



Università
Ca'Foscari
Venezia

Corso di Laurea magistrale in
Economia e gestione delle aziende

Tesi di Laurea

Il ruolo dell'economia circolare nella transizione verso la mobilità elettrica

Relatore

Prof. Francesco Zirpoli

Laureando

Damiano Gomiero

Matricola 859004

Anno Accademico

2019/2020

Ringraziamenti

Desidero ringraziare innanzitutto il relatore di questa tesi, il professor Francesco Zirpoli, per la disponibilità, l'attenzione e la gentilezza dimostrata, nonché per avermi trasmesso la passione e l'interesse verso la mobilità e l'industry dell'automotive.

Un grande ringraziamento poi va ai miei genitori e mia sorella per il continuo sostegno, morale ed economico, lungo questo percorso di crescita formativa e personale. Ringrazio poi tutta la mia famiglia, dai nonni, zii, cugine e cugini.

Un grazie sincero a tutti i miei compagni di corso e in particolare quelli con cui ho stretto un legame di amicizia: Andrea, Benedetta, Elena, Elisabetta, Filippo, Nicola, Noemi, Stefano. Mi avete aiutato a trascorrere due anni splendidi e che ricorderò per sempre.

Infine, ultimi ma non meno importanti, ringrazio tutti i miei amici, dalla compagnia di Torreglia fino agli amici più stretti, in particolare: Alessia, Antonio, Clara, Chiara, Federica, Filippo, Giacomo, Gioia, Rachele, Sara.

Indice

Introduzione	pag. 3
---------------------------	--------

Domanda di ricerca.....	pag. 4
Articolazione del lavoro e metodologia.....	pag. 4

Capitolo 1 – Aspetti teorici e cenni di economia circolare

1.1	Aspetti teorici.....	pag. 6
1.1.1	Introduzione.....	pag. 6
1.1.2	Teoria sull'innovazione.....	pag. 7
1.1.2.1	Le 4 dimensioni dell'innovazione.....	pag. 8
1.1.2.2	Auto elettrica: innovazione sistemica e radicale.....	pag. 9
1.1.3	Teoria delle transizioni.....	pag. 10
1.1.3.1	Analisi delle transizioni.....	pag. 11
1.1.3.1.1	Le fonti di stabilità del regime automobilistico.....	pag. 15
1.2	Cenni di economia circolare.....	pag. 19
1.2.1	Insostenibilità del modello lineare e passaggio alla circolarità....	pag. 19
1.2.2	Concetti di economia circolare.....	pag. 21
1.2.2.1	I nutrienti biologici e tecnici.....	pag. 22
1.2.2.2	I principi dell'economia circolare.....	pag. 24
1.2.2.3	La creazione di valore nell'economia circolare.....	pag. 25
1.2.2.4	L'importanza dei business model circolari.....	pag. 26

Capitolo 2 – L'adozione degli EV e l'economia circolare nell'industria dell'auto

2.1	L'adozione degli EV.....	pag. 29
2.1.1	Introduzione.....	pag. 29
2.1.2	Caratteristiche e tipi di EV.....	pag. 29
2.1.3	Diffusione e mercato degli EV.....	pag. 31
2.1.4	Benefici della mobilità elettrica.....	pag. 34
2.1.5	Fattori critici della mobilità elettrica.....	pag. 41
2.1.5.1	Barriere di adozione degli EV.....	pag. 42
2.1.5.2	Implicazioni energetiche ed ambientali.....	pag. 46
2.1.5.2.1	Modello LCA.....	pag. 47
2.1.5.2.2	Confronto EV e ICEV.....	pag. 48
2.2	L'economia circolare nell'industria dell'auto.....	pag. 59

Capitolo 3 – Panoramica generale sulle LIB

3.1	Introduzione alle batterie a ioni di litio.....	pag. 63
3.2	Funzionamento e composizione delle LIB.....	pag. 64
3.3	Tipologie di LIB.....	pag. 66
3.3.1	Valore economico e approvvigionamento dei materiali.....	pag. 69
3.4	Produzione delle LIB.....	pag. 72
3.4.1	Costi di produzione.....	pag. 75
3.4.2	Impatto ambientale produzione.....	pag. 76

Capitolo 4 – End-of-Life delle LIB

4.1	End-of-Life LIB.....	pag. 78
4.1.1	Riciclo delle LIB.....	pag. 80
4.1.1.1	Il mercato del riciclo.....	pag. 81
4.1.1.2	Processi di riciclo.....	pag. 82
4.1.1.2.1	Player nel riciclo.....	pag. 85
4.1.1.3	Barriere del riciclo.....	pag. 87
4.1.1.4	Impatti ambientali.....	pag. 91
4.1.2	Riutilizzo e Second Life.....	pag. 92
4.1.2.1	Applicazioni del Second Life.....	pag. 94
4.1.2.2	Benefici del Second Life.....	pag. 97
4.1.2.3	Barriere al Second Life.....	pag. 98
4.2	Le sfide nella circolarità delle LIB.....	pag. 100

Capitolo 5 – Discussione della domanda di ricerca e conclusione

5.1	Discussione della domanda di ricerca e conclusione.....	pag. 108
-----	---	----------

Bibliografia	pag. 114
---------------------------	----------

Sitografia	pag. 122
-------------------------	----------

Introduzione

Con l'inizio del nuovo decennio, i produttori di automobili e l'intero settore automobilistico sono chiamati a far fronte alle sfide e all'incertezza che si presenteranno nei prossimi anni. Le crescenti preoccupazioni in termini di emissioni di GHG (*Green House Gas*) e di altri inquinanti pongono l'industria automotive in una posizione di assoluto protagonismo. Infatti, secondo diversi studi, il trasporto su strada genera circa il 30% delle emissioni di CO₂ nell'aria, oltre a generare altri inquinanti atmosferici tossici per la salute umana.

A più di 100 anni dalla rivoluzionaria innovazione di Henry Ford, il quale ha permesso di produrre e distribuire in massa le automobili a motore termico, il settore automobilistico necessita di un nuovo e profondo cambiamento collegato all'esigenza di ridurre l'impatto ambientale dei veicoli su strada.

In questo contesto di radicale cambiamento, l'elettrificazione dei veicoli potrebbe rappresentare la soluzione per raggiungere gli obiettivi e le sfide ambientali imposte al settore automobilistico, in quanto non avendo un motore a combustione, non emettono gas inquinanti dal tubo di scarico. Tuttavia, l'attuale transizione verso questa tecnologia risulta ancora lenta e graduale, sebbene i veicoli elettrici siano in commercio già da diversi anni. A questo punto è naturale porsi alcuni interrogativi, come per esempio, quali siano i fattori chiave che limitano la transizione tecnologica e quali sono i fattori che invece potrebbero favorirla. Inoltre, attorno alla tecnologia elettrica ruotano ulteriori perplessità e fonti di incertezza. Siamo così sicuri che le auto elettriche inquinino meno rispetto alle auto tradizionali? In una logica di sostenibilità, l'impatto ambientale di un prodotto deve essere valutato in ogni fase del suo ciclo di vita. Questo significa che per considerare l'impatto di produzione dei veicoli elettrici occorre analizzare tutte le fasi che coinvolgono la loro produzione, dall'estrazione delle materie prime fino alla fase di fine vita del veicolo. Attraverso l'analisi LCA (*Life Cycle Assessment*) si scoprirà che il ciclo di vita di un veicolo elettrico potrebbe non essere poi così green, poiché nella valutazione di impatto ambientale entrano in gioco diverse variabili. In particolare, in questo elaborato ci si concentrerà sulla fase di fine vita dei veicoli elettrici, ovvero, nella fase nel quale ci si occupa di smaltire correttamente le batterie esauste. Come vedremo nei prossimi capitoli, l'unica prospettiva che ha il potenziale di gestire in maniera sostenibile ed efficiente il fine vita delle batterie è la prospettiva di economia circolare.

