprietà dell'impulso, velocità di taglio e conicità.

Infine l'ultima applicazione dell'intelligenza artificiale nello smontaggio delle batterie al litio riguarda la manipolazione robotica. La manipolazione robotica abile è essenziale per lo smontaggio intelligente, tuttavia in questa applicazione si stanno incontrando maggiori difficoltà rispetto alle precedenti in quanto i robot si trovano ad operare in condizioni di incertezza dovute alla casualità dello stato delle LIB e perché anche una semplice operazione per l'uomo – come il pick and place – può risultare molto complicata per la macchina. Si pensi infatti che in una operazione di prelievo e posizionamento il robot deve rilevare e localizzare il componente, pianificare il percorso, determinare una posizione di presa stabile e posare il componente.

L'incertezza dell'ambiente di smontaggio e la complessità delle operazioni creano le condizioni ideali per la crescita di sistemi intelligenti dotati di apprendimento automatico. Infatti sebbene la cinematica e la dinamica dei sistemi siano ben noti spesso le risposte computazionali falliscono.

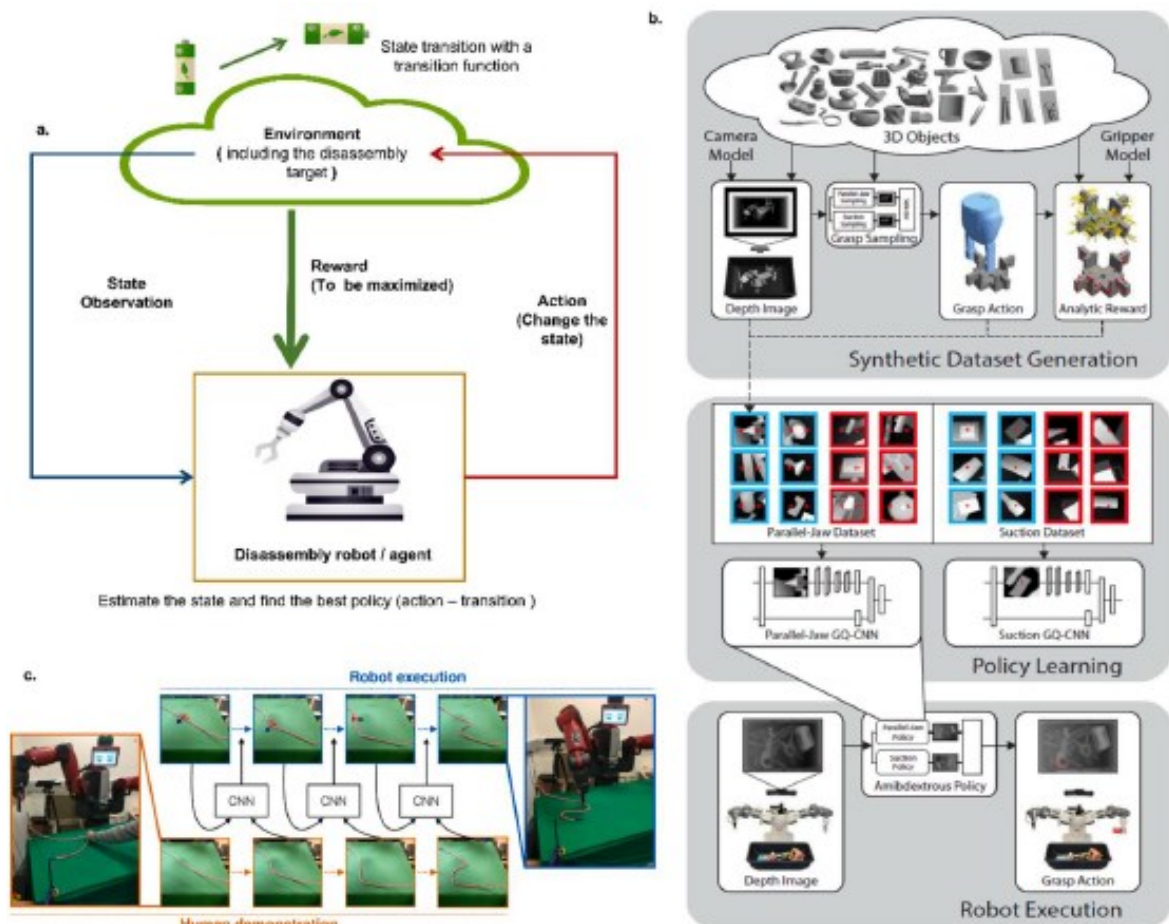


Fig.11: apprendimento robotico per manipolazione abile

L'obiettivo dei ricercatori è quindi quello di realizzare un sistema intelligente dotato di autoapprendimento che sia in grado di operare lo smontaggio in maniera precisa e affidabile in diverse condizioni, mediante l'uso della percezione intelligente e del controllo adattivo del movimento.

Le tecnologie di apprendimento per la manipolazione robotica sono allo stato sperimentale e si seguono diversi approcci. Si stanno sperimentando sistemi di apprendimento in avanti – basati su processi decisionali – che associano all'osservazione una mappatura ottimale dell'azione da eseguire, e sistemi di apprendimento inversi – detti anche per imitazione – che permettono al robot di apprendere dalla dimostrazione di un operatore.

Viene in questo campo fatto largo impegno dell'AI, in combinazione con la visione artificiale, al fine di stimare le interazioni mano-oggetto. Dalle informazioni visive infatti si riesce ad estrarre una mappa cinematica di alto livello e a determinare l'intensità delle forze di manipolazione, informazioni molto utili nel processo di

apprendimento per imitazione e per la progettazione e il controllo di una pinza umanoide.

- Interazione intelligente uomo-macchina: attualmente per i robot è impossibile realizzare operazioni di smontaggio di batterie al litio prive di assistenza umana, collaborazione e interazione uomo-macchina sono dunque ancora necessari nel trattamento delle LIB.

Sono al vaglio due diverse modalità di applicazione delle tecnologie di intelligenza artificiale nelle interazioni uomo-macchina che sono rispettivamente: lo smontaggio in teleoperazione e lo smontaggio collaborativo uomo-robot.

Lo smontaggio in teleoperazione è una tecnologia in cui il robot è controllato dall'uomo, non necessariamente a distanza, al fine di aumentare la sicurezza e la qualità delle operazioni in ambienti pericolosi o ostili. Questa tecnologia trova più facile impiego nello smontaggio delle LIB grazie all'esperienza già maturata in altri settori – si pensi all'uso della teleoperazione in ambito militare, subacqueo e chirurgico – e riesce a migliorare la sicurezza degli operatori e la qualità di alcune operazioni che, se svolte dall'uomo, potrebbero non essere conformi al fine smontaggio ricercato.

L'intelligenza artificiale e l'apprendimento automatico possono essere applicati alla teleoperazione in maniera differente, ottenendo tre diversi livelli di autonomia delle macchine.

La prima applicazione prevede il controllo diretto del robot da parte dell'operatore, in questo caso l'operatore trasferisce direttamente le proprie conoscenze e abilità al robot controllandolo mediante apparecchiature indossabili a rilevamento del movimento.

Un secondo metodo consiste nel controllo remoto del robot in tempo reale basato su un sistema di cyber-fisica. L'operatore in questo caso può guidare ed interagire col robot nel processo di smontaggio mentre il cyberspazio ne monitora e analizza tutti i movimenti in tempo reale.

La terza opzione di teleoperazione intelligente è quella del controllo condiviso, questo metodo prevede che il robot di smontaggio sia controllato da un operatore ma che possa allo stesso tempo prendere decisioni in maniera autonoma. In questi robot le capacità di apprendimento automatico sono maggiori rispetto a quelli utilizzati nelle due opzioni precedenti e sono in grado di apprendere per imitazione dalla dimostrazione umana.

Per quanto riguarda lo smontaggio collaborativo uomo-robot invece si deve fare un discorso a parte essendo questa tecnologia di smontaggio ibrido intelligente molto differente dalla teleoperazione. Senza dubbio lo smontaggio collaborativo uomo-macchina (HRC) è la tecnologia più promettente per disassemblaggio e il recupero delle batterie al litio. Questa combina la percezione e la destrezza dell'uomo con forza, resistenza e precisione delle macchine ottenendo un sistema di smontaggio ibrido altamente efficiente, sostenibile e rispettoso dell'uomo. Nello smontaggio collaborativo uomo-robot il robot può eseguire sia un ruolo attivo quando lavora autonomamente, che un ruolo di supporto quando affianca un operatore. In questi sistemi la capacità di apprendimento automatico è centrale e le caratteristiche intelligenti sono ottenute usando l'apprendimento per imitazione e una moltitudine di sensori multimodali. Le capacità intelligenti di percezione, cognizione e decisione dei robot gli consentono di affrontare compiti complessi di smontaggio LIB insieme all'uomo.

5.1.2 Sfide applicative

Bisogna fare alcune precisazioni riguardo l'intelligenza artificiale e l'apprendimento automatico. Infatti benché l'impiego di queste tecnologie stia vivendo un rapido aumento delle applicazioni in diversi settori, e con buoni risultati, bisogna analizzare nello specifico le prestazioni nel disassemblaggio delle LIB chiedendoci se ci si possa sempre fidare di questi sistemi e se l'accuratezza e l'affidabilità abbiano raggiunto i livelli desiderati. In tal senso si riscontrano ancora delle debolezze, l'addestramento dei robot infatti necessita ancora di molto lavoro e di una quantità di dati molto maggiore a quella attuale. Inoltre si sono riscontrati problemi di overfitting, overthinking, gestione del carico computazionale e di precisione.

In particolare sono stati riscontrati tre problemi nell'applicazione dell'AI allo smontaggio delle batterie al litio per veicoli elettrici:

- **Acquisizione dati di addestramento:** senza dubbio le buone prestazioni dei sistemi intelligenti dipendono dalla quantità e dalla qualità dei dati di addestramento forniti alla macchina. Nella pratica la generazione, la registrazione e la disponibilità dei dati rappresentano al momento una grossa sfida in quanto i database odierni non sono ancora in grado di fornire informazioni di monitoraggio

sufficienti riguardo le condizioni delle singole celle LIB. Oltre al problema della disponibilità dei dati si solleva anche la questione riguardante la loro qualità. Dal punto di vista dello sviluppo e dell'implementazione di sistemi intelligenti quindi è necessario comprendere in fretta quale sia la maniera corretta di ottenere dati di addestramento appropriati.

- Affidabilità delle prestazioni: legate al set dati di addestramento, sono ancora insufficienti per l'impiego di tali sistemi su larga scala e in totale sicurezza.
- Sicurezza del sistema: i sistemi di smontaggio intelligente LIB sono altamente eterogenei e complessi e includono diversi componenti hardware e software. Per essere sicuri devono poter far fronte a degrado, errori, interruzione di corrente, operazioni umane e attacchi informatici.