Domanda di ricerca

Questo elaborato intende trattare il tema della transizione tecnologica della mobilità elettrica, cercando di comprendere le dinamiche e gli sviluppi di questa tecnologia e di evidenziare quali sono i problemi e le barriere più importanti che limitano e frenano il loro processo di adozione. Per questi motivi, l'autore dell'elaborato cerca di rispondere alla seguente domanda di ricerca:

“Qual è il ruolo degli strumenti e delle pratiche di economia circolare nel campo delle batterie a litio nella transizione verso la mobilità elettrica? E in che modo possono incrementare o accelerare il tasso di adozione e diffusione dei veicoli elettrici?”

La seguente domanda di ricerca è stata formulata dopo aver revisionato in modo approfondito lo stato dell'arte nel campo delle auto elettriche e dell'economia circolare delle batterie a litio. In letteratura non è ancora stata data una risposta precisa sull'argomento, motivo per cui l'autore ritiene che la tesi possa avere carattere innovativo.

Articolazione del lavoro e metodologia

Il presente lavoro di tesi è strutturato in cinque capitoli. Nel capitolo 1 saranno presentati i principali aspetti teorici riguardanti le innovazioni e le transizioni. Inoltre, saranno presentati i fondamenti e i concetti più importanti dell'approccio di economia circolare. Nel capitolo 2 saranno illustrate in maniera dettagliata le caratteristiche e le tipologie di veicoli elettrici, il loro mercato e la loro diffusione. Parte fondamentale del capitolo sarà quella relativa ai benefici e ai fattori critici della mobilità elettrica. All'interno dei fattori critici saranno presentate anche le implicazioni ambientali ed energetiche delle auto elettriche, mediante un'analisi LCA che andrà a confrontare veicoli elettrici e veicoli tradizionali. Infine, nella parte finale del secondo capitolo si illustrerà brevemente il tema dell'economia circolare nell'industria dell'auto. Successivamente, il capitolo 3 introdurrà le batterie a litio (LIB) e tutti gli aspetti connessi. Nel capitolo 4 saranno presentate le tematiche collegate al fine vita delle batterie a litio e saranno presentati i principali strumenti di economia circolare. Si tratta di un capitolo essenziale ai fini dell'elaborato, poiché fornisce gli elementi per poter rispondere al quesito di ricerca. Infatti, in questo capitolo saranno presentate tutte le differenti tipologie di riciclo e riutilizzo con i loro benefici e problemi. Nel capitolo conclusivo l'autore dell'elaborato cercherà di rispondere

alla domanda di ricerca esponendo il proprio punto di vista alla luce della letteratura e dello stato dell'arte.

Per quanto concerne la metodologia adottata per rispondere al quesito di ricerca, si prevedono due approcci: 1) revisione della letteratura e dello stato dell'arte, poiché è fondamentale definire i confini di analisi e approfondire il contesto dell'argomento; 2) revisione delle fonti secondarie, poiché dove la letteratura non è in grado di fornire informazioni e dati relativi agli argomenti trattati, è fondamentale impiegare fonti di carattere secondario, quali white paper e report aziendali.

CAPITOLO 1 – Transizione verso la mobilità elettrica

1.1 Aspetti teorici

1.1.1 Introduzione

A fronte delle crescenti preoccupazioni per il riscaldamento globale e il cambiamento climatico, lo sviluppo sostenibile diventa il nuovo paradigma attraverso cui ispirare la strategia aziendale; ciò implica trovare un equilibrio fra le diverse dimensioni: economica, ambientale e sociale. La sostenibilità non deve essere realizzata solo come opportunità competitiva, ma anche come responsabilità che contraddistingue l'azienda nel contesto socio-economico di riferimento.

In questo contesto, il settore automobilistico sta attraversando un profondo cambiamento, dovuto ad una maggiore consapevolezza critica dei consumatori e un'evoluzione della normativa vigente in materia di emissioni di gas inquinanti e CO₂. Questo insieme di fattori impongono all'industria automobilistica un cambiamento radicale improntato verso la mobilità sostenibile e verso una nuova concezione del ruolo dell'auto.

Il cambiamento viene spesso associato al concetto di innovazione tecnologica, la quale è diventata la chiave per ottenere vantaggi competitivi e di conseguenza mantenere e acquisire posizioni di leadership nel mercato. In questo momento, l'Electric Vehicle, che chiameremo d'ora in poi con l'acronimo di "EV", rappresenta per le imprese dell'industria automobilistica il mezzo per il raggiungimento dei vantaggi competitivi. Il percorso di un'innovazione tecnologica nel tempo è definito come "traiettoria tecnologica". Spesso si ricorre a questo concetto per rappresentare il miglioramento delle performance di una determinata tecnologia o il suo processo di adozione da parte del mercato. Sebbene queste traiettorie possano essere influenzate da molteplici fattori, è possibile identificare una serie di modelli e teorie che si ritrovano in una varietà di contesti settoriali e in epoche differenti (Schilling et al., 2019)

La transizione tecnologia verso la mobilità elettrica non è semplice. L'auto tradizionale (benzina e diesel) domina il mercato da oltre cento anni ed è ben radicata nella nostra società. Il processo di cambiamento avverrà solo attraverso un coinvolgimento di tutti gli

attori del sistema, dai produttori di veicoli ai loro fornitori, fino ad arrivare all'intera struttura necessaria per gestire, progettare e costruire sistemi di mobilità innovativi.

Questo capitolo si apre con una rassegna delle principali teorie sull'innovazione, sulle sue caratteristiche e forme. Nell'ultima parte verranno presentate le teorie sulle transizioni, in particolar modo la prospettiva multilivello e il ruolo del regime automobilistico nell'attuale contesto.

1.1.2 Teoria sull'innovazione

Uno dei più importanti pionieri del XX° secolo in materia di innovazione è stato Joseph Schumpeter, economista austriaco che ha posto al centro dei propri studi proprio questi concetti. Secondo Schumpeter, l'innovazione può essere definita come una prima introduzione nel sistema economico e sociale di un prodotto, procedimento o sistema. In questa definizione è previsto il passaggio da un primo stadio di idea ad un secondo di applicazione concreta. Questo passaggio tra primo e secondo stadio risulta essere oneroso in termini sia monetari che di tempo.

L'economista sosteneva che l'innovazione dovesse nascere da un "imprenditore innovatore", ovvero, una persona in grado di gestire e organizzare allo stesso tempo diversi fattori e combinare le competenze, conoscenze e le risorse per trasformare un'invenzione in una innovazione.

Secondo Schumpeter, l'innovazione poteva essere di cinque tipologie diverse: 1) di nuovi prodotti, 2) di nuovi metodi di produzione (processo), 3) di apertura a nuovi mercati, 4) di nuove fonti di approvvigionamento, 5) di organizzazione dell'impresa. I suoi studi si concentrarono in particolar modo sulle prime due, cioè, sui nuovi prodotti e sui nuovi metodi di produzione. Anche l'economista americano Schmookler (1966) va a distinguere le innovazioni di prodotto e le innovazioni di processo. Da un punto di vista economico e sociale, l'innovazione di prodotto può avere un effetto positivo sia sui consumi che sull'occupazione, di contro, l'innovazione di processo può avere effetti ambigui in quanto lo rende più efficiente da un punto di vista di costi.