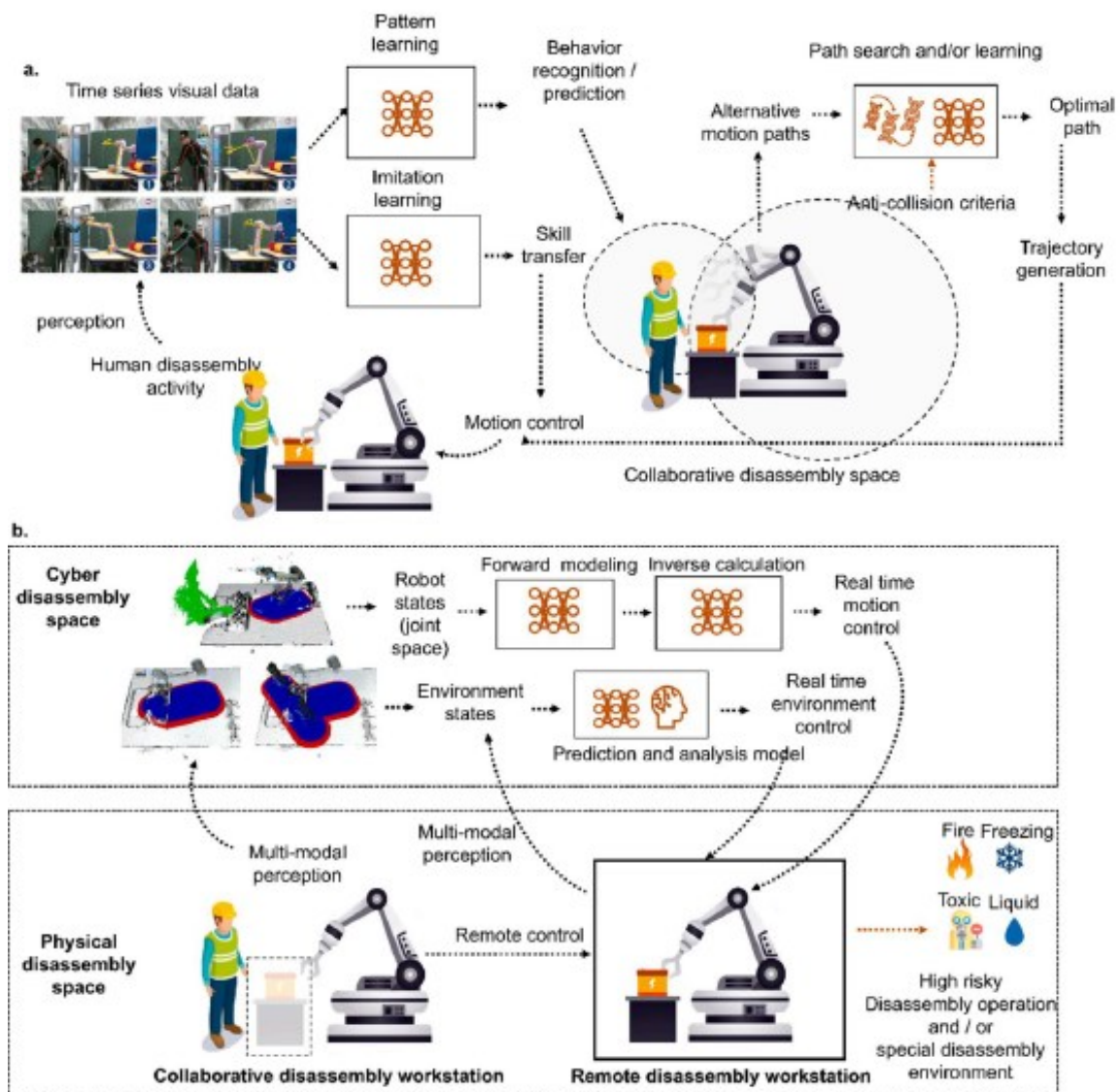


Fig.12: collaborazione intelligente uomo-robot nello smontaggio di LIB

5.1.3 Considerazioni sulla sostenibilità

Per quanto riguarda l'applicazione dei metodi di smontaggio intelligenti bisogna analizzare anche quali siano i contributi di tali sistemi in termini di sostenibilità. Bisogna infatti analizzare alcune contraddizioni che l'implementazione di intelligenza artificiale e apprendimento automatico portano con loro.

In primo luogo l'aspetto economico e il costo di tali sistemi giocano un ruolo primario nel processo decisionale. Il costo di un sistema automatizzato e intelligente formato da robot generici e hardware risulta ammortabile senza troppi problemi per la maggior parte delle aziende odierne operanti nel settore delle batterie al litio, tuttavia bisogna considerare che la realizzazione di sistemi personalizzati e particolari può far lievitare esponenzialmente i costi di acquisto. Sempre nella voce costi bisogna annoverare anche i costi di manutenzione e sviluppo dei sistemi, che dalle stime si prevedono davvero onerosi.

In secondo luogo bisogna considerare che affinché la filiera del riciclo funzioni – e non si assista a una totale perdita di interesse nel recupero delle batterie – i ricavi derivanti dallo smontaggio automatizzato intelligente siano capaci di generare lautissimi profitti per le aziende. Molto importante risulta essere in questo caso la composizione chimica delle batterie in quanto, l'utilizzo di materiali di minor valore minimizza le possibilità di profitto e quindi ridurrebbe drasticamente gli interessi economici del riciclo delle LIB.

Il terzo aspetto da osservare riguarda invece quelle che sono le prospettive ecologiche dell'impegno di questi sistemi, devono essere pertanto ben stimati il potenziale di inquinamento e l'impronta di carbonio dovuti sia al processo che al sistema di smontaggio, considerati anche le componenti dell'AI.

Infine l'ultimo aspetto da considerare è quello della sostenibilità sociale dell'impiego di questi sistemi di smontaggio, ovvero la prospettiva di “sostituire l'uomo con la macchina”. Si tenga conto che i sistemi di smontaggio collaborativo uomo-macchina porteranno a una riduzione del numero degli operatori ma non a una loro totale rimozione dalle linee, allo stesso tempo si osserva che negli ultimi anni i costi del lavoro stanno aumentando costantemente e la popolazione lavorativa sta diminuendo. L'insieme di queste condizioni mitiga in parte questo aspetto sociale che risulta infatti essere meno dibattuto dei precedenti. Inoltre la progettazione, lo sviluppo e la manutenzione di questi sistemi porteranno senza dubbio alla creazione di molti posti di lavoro e permettendo

quindi di liberare l'uomo dai compiti più gravosi e rischiosi per la salute senza ridurre le opportunità lavorative offerte dal settore.

Per quanto riguarda invece le prospettive di impiego a lungo termine nel settore si stima che la realizzazione dei futuri sistemi di smontaggio LIB completamente autonomi produrrà la totale esclusione dell'uomo dalle linee ma allo stesso tempo una notevole richiesta di personale specializzato in materia di intelligenza artificiale e sistemi robotici.

5.2 Smontaggio in modalità ibrida uomo-macchina di LIB

Avendo già analizzato le problematiche del disassemblaggio delle LIB impiegate sui veicoli elettrici e compreso che la complessità del problema implica, per il momento, l'uso necessario di un sistema ibrido uomo-macchina che sia intelligente; ci concentreremo ora ad analizzare gli aspetti tecnici di questa modalità di smontaggio LIB.

È ben noto che diversi produttori di veicoli elettrici utilizzano metodi di progettazione differenti in termini alimentazione, questo produce una grande varietà dei prodotti che differiscono per architetture, forme e materiali creando disordine nella procedura di disassemblaggio a livello cellulare delle LIB. L'obiettivo di questo paragrafo è illustrare quali siano i campi di studio riguardanti l'ottimizzazione per lo smontaggio a livello cellulare delle batterie per veicoli elettrici in modalità ibrida uomo-macchina.

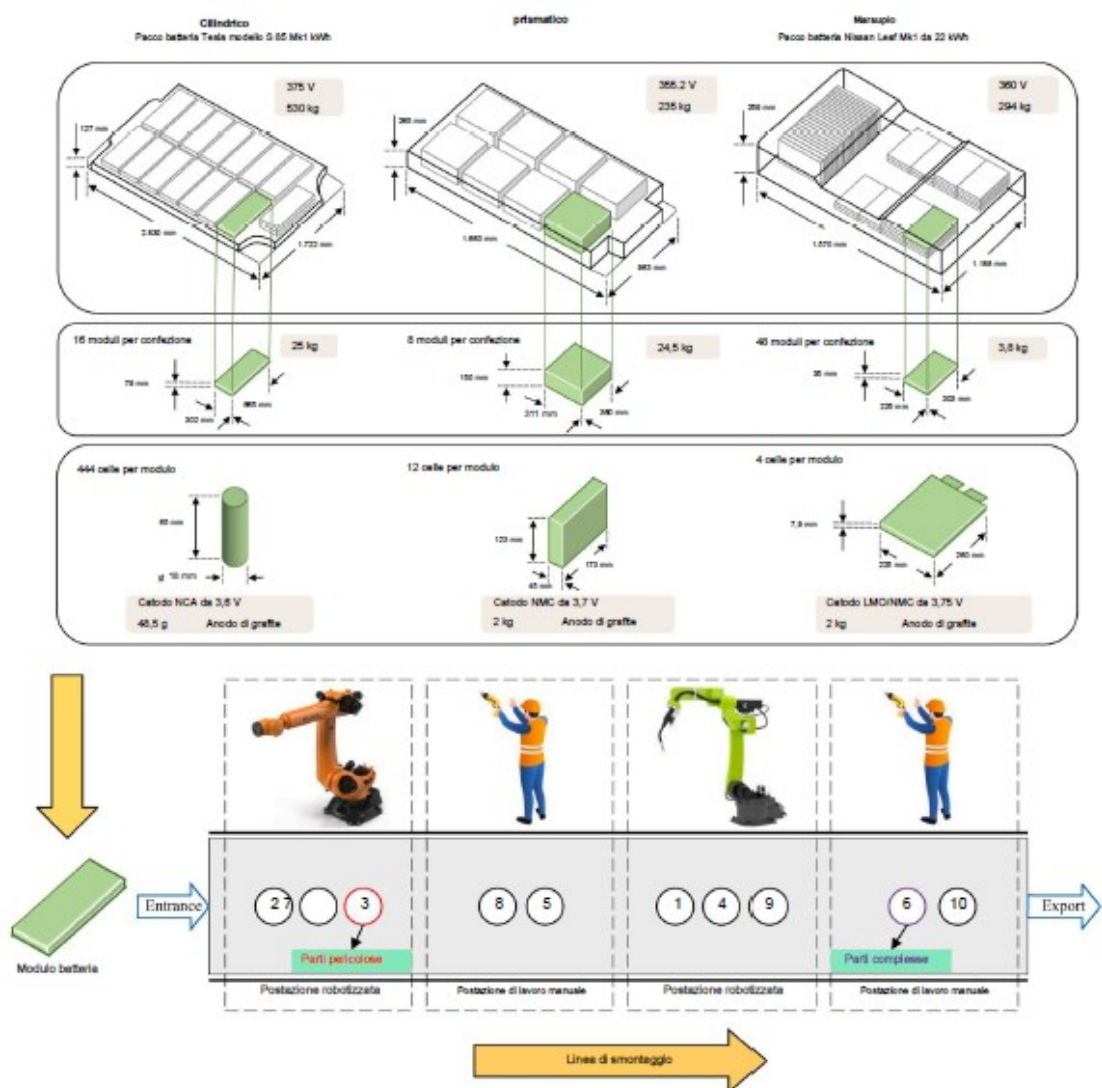


Fig.13: schema di smontaggio ibrido uomo-macchina per batterie Tesla, BMW e Nissan

In particolare gli studi in materia perseguono il fine di creare algoritmi tali da permettere la risoluzione di diverse problematiche legate allo smontaggio LIB, si vuole infatti cercare di rendere il processo più semplice raggiungendo gli obiettivi di seguito riportati:

- Prototipazione di un modello di disassemblaggio LIB a livello cellulare;
- Smontaggio ibrido uomo-macchina di parti pericolose e complesse;
- Migliore analisi e creazione diagramma delle priorità per lo smontaggio LIB;
- Pianificazione della sequenza di smontaggio LIB in base al diagramma di priorità delle operazioni.

Le lacune nelle conoscenze impiantistiche riguardano principalmente tre aspetti: modalità di smontaggio, pianificazione della sequenza e problemi di equilibrio delle linee.

Le attuali modalità di smontaggio cellulare LIB ai fini del riciclo e del riutilizzo sono principalmente manuali, ciò significa che personale tecnico altamente qualificato esegue le operazioni con l'ausilio di attrezzatura specifica. L'impiego di personale non adeguatamente formato in queste operazioni potrebbe produrre gravi danni per la salute degli operatori, è chiaro che la formazione necessaria al personale unitamente ai costi elevati della mano d'opera rende l'attuale procedura non adatta ai grossi volumi di LIB da smontare previsti per gli anni avvenire. Lo smontaggio automatizzato tuttavia appare lungi dall'essere prossimo alla messa in opera. La modalità di smontaggio LIB ibrida uomo-macchina dunque, si candida come la migliore opportunità per il periodo attuale e per il futuro prossimo.

Il secondo aspetto di interesse è la pianificazione della sequenza di smontaggio, si osserva che un piano di smontaggio adeguato può migliorare l'efficienza del disassemblaggio. Recenti studi condotti sullo smontaggio delle batterie al litio utilizzate per le Audi Q5 ha utilizzato una matrice di priorità delle operazioni per migliorare l'efficienza delle workstation con buoni risultati. È quindi molto importante analizzare le priorità durante la pianificazione del processo per massimizzare le prestazioni del sistema di smontaggio.

Altro problema nello smontaggio LIB è il bilanciamento della linea, bisogna infatti cercare di bilanciare al meglio la linea nel rispetto dei vincoli di precedenza e dei tempi di ciclo delle diverse workstation. I parametri di ottimizzazione del bilanciamento della linea

sono tipicamente il numero di workstation, i tempi di inattività e la rimozione anticipata delle parti pericolose.

Lo studio sull'ottimizzazione dello smontaggio LIB in modalità ibrida uomo-macchina si concentra sul miglioramento della sicurezza, dell'efficienza e del costo di smontaggio. Come piattaforma per lo smontaggio è stata scelta una linea di smontaggio rettilinea con un layout semplice e di ampia applicabilità. Le parti delle batterie sono state suddivise e catalogate in parti ordinarie, parti complesse e parti pericolose.

Si è prestata particolare attenzione all'assegnazione dello smontaggio delle parti pericolose ai robot col fine di evitare danni ai lavoratori, con un analogo ragionamento le parti complesse sono state invece assegnate agli operatori in quanto non smontabili automaticamente, mentre le parti ordinarie sono assegnate casualmente a postazioni automatizzate o manuali. Nello studio i prodotti di scarto vengono smontati per consentire il riutilizzo dei componenti preziosi molto richiesti sul mercato.