La definizione schumpeteriana sosteneva che l'innovazione, una volta ottenuto successo, passasse alla fase della diffusione, ovvero, lo stadio nel quale l'innovazione viene imitata e adottata da altre imprese concorrenti. Secondo Schumpeter, le imprese imitatrici assumevano un ruolo di semplici gestori di routine. Recentemente, questa definizione è stata oggetto di critiche, in quanto si è sostenuto che la fase di diffusione non assume un

ruolo passivo, nel quale si profitta di una scoperta, ma implica ulteriori innovazioni che vanno a migliorare e perfezionare il prodotto, i suoi processi, fino quasi a renderlo irriconoscibile. Ad esempio, i calcolatori nati negli anni '90 non avevano nulla a che vedere con quelli utilizzati durante la Seconda guerra mondiale. Lo stesso Schumpeter accettava quest'idea quando affermava che "l'automobile non avrebbe assunto l'importanza odierna e non sarebbe divenuta un fattore così potente di mutamento della nostra vita se fosse rimasta com'era trent'anni fa e non avesse modificato le condizioni ambientali per favorire il proprio sviluppo" (v. Schumpeter, 1939, p. 167).

1.1.2.1 Le 4 dimensioni dell'innovazione

In letteratura le innovazioni tecnologiche possono essere classificate su quattro dimensioni diverse: 1) natura dell'innovazione; 2) intensità e grado di ampiezza; 3) dall'effetto esercitato sulle competenze; 4) dal suo ambito di destinazione (Schilling et al., 2019).

La classificazione dell'innovazione basata sulla natura l'abbiamo già incontrata nei paragrafi precedenti. Si tratta della distinzione tra **innovazioni di prodotto** e **innovazioni di processo**. Per le prime si tratta di un'innovazione incorporata nei beni e nei servizi realizzati dall'impresa. Ad esempio, lo sviluppo di nuovo veicolo ibrido a motore elettrico da parte di Honda. Le innovazioni di processo sono invece dei mutamenti nelle modalità in cui un'impresa svolge le sue attività, come ad esempio, le sue tecniche di produzione. Un esempio è la catena di montaggio introdotta da Henry Ford nei primi anni del '900. Spesso le innovazioni di prodotto e di processo sono simultanee e fra loro collegate. Un nuovo processo può consentire la realizzazione di nuovi processi e nuovi prodotti possono determinare lo sviluppo di nuovi processi. Sebbene le innovazioni di prodotto siano spesso più visibili di quelle di processo, entrambe le tipologie rivestono un'importanza fondamentale per sostenere la competitività di un'impresa.

Un'altra classificazione fa riferimento all'intensità e al grado di ampiezza dell'innovazione. In questo caso si distinguono le **innovazioni radicali** e le **innovazioni incrementali**, che nella maggior parte dei casi si basano sulla distanza dell'innovazione da un prodotto o processo preesistente. Le innovazioni radicali si caratterizzano per discontinuità e si riferiscono ai quei prodotti o processi completamente nuovi e che vanno a ribaltare le dinamiche di mercato e i suoi player. Esse prevedono l'implementazione di una tecnologia che l'impresa non possiede. Il classico esempio è internet, il quale ha

completamente stravolto o rivoluzionato il canale della comunicazione. Il termine innovazione incrementale è stato coniato la prima volta da Freeman (1982) e si riferisce ad un sostanziale miglioramento di un prodotto o processo già esistente. L'innovazione incrementale è continua, sviluppa paradigmi preesistenti e va ad aumentare la produttività ed efficienza di tutti i fattori di produzione. Ne possono essere un esempio il lancio di nuovi microprocessori o l'ultima versione di un sistema operativo di uno smartphone.

La terza dimensione riguarda l'effetto che l'innovazione può avere sulle competenze. Distinguiamo **innovazioni competence enhancing** e **innovazioni competence destroying**. Le prime consistono in un'evoluzione della base di conoscenze preesistenti. In questa prospettiva si fa dunque leva sul patrimonio di conoscenze già possedute, con il fine creare maggior valore. Le competence destroying al contrario, nascono quando una tecnologia non si basa su competenze già possedute.

Infine, per comprendere a pieno l'ultima dimensione occorre tenere in considerazione che la maggior parte dei prodotti e processi è un sistema nidificato, ovvero, un sistema composto da più insiemi di componenti. Proprio per questi motivi un'innovazione può riguardare la modifica di singoli componenti oppure la struttura generale. Si vanno così a distinguere le **innovazioni modulari**, che prevedono il cambiamento di uno o più componenti senza compromettere l'intera struttura generale, e le **innovazioni architetturali** che consistono nel cambiamento della struttura generale del sistema o del modo in cui i componenti interagiscono fra loro.

1.1.2.2 Auto elettrica: innovazione sistemica e radicale

Quando si parla di innovazioni è importante andare a sottolineare l'importanza dei brevetti. Si dice infatti che i brevetti stimolino i processi innovativi. Tuttavia, alcuni studi dimostrano come il processo di innovazione sia passato da un approccio lineare ad uno sistemico (Rothwell, 1994). Se in passato la tendenza era quella di generare il processo innovativo tra le mura aziendali e custodirlo mediante meccanismi di brevetto, al giorno d'oggi l'inventore solitario sta tendendo a scomparire, mostrando una più ampia apertura verso l'esterno. L'introduzione nell'economia delle innovazioni sistemiche enfatizza gli aspetti collaborativi che permettono la creazione di relazioni con soggetti interni ed esterni all'impresa. Si parla in questi casi di "*open innovation*". In alcuni casi, l'attribuzione

dei diritti di proprietà mediante brevetto non è lo strumento più efficace per la diffusione di un prodotto nel mercato.

Per esempio, Tesla Motors nel 2014, dopo il discorso tenuto dal suo CEO Elon Musk – “*All our patent are belong to you*” – ha deciso di mettere a disposizione di tutti il proprio patrimonio brevettuale. I suoi più importanti brevetti sono stati utilizzati da molteplici aziende, quali GM, Volkswagen, Mitsubishi e Bosch. Lo scopo di Tesla è quello di rafforzare la diffusione delle auto elettriche cercando di imporre uno standard comune e di ottenere i vantaggi derivanti dalla condivisione delle conoscenze. Seguendo le orme di Tesla, nel 2015 anche Ford ha annunciato di rendere disponibili i brevetti riguardanti le tecnologie degli EV.

Possiamo affermare che l'auto elettrica possiede le caratteristiche di una innovazione sistemica, in quanto sono evidenti i forti vincoli al suo sviluppo determinati dalla necessità di una collaborazione più aperta e di investimenti complementari. Un altro aspetto che rafforza questa tesi è il maggior coinvolgimento di più aree scientifiche rispetto alla produzione delle auto tradizionali. L'auto elettrica appare come una innovazione che trae beneficio da una molteplicità di player, poiché nessun attore è in grado di dominare totalmente tutte le competenze tecnologiche ed organizzative necessarie allo sviluppo delle nuove tecnologie (Enrietti et al., 2010).

L'auto elettrica può essere definita come innovazione radicale, poiché va ad imporre un breakthrough tecnologico e comporta agli *incumbents* molte sfide e costi da sostenere per la transizione verso il nuovo sistema (Capellari, 2015) Tuttavia, se da un lato l'auto elettrica è vista come una innovazione radicale che fa leva su modelli di business esistenti, dall'altro può essere identificata come “*disruptive innovation*” (Christensen, 1997), in grado di provocare una rottura con il passato nella struttura dell'impresa, nella sua supply chain e nel suo modello di business. Per evitare che l'innovazione impatti in maniera eccessiva sul modello di business e sugli investimenti in atto, le case automobilistiche tendono ad incorporare strategie che rendano i veicoli elettrici il più possibile simili ai veicoli tradizionali.

1.1.3 Teoria delle transizioni

Se ripercorriamo la storia dell'uomo possiamo osservare che ogni società ha dovuto affrontare nel corso dei secoli problemi di varia natura. La nascita di questi problemi ha portato un profondo cambiamento della vita e della socialità delle persone. Queste

criticità tal volta risultano essere complicate, non strutturate, circondate da incertezza e profondamente radicate nelle nostre istituzioni e strutture sociali. La loro soluzione richiede spesso una revisione dei processi di sviluppo e delle istituzioni che sono state costruite per gestirle. Allo scopo di risolvere questi persistenti problemi sociali, sono necessarie trasformazioni strutturali o delle transizioni.

Una transizione è definita, in un concetto più ampio, come un processo di cambiamento di una società o un sottoinsieme di società (Rotmans et al., 2000). Una transizione può agire su diversi ambiti, di natura scientifica, tecnologica e sociale. Una transizione di tipo sociale ha come obiettivo il cambiamento di un sistema socio-tecnico, il quale può essere definito come l'insieme di elementi distintivi che caratterizzano una società, come per esempio, le tecnologie consolidate, le regole, i modi di fare, abitudini culturali e di mercato, infrastrutture e via dicendo.

Quando si parla di transizione verso una mobilità sostenibile si fa riferimento ad un concetto più ampio che va al di là della semplice riduzione delle emissioni di inquinamento e richiede un approccio di sistema che porti ad un cambiamento radicale e che coinvolge l'intero sistema sociale ed economico. Il trasporto nel suo complesso può essere identificato come un sistema socio-tecnico che svolge una funzione di tipo sociale (Geels, 2005). Nella società contemporanea il trasporto è dominato dall'auto, che a sua volta pone l'industria automobilistica al centro dell'intero sistema socio-tecnico dei trasporti. Pertanto, è facile capire come una transizione in ambito automobilistico possa avere ripercussioni sull'intero sistema sociale e sui comportamenti degli stessi consumatori.

1.1.3.1 Analisi delle transizioni

Il processo di cambiamento nelle transizioni è di tipo non lineare. Il cambiamento lento può essere seguito da uno rapido e viceversa. Il meccanismo sottostante è quello di co-evoluzione, in quanto i diversi sottosistemi co-evolvono fra loro, portando a modelli irreversibili di cambiamento. Di conseguenza, una transizione diventa il frutto di sviluppi in diversi domini. In altri termini, una transizione può essere definita come un insieme di cambiamenti connessi che hanno luogo in differenti aree, come ad esempio, la tecnologia, l'economia, le istituzioni, la cultura.

In letteratura le transizioni sono analizzate sotto due punti di vista: concetto multi-fase (*Multi-phase concept*) e prospettiva multi-livello (*Multi-level perspective*).

Concetto multi-fase

Il concetto multi-fase individua quattro fasi di una transizione (Rotmans et al., 2001). In particolare:

1. Fase di pre-sviluppo: è la fase caratterizzata da un sostanziale equilibrio senza grosse variazioni dello status quo;
2. Fase di decollo: è la fase iniziale del processo di cambiamento in cui il sistema incomincia a spostarsi;
3. Fase rivoluzionaria: è la fase dove si manifestano i cambiamenti strutturali, mediante comportamenti economici, socio-culturali, ecologici e ambientali e dove interagiscono fra di loro. Questa fase è caratterizzata da una forte accelerazione, dovuta a processi di apprendimento e di incorporazione;
4. Fase di stabilizzazione: è la fase in cui il cambiamento subisce una progressiva diminuzione di velocità e tende a stabilizzarsi nuovamente in nuovo equilibrio dinamico.

Va specificato che le fasi di accelerazione e di velocità assumono un significato relativo, in quanto tutte le transizioni contengono periodi di sviluppo lento e veloce. Una transizione, nonostante preveda un cambiamento dell'equilibrio, risulta essere graduale e non un cambiamento rapido. Abbiamo già detto che le transizioni sono caratterizzate dalla non linearità. Durante la fase di crescita, l'accelerazione nel cambiamento è il risultato di meccanismi di feedback che si rafforzano reciprocamente nel sistema. In generale, una transizione prevede tre dimensioni sistemiche:

- La velocità del cambiamento (*Speed*)
- La dimensione del cambiamento (*Size*)
- Il lasso di tempo del cambiamento (*Time period*)

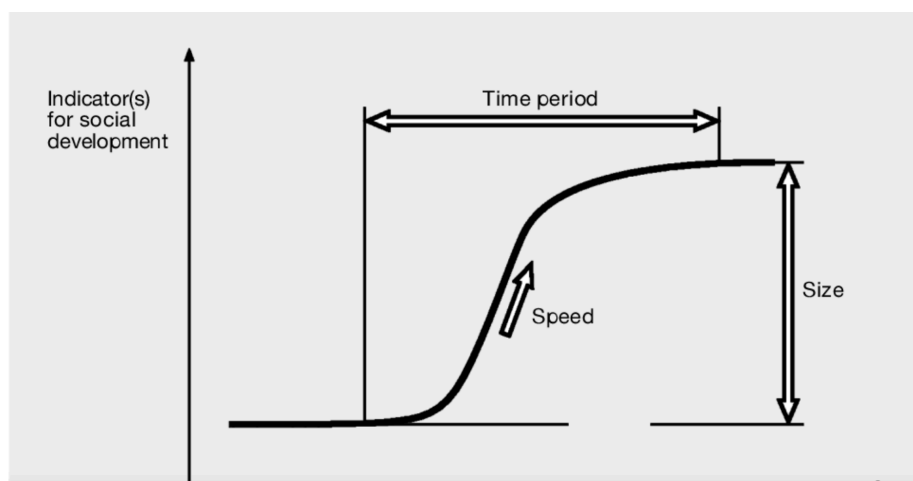


Figura 1 – Le tre dimensioni di una transizione

Prospettiva multi-livello

Il concetto di transizione può essere applicato in più livelli aggregati, come aziende, settori, nazioni e regioni (Rotmans et al., 2001). In termini di organizzazione sociale, possiamo distinguere tre diversi livelli: micro, meso e macro. Il livello micro comprende individui o singoli attori. Il livello meso comprende reti, comunità e organizzazioni, mentre il livello macro comprende un insieme di istituzioni e organizzazioni, come ad esempio nazioni o federazioni di stati (es: UE). Questa suddivisione si può adattare ad alcune classificazioni utilizzate per descrivere i cambiamenti nei sistemi socio-tecnici (Rip et al., 1998). In particolare, il livello micro veniva associato alle nicchie, il livello meso ai regimi e il livello macro al paesaggio. Analizzando più nel dettaglio questi tre livelli:

- Paesaggio: ci si riferisce a l'insieme di elementi materiali ed immateriali che costituiscono il livello macro. Ad esempio, infrastrutture, cultura politica, valori sociali, macroeconomia, demografia.
- Regime: riguarda un insieme di regole, assunzioni, pratiche dominanti. Questo insieme di regole e credenze guidano le azioni e i comportamenti privati e di politica pubblica di un contesto di riferimento.
- Nicchia: si riferisce a singoli attori e tecnologie che si scostano dalle regole e dalle pratiche a livello di regime. A questo livello si manifestano quei fenomeni di cambiamento dello *status quo*, dai quali possono derivare tecnologie alternative e nuove pratiche sociali.