Non è stato difficile per gli studiosi elaborare un modello matematico per lo smontaggio cellulare delle batterie al litio, la vera sfida invece risiede nell'ottimizzazione delle diverse combinazioni ad opera di un algoritmo. La scelta è ricaduta sull'algoritmo di swarm intelligence – traducibile come: intelligenza dello sciame, prende in considerazione lo studio dei sistemi auto-organizzanti, nei quali un'azione complessa deriva da un'intelligenza collettiva, come accade in natura nel caso di colonie di insetti – denominato NSGA-II che ha mostrato una alta efficienza nella risoluzione di problemi multi-obiettivo in diversi studi. Si descrivono di seguito le operazioni caratterizzanti questo algoritmo:

- Codifica: vengono definite le tipologie di attività assegnate a ciascuna workstation e il relativo ordine di priorità nello smontaggio. Si determinano quindi la matrice di priorità e il diagramma di priorità delle attività;

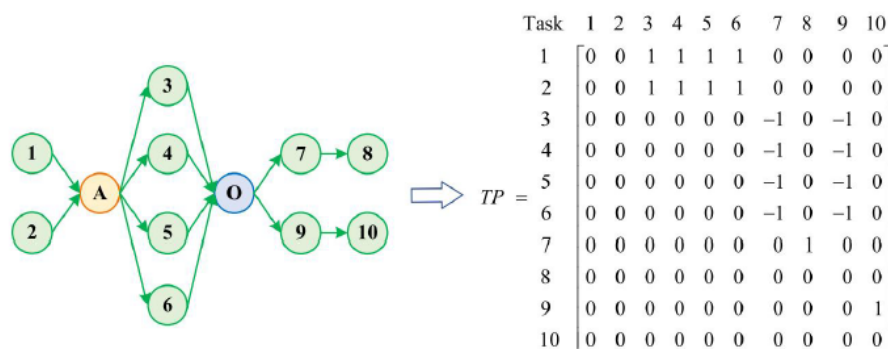


Fig.14: diagramma di priorità delle parti e matrice di priorità

- Decodifica: nel rispetto dei vincoli del sistema e degli attributi delle attività vengono assegnate le attività. Come già detto in precedenza i vincoli di assegnazione riguardano lo smontaggio di parti complesse e di parti pericolose.
- Crossover: si esegue un crossover a due punti al fine di aumentare la diversità che si ottiene nelle soluzioni. Al termine dell'iterazione bisogna giudicare le sequenze ottenute ed eliminare quelle non conformi, cioè quelle che non rispettano i vincoli, conservando sempre la sequenza originaria.
- Mutazione: operazione che consente di aumentare ulteriormente la varietà dei parametri inseriti nella fase di calcolo e ottenuti mediante crossover. Anche in questo caso bisogna verificare che i vincoli siano rispettati.
- Elaborazione multi-obiettivo: l'algoritmo è in grado di trovare diverse soluzioni a un problema, perseguendo obiettivi differenti. Al termine dell'elaborazione il sistema sceglierà sempre la soluzione migliore, o comunque la soluzione che consente un maggior valore anche ad un solo parametro di calcolo.

In questo primo studio l'algoritmo ha prodotto sequenze attendibili, anche se presenta ancora delle labilità da colmare. Tuttavia è importante individuare altri algoritmi efficaci per far fronte a quelle che sono le richieste dell'industria del recupero delle batterie al litio che con tutta probabilità diverranno presto più esigenti e necessiteranno sicuramente di linee altamente specializzate anche non rettilinee e con layout più complessi rispetto a quello scelto per condurre lo studio. La ricerca di algoritmi avanzati quindi rappresenta insieme allo sviluppo dell'intelligenza artificiale il futuro del disassemblaggio delle LIB.

5.3 Potenziale di automazione nello smontaggio di LIB

In questo paragrafo si vuole andare a comprendere quali siano le potenzialità di un sistema di smontaggio LIB automatizzato, se sia possibile una sua realizzazione a breve termine e quali siano i principali benefici derivanti dal suo impiego.

5.3.1 Studi precedenti

Lo studio di questo aspetto parte dalle sperimentazioni già realizzate dai ricercatori. La ricerca in questione ha in particolare, analizzato lo smontaggio di una batteria LIB di dimensioni ridotte, si è utilizzata per le prove la batteria di una Audi Q5 ibrida del peso di 35kg. Lo studio ha individuato come soluzione lo smontaggio della batteria a livello modulare, seguito da successiva triturazione delle celle al fine del recupero dei materiali in essa contenuti. Sono in questo caso state individuate ben quattordici parti principali, e dopo una attenta valutazione si è sviluppato un ordine di smontaggio.

L'ordine di smontaggio delle parti è stato scelto a seconda dell'utensile, ovvero si è scelto di far coincidere passaggi successivi realizzabili col medesimo utensile.

Successivamente la ricerca si è impegnata per realizzare un sistema capace di catalogare i criteri di smontaggio delle batterie, in particolare, gli indicatori scelti sono le capacità tecniche del processo di smontaggio da automatizzare (TAA) e la necessità di automatizzazione del processo di smontaggio (NA). Operativamente utilizzando uno strumento software si sono raccolte le informazioni riguardo le sequenze di smontaggio, i costi e i tempi e in seguito si è redatto un grafico di smontaggio della batteria al litio in questione.

Dopo la sperimentazione i risultati sono stati ancora a favore di una modalità di smontaggio ibrida uomo-macchina, evidenziando che risulta vantaggioso automatizzare le sole operazioni di manipolazione della batteria, ovvero l'estrazione di moduli e celle e le operazioni di presa ripetitive.

In conclusione il disassemblaggio completamente automatizzato delle batterie al litio a livello cellulare viene descritto dallo studio come irrealizzabile per via delle svariate complesse operazioni troppo impegnative per i robot che renderebbero il sistema poco efficiente. Questa conclusione è stata anche motivata dai ricercatori con l'individuazione di alcune "barriere" allo smontaggio automatizzato residenti in prodotto, processo, ambiente e logistica. In particolare le barriere del prodotto sono state individuate nel

design e negli elementi di fissaggio, le barriere del processo nello smontaggio di parti instabili o flessibili, quelle ambientali nell'invecchiamento del prodotto e quelle logistiche nell'architettura e nelle varianti delle diverse batterie prodotte.

La naturale successione dello studio si è quindi orientata sulla modalità di smontaggio ibrida uomo-macchina, con l'intento di limitare al massimo i tempi per il trasporto, si è quindi attenzionato un sistema in cui robot e operatori condividono il medesimo spazio di lavoro in cui i robot si occupano delle operazioni più semplici mentre quelle più complesse vengono compiute dagli operatori.

Si è tuttavia osservato grande potenziale di smontaggio automatizzato nel processo di estrazione di una singola cella dal modulo batteria. In questo caso la ricerca ha portato allo sviluppo di una pinza flessibile in grado di misurare lo stato di carica delle celle abbattendo così i rischi legati alla presenza di tensione, oltre che a un raffinato sistema di visione artificiale – denominato Optisort – capace di ordinare le batterie leggendo le etichette e analizzandone forma, dimensioni e colori.