La prospettiva multilivello presuppone che ogni livello sia connesso all'altro, in una sorta di relazione causa effetto. I cambiamenti a livello di paesaggio possono riflettersi a livello di regime e così via.

Tendenzialmente il livello meso e macro sono caratterizzati da una certa stabilità. Al contrario, è nel livello micro che si manifestano i cambiamenti che possono generare la nascita di nuove innovazioni di tipo tecnologico, comportamentale, istituzionale ecc. Successivamente, queste innovazioni emergeranno solo se si stabilizzano in un disegno dominante intorno al quale si attuano processi di apprendimento. Tuttavia, non sempre la fase di decollo di un cambiamento parte dal livello di nicchia, può infatti essere stimolato anche dai livelli meso e macro.

A livello di regime il cambiamento è provocato a seguito di conflitti interni o pressioni esterne che scaturiscono dal livello di nicchia. Quando si manifesta una transizione socio-tecnica, il livello di regime può agire adottando diversi approcci: un approccio difensivo

cercando di screditare gli altri attori, un approccio reattivo migliorando le tecnologie esistenti e infine, un approccio innovativo contribuendo attivamente alla transizione. Spesso nella prima fase della transizione il regime gioca un ruolo di inibitore, vale a dire che cercherà di impiegare azioni strategiche per contrastare le nuove tecnologie. Nel momento in cui la tecnologia emerge e presenta un potenziale carattere dominante, il regime cambia ruolo trasformandosi in un sostenitore del cambiamento attraverso grosse quantità di capitale investito.

Per quanto riguarda l'industria automobilistica possiamo assegnare al livello di paesaggio elementi quali, l'infrastruttura stradale, l'utilizzo del petrolio come fonte energetica, il paradigma di possesso di un bene piuttosto che di utilizzo. Il livello di regime invece inquadra tutti gli attori del sistema, quindi non solo i principali produttori, ma anche i fornitori, i rivenditori in franchising e indipendenti, le regole legali e normative che disciplinano la progettazione l'utilizzo dell'auto, il suo riciclaggio e così via. Infine, il livello micro comprende tutte quelle nicchie di prodotto che possono essere distinte per segmenti di mercato, geografia e tecnologia, oppure i casi di sperimentazione socio-tecnica e le attività imprenditoriali che cercano di emergere nel contesto di regime.

Abbiamo già affermato che la peculiarità del paesaggio e del regime è la loro stabilità. Quando un contesto è caratterizzato da un certo grado di continuità è necessario identificare quali sono le caratteristiche che hanno consentito al regime di sopravvivere. Sia gli investimenti fisici sia le norme di comportamento rafforzano la stabilità di un regime rendendo più difficile il decollo di una transizione. Alcuni elementi di un regime possono essere estremamente duraturi, come ad esempio, gli investimenti durevoli di capitale in infrastrutture che provocano una notevole incertezza.

Un'ulteriore forza frenante nel cambiamento dei sistemi socio-tecnici è la presenza di un "*path dependency*". Con questo termine ci si riferisce a quella situazione in cui le decisioni assunte nel passato condizionano le decisioni che si dovranno assumere nel presente o nel futuro (Wells et al., 2012). La *path dependency* viene utilizzata con accezione negativa quando le decisioni assumono una logica irrazionale e di inefficienza. Nel caso dell'industria automobilistica, un chiaro esempio di dipendenza da sentiero è la dipendenza che il settore ha nei confronti delle fonti energetiche derivanti dai combustibili fossili (Unruh, 2000). La *path dependency* può portare alla definizione di un disegno dominante il quale mantiene il possesso del mercato. Secondo i principi di economia evolutiva, l'alternativa ad un *path dependency* è l'emergere di un nuovo ed unico

disegno dominante, in quanto la diversità di soluzioni è ritenuta subottimale in termini di costo, poiché va a minare le economie di scala. Tuttavia, l'emergere di nuovi modelli dominanti pone nuove sfide e opportunità in termini di innovazioni socio-tecniche ed organizzative (Markard et al., 2009).

La prospettiva multi livello riconosce che i comportamenti e gli atteggiamenti sono un elemento rilevante delle strutture che supportano un regime. Tuttavia, un importante ruolo è giocato anche dalle organizzazioni cardine, e in particolar modo il loro grado di resistenza alla transizione. Alcune organizzazioni mostrano di avere una dipendenza di percorso che le intrappola in un contesto in cui non sono in grado di far fronte al cambiamento. Pertanto, anche l'industria automobilistica potrebbe non essere in grado di promuovere il cambiamento, poiché ostacolata da simili dipendenze di percorso.

In conclusione, la stabilità non deve essere vista solo come ostacolo a qualsiasi innovazione radicale, ma deve includere forme di cambiamento. Come sostenuto da Tushman e O'Reilly (1996) gli attori dominanti in un sistema devono avere un carattere "ambidestro", ovvero, che combini un cambiamento sia incrementale che radicale.

1.1.3.1.1 Le fonti di stabilità del regime automobilistico

Come già affermato in precedenza, nella teoria della transizione e nella prospettiva multilivello troviamo una gerarchia di relazioni causali in cui il livello più alto è rappresentato dal paesaggio, il livello intermedio dal regime e il livello più basso dalla nicchia.

In questo capitolo affronteremo la stabilità di regime, ovvero, la fonte in cui il cambiamento resta fermo. In particolare, la stabilità di un regime in un determinato settore o mercato è dato dalla capacità delle imprese operanti di impedire l'espansione di nicchie alternative e resistere alle pressioni di cambiamento a livello di paesaggio.

Diversi studi hanno tentato di comprendere quale possa essere il ruolo che assume la regolamentazione come fonte di cambiamento tecnologico e sociale (De Palma et al., 2008) (Santos et al., 2010). Tuttavia, è rimasto trascurato invece il ruolo che gli attori dominanti possono aver in questo cambiamento. Allo stesso modo vi è una comprensione insufficiente dell'importanza del tempo o del ritardo nell'attuazione di una nuova tecnologia per i partecipanti del regime. Infatti, ritardare il cambiamento abbastanza a lungo potrebbe significare estinguere la possibilità che una nuova nicchia possa emergere ed espandersi.

Nello studio condotto da Wells e Nieuwenhuis (2012), vengono individuati sei fattori chiave della stabilità di regime del settore automobilistico. Possiamo ulteriormente distinguere le fonti in due categorie, ovvero, le fonti che sono legate ai produttori di veicoli e le fonti invece dipendono dal contesto socio-economico.

Fonti legate ai produttori di veicoli

Modello di business consolidato: grazie ad una combinazione di tecnologie di prodotto, di processo e di procedure organizzative, l'industria automobilistica ha potuto usufruire di un potente modello di business che è stato in grado di sostituire potenziali nicchie, tecnologie emergenti, pratiche aziendali alternative e assume un ruolo di barriera all'ingresso per tutti i potenziali entranti. Con l'affermazione delle tecnologie dominanti degli anni '20 anche i modelli di business del settore automotive sono diventati sempre più solidi, in modo tale che la produzione, l'accesso ai prodotti, le catene di fornitura, i servizi annessi diventassero delle consuetudini. Sono gli stessi car maker la principale forza determinante che definisce le caratteristiche dell'industria automobilistica nel suo insieme e il concetto socio-culturale dell'auto. Ad esempio, Ford aveva adattato i suoi progetti preindustriali dell'auto con la produzione di massa: almeno in termini di assemblaggio e produzione standardizzati di alcuni componenti come il motore e il telaio (Duncan, 2008). L'innovazione in questo caso riguardava l'utilizzo della catena di montaggio, quindi la frammentazione del lavoro in tanti piccoli e ripetuti passaggi, spesso non qualificati. Anche Edward Budd ha sviluppato tecnologie che consentirono lo sviluppo della produzione di massa e dell'assemblaggio. In questo caso, le principali innovazioni riguardavano le tecnologie di formatura dei metalli, maschere e dispositivi per tenere insieme le parti per la saldatura. Infine, vale la pena citare anche Sloan, il quale ha introdotto per la prima volta il concetto di credito al consumo per gli acquisti dei veicoli e ha introdotto strategie che miravano alla permuta dei veicoli nonché il concetto di ciclo annuale di cambio modello. Inoltre, Sloan ha avviato la prima grande strategia di gruppo multimarca sotto il nome di General Motors. La forma dominante era ed è tuttora, caratterizzata da grandi stabilimenti produttivi centralizzati che permettevano di beneficiare di grosse economie di scala. Con lo sviluppo di tale regime, le aziende automobilistiche di nicchia che incorporavano modelli di business e tecnologie differenti tendevano a fallire, in quanto incapaci di far fronte in maniera competitiva ai costi, sulla qualità percepita e sul tasso previsto di introduzione di nuovi prodotti per un periodo di

tempo prolungato. Quelle che sono riuscite a sopravvivere sono state spesso assorbite dai maggiori produttori nei loro portafogli e quindi adattate al regime corrente.

Miglioramenti incrementali: Fondamentale al fine di mantenere una stabilità nel settore automobilistico è stato il continuo miglioramento sia in termini di tecnologia di prodotto sia di tecnologia di processo. Questi miglioramenti si manifestano in termini di: automazione dei processi, riduzione dell'inquinamento, miglioramento dei consumi, comfort. L'industria dell'auto è stata in grado di sviluppare e adattare le tecnologie esistenti per portare le prestazioni del prodotto sempre più vicine alle richieste di mercato o delle regolamentazioni. In altre parole, la struttura del regime si è adattata a determinati imperativi, ma la base è rimasta sempre la stessa. Una resistenza di questo tipo riduce la caratteristica dirompente del cambiamento, dando la possibilità ai costruttori di prendere tempo e di adattarsi mantenendo le stesse tecnologie e non stravolgendo gli investimenti di capitale e le pratiche esistenti. Si parla di concetti di rispetto delle compliance, ovvero la soddisfazione dei requisiti normativi con un livello minimo di conformità consentito dalla normativa e quindi minor rischio per l'impresa. Un esempio lampante di questo miglioramento continuo è stata la capacità delle aziende nel mercato UE di far fronte a continui cicli di normative in materia di sicurezza, ambiente, salute. Nello studio di Varma et al. è stato riscontrato che nel periodo che va dal 1995-2010, il consumo medio di carburante è stato ridotto di circa il 20% e nel periodo 2002-2010 le auto sono diventate del 22% più economiche al netto dell'inflazione. Considerando gli EV è facile capire come siano nettamente svantaggiati rispetto alle auto tradizionali, in quanto devono lottare contro l'incredibile capacità di riduzione dei costi e miglioramenti.

Isomorfismo istituzionale e inerzia organizzativa: L'isomorfismo e l'inerzia organizzativa sono due fattori che impediscono alle organizzazioni dominanti di apportare delle modifiche. L'isomorfismo è spesso individuato in quelle organizzazioni storiche, che operano in pochi contesti e quindi caratterizzati da una routine di comportamenti, atteggiamenti e aspettative che si incarnano saldamente alle strutture di ricompensa associate che definiscono il successo dell'azienda. Il punto è che è difficile ridisegnare l'imprenditorialità in una società esistente. L'inerzia organizzativa è in qualche modo inevitabile, se non altro perché è probabile che le competenze stabilite riguardino le tecnologie esistenti nei motori, i materiali della carrozzeria dei veicoli e le

architetture di progettazione. Sebbene sia possibile sviluppare show car e prototipi con tecnologie innovative, è molto più difficile iniziare una produzione su vasta scala.

Internalizzazione delle minacce: Una strategia usata dal settore dell'auto per rendere più difficile l'entrata alle potenziali tecnologie alternative è sempre stata quella di internalizzare o assorbire le società associate a queste innovazioni radicali. Forse l'industria automobilistica esistente non è così monolitica e immutabile come si pensava, ma è sempre più in grado di incorporare (letteralmente in alcuni casi) diverse tecnologie e opportunità di guadagno in contesti diversi. Il rischio viene diluito in questo modo, ma questa è anche la chiave per l'assorbimento come risposta strategica. L'internalizzazione offre altri vantaggi strategici. Ad esempio, dopo il 2000 circa, si è assistito a un crescente interesse per l'uso del magnesio nei veicoli come potenziale percorso per la riduzione del peso, ma le fonti a livello mondiale erano limitate. Alcuni produttori di veicoli hanno quindi cercato di assicurarsi le proprie forniture di magnesio investendo in impianti di produzione. Preoccupazioni simili sono ora sorte per le forniture di litio per le batterie utilizzate nei veicoli elettrici, con gran parte delle risorse globali situate in Cina. Pertanto, se l'industria non è in grado di internalizzare risorse chiave come questa, la mancanza di internalizzazione potrebbe anche essere un ostacolo all'ulteriore sviluppo del mercato di una tecnologia innovativa.

Fonti legate al contesto socio-economico

Status privilegiato dell'auto: il settore automobilistico vista la sua importanza strategica può essere assumere lo status di settore privilegiato. A renderlo evidente è stata l'attività di lobbying dell'industria automobilistica che è risultata un fattore importante nelle governance e nei risultati di queste aziende. Il settore dell'auto è sempre stato abile nella capacità di resistere al cambiamento grazie alla capacità di ritardare e rinviare l'imposizione di regolamenti governativi. L'industria automobilistica è finita per essere considerata fondamentale per la salute economica delle nazioni industrializzate. Secondo il rapporto dell'analista Felipe Munoz della società Jato Dynamics, nel 2019 i costruttori di auto nel mondo aveva raggiunto un fatturato pari a 1,87 miliardi mentre dal lato occupazionale, il settore automotive conta circa 3,5 milioni di persone, tra lavoratori diretti e indiretti, rappresentando circa l'11% dei lavoratori totali nel settore manifatturiero. Questi numeri rendono senza dubbio il mercato automobilistico come una delle industrie più potenti e critiche. Non è un caso che tutti i paesi industrializzati e le

economie emergenti hanno cercato di nutrire l'industria automotive che era considerata fondamentale per il progresso tecnologico ed economico fornendo politiche di mercato, commerciali e industriali protettive. Di conseguenza, una volta stabilizzata la vitalità del settore, i responsabili politici sono stati riluttanti a far rispettare una regolamentazione ambientale punitiva.