Lo studio si conclude con l'analisi e il confronto dei tempi di smontaggio di diversi layout di fabbrica – linee rettilinee, ad U, ad S e ad L – e con le considerazioni economiche, notando che da questo punto di vista l'opzione migliore è il riutilizzo delle unità LIB. Allo stesso tempo però si è compreso che al termine del riutilizzo lo smontaggio diretto successivo dovrebbe essere il più possibile automatizzato per massimizzare la resa economica.

5.3.2 Elaborazione e analisi del modello per lo smontaggio LIB

Sempre con riferimento allo studio condotto sullo smontaggio automatizzato per la batteria al litio impiegata sulle Audi Q5 ibride, si analizza ora quali siano i risultati operativi estratti dallo studio, ovvero come è stato redatto il grafico di smontaggio.

Il primo passo del processo di elaborazione del modello per lo smontaggio di una batteria al litio è stato la creazione di un elenco dettagliato delle parti e degli elementi di fissaggio che sono poi state inserite in un grafico. Seguendo quanto riportato graficamente si è poi sviluppata la sequenza di smontaggio migliore. Successivamente si è proceduto alla valutazione delle capacità tecniche e delle necessità economiche necessarie allo smontaggio di ogni singola parte.

Il grafico di disassemblaggio è stato realizzato dopo aver valutato quale parte o quali elementi di fissaggio dovessero essere smontati per primi.

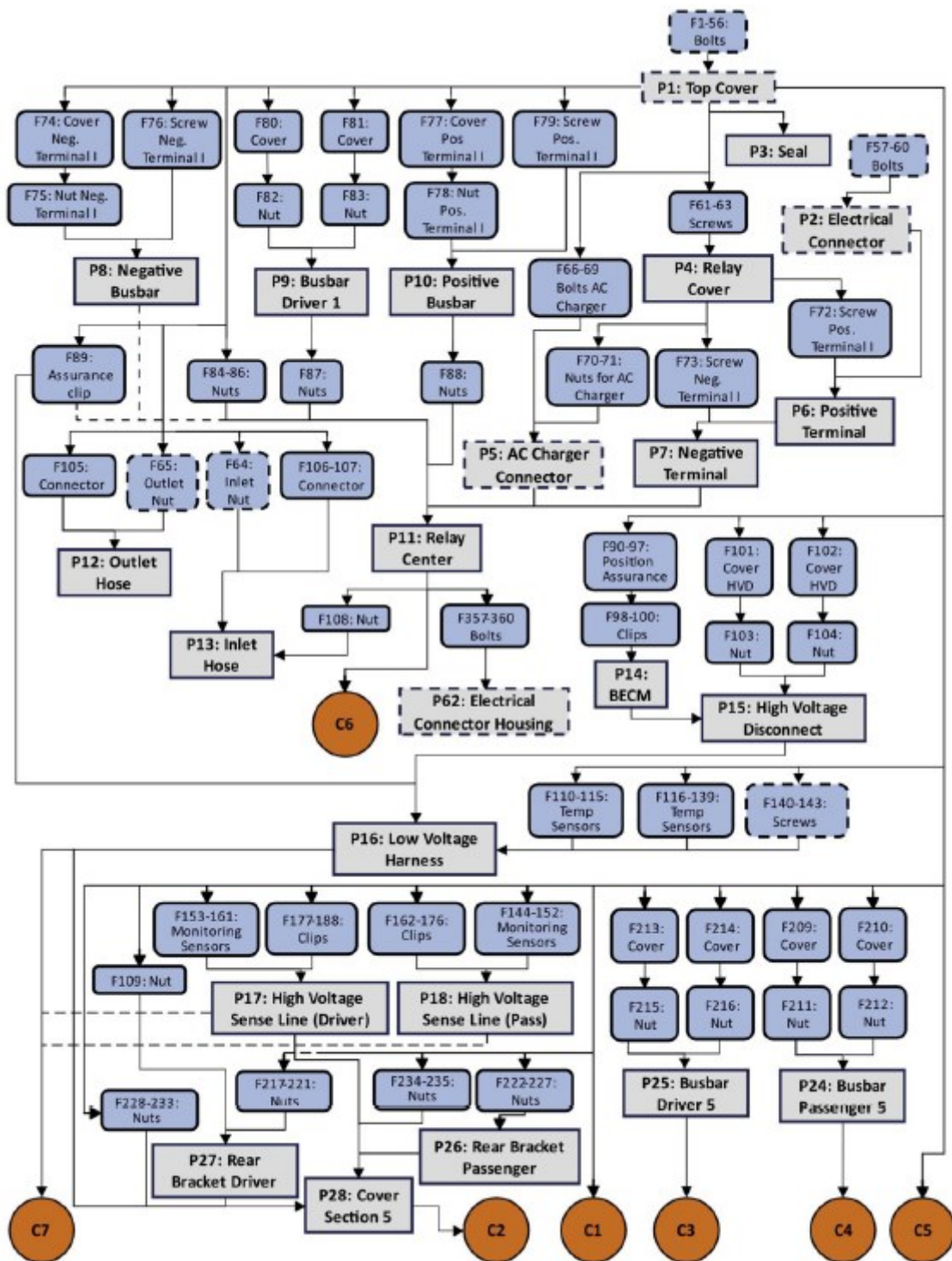


Fig.15: estratto del grafico di disassemblaggio oggetto dello studio sull'elaborazione di un modello di smontaggio di una batteria LIB

Il grafico di disassemblaggio è stato redatto in maniera tale da essere chiaro e da mostrare la direzione dello smontaggio nonché da differenziare in maniera univoca le diverse tipologie di componenti. In particolare nell'estratto del grafico di disassemblaggio mostrato in figura possiamo osservare che le parti sono visualizzate con caselle grigie e gli elementi di fissaggio con caselle blu. Le caselle aventi bordo tratteggiato riportano gli elementi accessibili dalle prime fasi del processo di smontaggio mentre le caselle arancioni indicano la continuazione del processo. Le frecce inoltre mostrano chiaramente la direzione del processo di smontaggio e quindi la successione delle fasi.

Per la determinazione della sequenza di smontaggio si è utilizzato un algoritmo di ricerca operativa impostando parametri tali da ottimizzare l'intero processo col fine di ridurre tempi di smontaggio, cambi di utensile, distanze di percorrenza dei robot e dell'operatore e considerando la possibilità di lavoro in parallelo di uomo e robot. Per riuscire in questa ottimizzazione è stato necessario catalogare le parti simili e comprendere quali di queste potessero essere smontate in un'unica fase.