Status culturale dell'auto: l'importanza dell'auto è data anche dal fatto che essa si riflette come strumento sociale. L'auto infatti ha la funzione simbolica di comunicare la propria libertà individuale, la rappresentazione di sé, l'appartenenza a un gruppo sociale, oltre ad essere uno strumento funzionale per la mobilità. Questi fattori, insieme ad una crescente separazione spaziale tra lavoro, casa, tempo libero, acquisti e istruzione, hanno portato ad una forte dipendenza dall'uso dell'auto. Di conseguenza, l'auto è diventata nel corso del tempo uno *status symbol*, un'icona culturale. Tutto ciò porta a rafforzare lo sviluppo del settore, ma tende a precludere altre alternative. In questo caso non ci si trova dinanzi a un blocco tecnologico, bensì a un concetto più profondo collegato alla libertà personale degli individui che erroneamente è stato associato alla proprietà e all'uso dell'auto. Tuttavia, la tendenza futura sembrerebbe essere orientata ad una nuova visione dell'automobile, non più vista come un mezzo di proprietà, ma come uno strumento di utilizzo.

1.2 Il ruolo dell'economia circolare

1.2.1 Insostenibilità del modello lineare e il passaggio alla circolarità

Il modello economico che ha dominato la storia dell'uomo è basato su un concetto di linearità il quale prevede un processo produttivo fondato sul "take-make-dispose" (Merli et al., 2018). La linearità di questi processi è caratterizzata da alcune fasi che prevedono: l'estrazione delle materie prime, la loro trasformazione, il loro consumo e infine il loro conferimento in discarica. Nasce così il concetto di "rifiuto", ovvero un bene che non possiede più alcuna utilità e quindi viene scartato.

È evidente che un modello simile non è sostenibile a lungo termine, a maggior ragione se le risorse impiegate nei processi produttivi sono finite e non rigenerabili. In aggiunta, la limitata disponibilità di risorse deve fare i conti con il crescente aumento della popolazione e la nascita di una nuova "middle class" sempre più ampia. Secondo le stime dell'ONU (2017), la popolazione entro il 2050 avrà superato la soglia dei 9,5 miliardi,

mentre nel 2030 sarà previsto un aumento di 3 miliardi nella classe media. Il risultato di un utilizzo improprio e non sostenibile delle risorse avrà come conseguenze il raggiungimento di livelli critici di alcuni materiali, la volatilità dei prezzi nonché tensioni geopolitiche, che già negli ultimi anni si sono potute osservare, come ad esempio il problema idrico.

La criticità nella disponibilità delle risorse ha portato l'organizzazione no profit Global Footprint Network a stilare annualmente il cosiddetto Earth Overshoot Day, ovvero, il giorno in cui l'umanità ha terminato e consumato interamente le risorse prodotte e disponibili del pianeta nel corso dell'anno. Grazie ad una semplice equazione che comprende la bio-capacità della terra e l'impronta ecologica dell'uomo si ottiene questa data. Nel 2020 l'Earth Overshoot Day si è verificato il 22 agosto con un leggero miglioramento rispetto al 2019 che era avvenuto il 19 luglio, ma i "meriti" non sono attribuibili all'uomo bensì al Covid-19 che ha ridotto gli spostamenti delle persone e di conseguenza ha causato una contrazione del 14,5% di *carbon footprint* e del 8,4% di *forest product footprint*. Nonostante la lieve riduzione dell'impronta ecologica la situazione rimane ancora critica in quanto l'umanità al momento sta consumando risorse come se avesse a disposizione 1,6 pianeti. Dal 1970, anno in cui la GFN ha iniziato le sue indagini, la data dell'Earth Overshoot Day si è allontanata in maniera esponenziale alla data di fine anno.

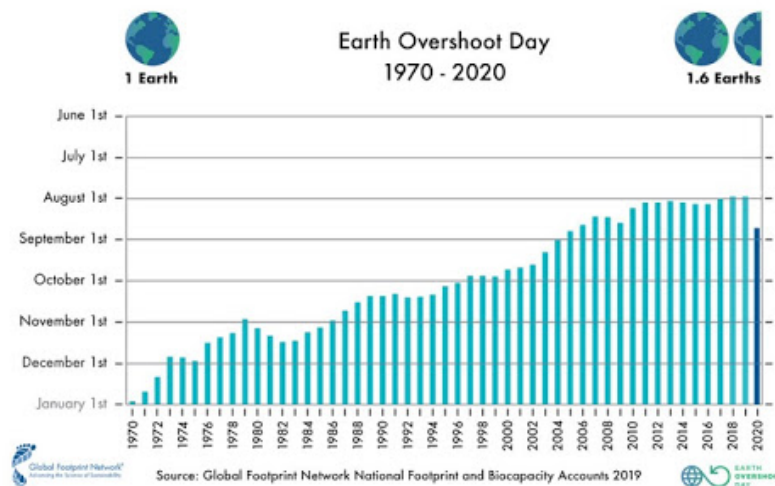


Figura 2 – Earth Overshoot Day 2020

I prossimi decenni saranno cruciali sulle sorti del pianeta; sarà necessario quindi un cambio di rotta verso un mondo più sostenibile e promuovendo una transizione verso un'economia sostenibile. Il modello lineare può essere ottimizzato e migliorato, ma fin tanto che ci saranno i rifiuti i processi produttivi continueranno a immettere esternalità negative nell'ambiente e nella società.

In questo contesto, l'economia circolare può giocare un ruolo cruciale come motore di cambiamento del modello produttivo. Infatti, il principio cardine dell'economia circolare è che ogni rifiuto o merce di oggi si trasforma in una preziosa risorsa domani.

La transizione dal modello lineare a quello circolare sposta l'attenzione dal concetto di fine vita verso concetti più evoluti come il riutilizzo, il riparo e il riciclo dei materiali o dei prodotti esistenti. Nei prossimi capitoli passeremo in rassegna i principali concetti e principi di economia circolare e in ultima istanza andremo a osservare in che modo si può creare valore grazie a modelli di business orientati alla circolarità.

1.2.2 Concetti di economia circolare

Il concetto di economia circolare non può essere fatto risalire all'elaborazione di un unico autore, ma può essere ricondotto al frutto di pensieri e contributi di diversi autori che si sono affermati nel tempo. Un primo lavoro che assume particolare rilevanza è stato quello condotto dal chimico tedesco Michael Braungart e dall'architetto americano Bill McDonough nel 2002, i quali hanno introdotto per la prima volta il concetto di "*Cradle-to-Cradle*", letteralmente dalla culla alla culla, il quale si poneva in contrapposizione al concetto di "*Cradle-to-Grave*" (dalla culla alla tomba), che viene tipicamente ricondotto al modello di economia lineare. Il principio cardine su cui si basa il paradigma C2C è quello del "*waste = food*", il quale sottolinea l'importanza di considerare i rifiuti come dei prodotti che possono apportare ancora valore, mediante dei processi rigenerativi.

Un grosso contributo va dato anche alla *Ellen MacArthur Foundation*, la quale ha definito l'economia circolare come "un'economia industriale progettata per auto-rigenerarsi, in cui i materiali di origine biologica sono destinati ad essere reintegrati nella biosfera, e quelli tecnici devono essere progettati per essere rivalorizzati senza entrare nella biosfera". In altre parole, un'economia nel quale gli scarti di una catena di produzione si trasformano in materie prime per un'altra, azzerando così i suoi rifiuti.