Dopo la modellazione del grafico è stato possibile analizzare il processo soffermandosi su ogni singola fase per valutarne il potenziale derivante da una sua automazione, quindi, comprendere la necessità di automazione di ogni fase per portare benefici agli operatori oltre che valutarne l'efficienza potenziale e l'apporto che i robot possono dare al processo nel suo complesso, senza trascurare il lato economico. La valutazione si è basata su dieci criteri, che sono stati applicati ad ogni fase, e in base ai quali sono stati attribuiti dei punteggi. Si sono scelti cinque criteri per l'indicatore delle capacità tecniche del processo di smontaggio da automatizzare (TAA) e cinque per la necessità di automatizzazione del processo di smontaggio (NA), tutti riportati nella tabella seguente.

Criterio di categoria	Numero	Descrizione del criterio
	1	Numero di movimenti (umano)
	2	Durata del tempo di smontaggio manuale in secondi
N/A	3	Pericolo (Protezione alta tensione, materiali pericolosi)
	4	Il peso
	5	Priorità (valore)
	1	Complessità del movimento (per robot, numero di movimenti diversi)
TAA	2	Accesso per effettore finale
	3	Possibile rilevamento
	4	Potenziale di automazione per effettore robotico
	5	Movimentazione materiale

Fig.16: criteri di valutazione delle fasi di smontaggio LIB

Al termine del processo si raggruppano quindi tutti i punteggi – o potenziali di automazione – delle diverse fasi dello smontaggio e si redige un grafico che correla i punteggi TAA e NA.

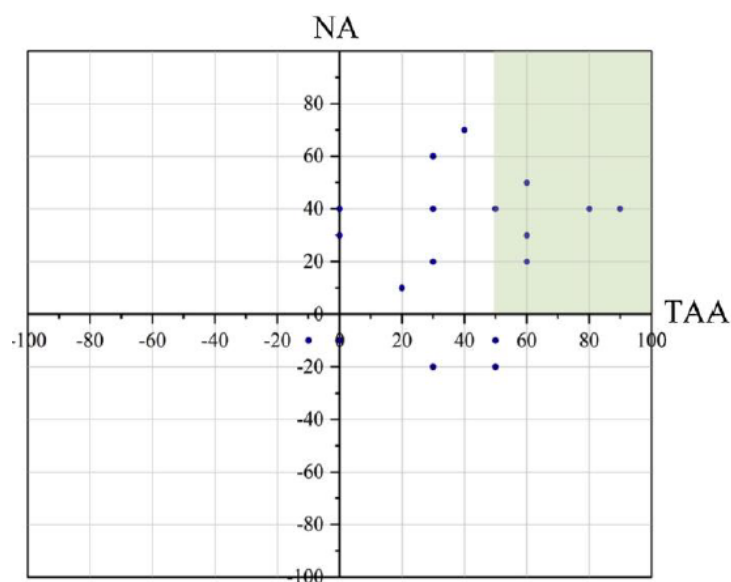


Fig.17: riepilogo punteggi NA e TAA smontaggio batteria HEV

Nel grafico in figura sono evidenziate quelle fasi di smontaggio che hanno avuto punteggi maggiori – nell’area in grigio nella figura sopra – e per le quali, in base al modello di calcolo adoperato nello studio, è consigliata l’automatizzazione massima realizzabile.

Analisi analoghe a quella condotta in questo studio – riferito allo smontaggio della batteria utilizzata su un’auto ibrida (HEV) – sono poi state ripetute anche per lo smontaggio di batterie al litio utilizzate sui veicoli full electric (BEV) e plug-in hybrid (PHEV). I risultati ottenuti mostrano che le potenzialità di automazione per lo smontaggio delle batterie utilizzate per i veicoli ibridi e ibridi plug-in sono molto simili, in quanto anche le batterie stesse presentano architetture, dimensioni e pesi simili. molto differente è invece il potenziale di automazione relativo allo smontaggio delle batterie al litio utilizzate nei veicoli elettrici. Come già accennato le batterie impiegate da questi veicoli sono molto più pesanti e di dimensioni molto maggiori rispetto a quelle impiegate su HEV e PHEV. Inoltre le batterie dei BEV presentano una complessità costruttiva e un numero di parti maggiore rispetto alle altre con la conseguente necessità di un numero maggiore di fasi di smontaggio e a tempi di disassemblaggio più lunghi. La loro complessità poi fa sì che alcune operazioni non siano ripetitive ed altre risultano essere troppo complesse per i robot, pertanto nello smontaggio di batterie per veicoli full-electric

è e sarà ancora necessario l'impiego dell'uomo. Tuttavia i punteggi ottenuti in termini di potenziale di automazione nello smontaggio di batterie destinate ai BEV sono maggiori rispetto a quelli ottenuti per HEV e PHEV. Le maggiori dimensioni, il peso più elevato e il maggior numero di passaggi ripetitivi da eseguire durante lo smontaggio – che rendono lo smontaggio delle batterie per veicoli full-electric molto pesante per l'uomo – dunque, portano a consigliare vivamente di automatizzare tutte le fasi possibili, anche se sono necessari ancora grossi sforzi per ottenere sistemi automatizzati affidabili.

Al termine di questa analisi – osservate le fasi di smontaggio delle diverse batterie al litio impiegate sulle tre differenti categorie di veicoli elettrici ad oggi in commercio e osservate le capacità tecniche in possesso dell'industria – lo smontaggio delle batterie BEV, HEV e PHEV può essere realizzato in maniera ottimale da un sistema automatizzato ibrido uomo-macchina. Le somiglianze tra le batterie BEV, HEV e PHEV suggeriscono anche la possibilità di disassemblaggio di questi tre diversi prodotti nello stesso stabilimento purché siano previste delle stazioni di maggiori dimensioni dedicate allo smontaggio BEV – per le ragioni di cui si è già parlato in precedenza – mentre le batterie HEV e PHEV potrebbero essere disassemblate nelle medesime workstation. Si segnala inoltre che una volta raggiunti i moduli delle batterie tutti possono subire lo stesso processo di smontaggio e quindi essere processati nella stessa linea.

6. Conclusioni

In conclusione si può affermare quindi che l'automazione dei processi di disassemblaggio delle batterie al litio impiegate sui veicoli elettrici mostra un potenziale notevole, ma che tale potenziale non può ancora essere espresso a pieno.

La modalità di smontaggio designata al processo è sicuramente quella ibrida uomo-macchina, emersa dagli studi come la soluzione migliore in termini di efficienza ed efficacia dei processi. Si è evidenziato come questa modalità di smontaggio assicura le migliori prestazioni, garantendo affidabilità e flessibilità durante il processo grazie alla presenza di operatori specializzati. L'obiettivo sarà dunque sviluppare un sistema robotizzato intelligente in grado di affiancare l'uomo e – mediante l'implementazione della intelligenza artificiale e dell'apprendimento automatico – di imparare da esso. Parallelamente allo sviluppo meccanico del sistema di smontaggio è necessario studiare al meglio anche gli aspetti logistici – analisi delle priorità e scelta della migliore sequenza di smontaggio – conservando anche in quest'area il fine della ricerca della maggiore sostenibilità ecologica possibile.

A lungo termine verranno sviluppati sistemi sempre più intelligenti, capaci di risolvere problemi complessi e in grado di operare un processo decisionale in maniera autonoma. Lo sviluppo di queste capacità – grazie alla creazione di nuovi algoritmi e processi computazionali più risoluti – potrà sostituire l'uomo, e quindi escludere la presenza degli operatori dalle linee per lo smontaggio LIB, azzerando così ogni rischio per la salute dell'uomo che si riscontra durante tutto il processo.

Infine lo sviluppo di sistemi di prensione robotici dovrà anch'esso evolversi in maniera sostanziale, il lavoro sarà mirato alla realizzazione di pinze umanoidi. Tali pinze saranno in grado di replicare in termini di movimento e di forze le azioni degli operatori e potranno assicurare uno smontaggio della batteria di qualità anche a livello di cella.

L'ottenimento di uno smontaggio di qualità della batteria al litio sino a livello cellulare permetterà quindi una semplificazione sostanziale del processo di separazione dei materiali che potranno essere riciclati in maniera più diretta ed essere recuperati nella quasi totalità. Il processo di riciclo diverrà quindi più semplice ed economicamente più sostenibile, permettendo una evoluzione anche nel mercato delle materie prime che, con

buone probabilità, si sposterà dalle materie prime vergini alle materie prime riciclate in un lasso di tempo molto ridotto. Tutto il processo andrà quindi a creare la circolarità desiderata garantendo sostenibilità e rispetto per l'ambiente, abbattendo costi ed emissioni di gas tossici, prodotti sia dai processi di estrazione delle materie prime vergini dalle miniere che dal loro trattamento.

La realizzazione di un sistema automatizzato così efficiente quindi, potrà garantire un reale beneficio per l'ambiente. Ottenendo un processo di produzione delle batterie agli ioni di litio circolare, economico ed ecologico che sia all'altezza delle caratteristiche green e della quantità minima di emissioni di gas nocivi prodotta dai veicoli elettrici e ibridi in commercio. Lo sviluppo di sistemi di smontaggio all'altezza degli standard è quindi fondamentale per amplificare i benefici derivanti mobilità elettrica e non vanificare i contributi alla lotta alle emissioni di gas serra prodotti dall'impiego di veicoli elettrici.

BIBLIOGRAFIA

- I** Smontaggio intelligente delle batterie dei veicoli elettrici: una panoramica lungimirante.
Kai Meng, Guiyin Xu, Xianghui Peng, Kamal Youcef-Toumi, Ju Li
- II** Valutazione del potenziale di automazione dello smontaggio delle batterie dei veicoli elettrici.
Juan F. Hellmuth, Nicholas M. Di Filippo, Musa K. Jouaneh
- III** Ottimizzazione multi obiettivo per lo smontaggio a livello di cella dei moduli della batteria esausta in modalità ibrida uomo-macchina.
Tengfei Wu, Zequiang Zhang, Tao Yin, Yu Zhang
- IV** Valutazione dei metodi e dei processi di riciclaggio delle batterie agli ioni di litio.
Minghui Tang, Yaqi Peng, Shengyong Lu, Lingxia Zheng, Zhefei Zhao, Aigang Zhen
- V** Una rassegna dei processi fisici utilizzati nel riciclaggio sicuro del litio.
James Shaw Stewart, Vanessa Benedetta, Neil Rowson, Emma Kendrick
- VI** Elaborazione e produzione di batterie allo stato solido di nuova generazione a base di litio.
Wahid Zaman, Kelsey B. Hatzel
- VII** Batteria semi-solida al litio/flusso di ossigeno: una tecnologia emergente ad alta energia.
Francesca Soavi, Alessandro Brilloni, Francesca De Giorgio, Federico Poli
- VIII** Opzioni di fine vita e seconda vita per le batterie dei veicoli elettrici.
Juner Zhu, Ian Mathews, Dongsheng Ren, Wei Li, Daniel Cogswell, Bobin Xing, Tobias Sedlatschek, Sai Kantareddy, Mengchao Yi, Tao Gao, Yong Xia, Quing Zhou, Tomas Wierzbicki, Martin Bazant
- IX** Valutazione delle batterie di veicoli elettrici a fine vita: scenari futuri e vantaggi economici.
Songyan Jiang, Ling Zhang, Hui Hua, Xuwei Liu, Huijiun Wu, Zengwei Yuan
- X** The Disassembly Map: un nuovo metodo per migliorare il design per la riparabilità del prodotto.
Francesco De Fazio, Conny Baker, Basso Flipsen, Ruud Balkenende

XI I principi di progettazione per lo smontaggio sono vantaggiosi per l'ambiente quando applicato alle installazioni espositive temporanee?

Sara Tonioloj, Daniela Camana, Angelica Guidolin, Filippo Aguiari, Antonio Scipioni

XII Batteria a flusso semi-solido e batteria a flusso mediato redox: due strategie per implementare l'uso di materiali elettroattivi solidi nelle batterie a flusso redox ad alta energia.

Edgar Ventosa

RINGRAZIAMENTI

Desidero ringraziare sinceramente il relatore Prof. Ing. Filippo Emanuele Ciarapica per avermi seguito nella stesura di questo elaborato.

Ringrazio i miei genitori Gino e Tiziana, per tutti gli sforzi e per il grande ed ininterrotto sostegno durante questi anni.

Ringrazio mio fratello Stefano: la mia spalla più forte; mia cognata Ludovica e mio nipote Mattia: motivazione ulteriore a far sempre meglio.

Grazie ai miei compagni tutti. In particolare desidero ringraziare Martina, Clara, Lucia, Michele, Massimiliano, Raffaele, Nicola, Shadman, Rocco e Alessandro per tutto ciò che abbiamo condiviso durante questo percorso. Per certo la parte migliore del viaggio e sicuramente l'unica buona giustificazione al mio fuori corso.

Ringrazio Federica, distante ma sempre presente.

Ringrazio tutti coloro che hanno contribuito a rendere piacevole questo percorso di studi, confortandomi quando ne avevo bisogno e che, per non dilungarmi eccessivamente, non posso citare personalmente.