1.2.2.1 I nutrienti biologici e tecnici

Secondo la fondazione, i concetti di economia circolare traggono spunto dall'osservazione dei sistemi viventi, i quali sono sistemi complessi e non lineari e che possiedono caratteristiche di autorigenerazione. Spesso molte grandi invenzioni sono state concepite osservando la natura, come ad esempio il velcro. Secondo questi concetti, l'economia circolare si sviluppa mediante un'attenta valutazione del flusso di materiali, i quali possono essere classificati: "*biological materials*", ovvero dei nutrienti biologici destinati a ritornare nella biosfera, e i "*technical materials*", costituiti da prodotti che possiedono caratteristiche di funzionalità, e quindi sono lavorati e progettati per durare e generare altri beni.

Più nel dettaglio, i nutrienti tecnici sono rappresentati da materiali quali minerali, metalli, polimeri e più in generale appartengono alla categoria delle risorse finite o scarse. Si tratta di beni durevoli che sono inadatti per la biosfera. Possiamo individuare alcuni termini fondamentali per comprendere il funzionamento del modello, quali:

- Riuso: si intende l'utilizzo di un prodotto per lo stesso scopo originario di destinazione. Questo può valere anche per prodotti intermedi, per esempio, l'acqua riutilizzata nei processi di raffreddamento.
- Ricondizionamento: è il processo che prevede di restituire a un prodotto la sua funzionalità attraverso la sostituzione o riparazione di alcune componenti. Può riguardare anche quelle modifiche che apportano un aggiornamento, tecnico o estetico al prodotto.
- Rigenerazione: è il processo che prevede lo smontaggio e il recupero a livello di sottosistema o di componente. Le parti funzionanti e riutilizzabili vengono prese da un prodotto usato e rimontate in uno nuovo.
- Riciclo funzionale: si identifica in un processo di recupero dei materiali per la loro funzione originaria o per altri scopi.
- Sequenzialità: ci si riferisce alla disposizione dei materiali e delle componenti in usi diversi alla fine del ciclo di vita, in nuovi contesti di creazione continua di valore.
- Downcycling e Upcycling: il primo si identifica nel processo di conversione di materiali in altri materiali di minore qualità. L'Upcycling, al contrario, riguarda quei processi di conversione di materiali in nuovi materiali di qualità superiore.

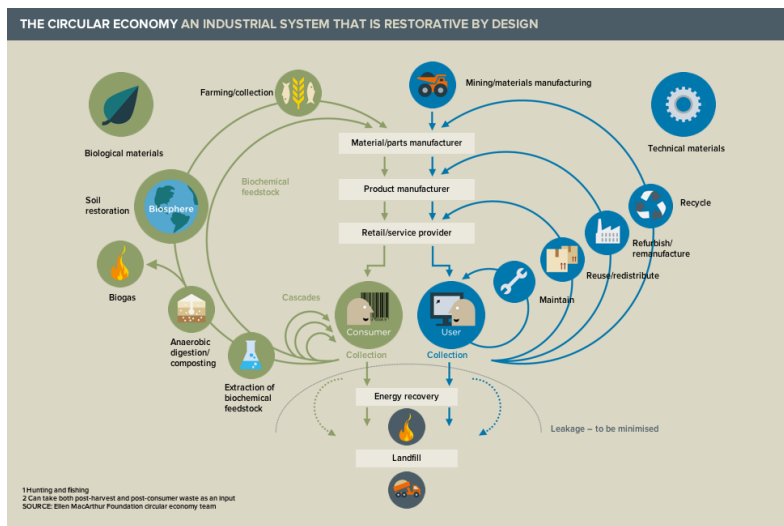


Figura 3 – Diagramma dei nutrienti biologici e tecnici dell'economia circolare

Per quanto riguarda i nutrienti biologici, vi fanno parte tutti quei materiali di origine biologica, come ad esempio, prodotti agricoli e forestali, rifiuti e residui di origine biologica che non presentano alcuna tossicità, sono rinnovabili e possono essere restituiti alla biosfera. Considerando i nutrienti biologici, i concetti da approfondire sono:

- **Conversione biochimica**: riguardano quei processi di conversione della biomassa in prodotti chimici, riducendo il loro volumi ma aumentando il loro valore.
- **Compostaggio**: è un processo biologico in cui microrganismi come batteri, funghi, insetti presenti in natura, decompongono materiali organici, come foglie, erba, detriti da giardino. Il compostaggio è una forma di riciclo naturale per conferire nutrienti biologici al terreno.
- **Digestione anaerobica**: è il processo in cui microrganismi decompongono materiali organici, quali scarti alimentari, concime in assenza di ossigeno. Il processo di digestione anaerobica va a produrre biogas e residui solidi. Il biogas è rappresentato dal metano e dal biossido di carbonio e può essere utilizzato come fonte di energia. Il residuo solido può essere restituito alla terra o utilizzato come fertilizzante.
- **Recupero di energia**: è il processo di conversione dei rifiuti non riciclabili in calore utilizzabile, energia elettrica e carburante, mediante una serie di processi denominati “waste-to-energy”.
- **Conferimento in discarica**: riguarda lo smaltimento dei rifiuti in un sito utilizzato come deposito di rifiuti solidi. Questa dovrebbe essere l’ultima alternativa da scegliere quando, per difetto della tecnologia o per difetto di convenienza economica, si rinuncia al recupero di materia.

1.2.2.2 I principi dell'economia circolare

Una volta compreso il contributo nutrizionale biologico e tecnico dei materiali, è possibile andare ad implementare il modello circolare seguendo alcuni principi operazionali, necessari al funzionamento del sistema. Questi pilastri possono essere classificati in (Ellena MacArthur, 2014):

- Design out waste → in un'economia circolare, i rifiuti non devono esistere e devono essere eliminati a partire dalla progettazione del prodotto. Si tratta dunque, di riprogettare il design di un prodotto in modo tale che le sue componenti biologiche e tecniche possano ritornare nel ciclo come materiali pronti al riuso.
- Diversity is strength → nell'economia circolare, la diversità è intesa come un punto di forza, in quanto nei sistemi la diversità risulta essere un fattore chiave alla resilienza. Se consideriamo i sistemi viventi, la biodiversità è essenziale per sopravvivere ai cambiamenti ambientali. Allo stesso modo, le economie hanno bisogno di versatilità e adattabilità per resistere a shock esterni.
- Renewable energy → in un'economia circolare, l'energia prodotta deve provenire da fonti rinnovabili in natura, cercando di eliminare la dipendenza nei confronti di risorse scarse.
- System thinking → con pensiero sistemico si intende la necessità di connettere tutti gli attori di un sistema. Il pensiero sistemico fa riferimento alle caratteristiche degli ecosistemi in natura, i quali non possono essere lineari e interdipendenti. La capacità di adattamento e di resilienza alle circostanze in evoluzione dipendono anche da questi fattori.
- Waste is food → in un'economia circolare rigenerativa è essenziale che i nutrienti biologici siano reintrodotti nella biosfera, e i nutrienti tecnici siano conservati da un punto di vista qualitativo. Tuttavia, è evidente la superiore capacità rigenerativa dei processi naturali, il che spinge i sistemi verso una composizione dei materiali di consumo più biogenica e all'uso ripetuto a cascata delle risorse, evitando la estrazione di materie prime.

1.2.2.3 La creazione di valore nell'economia circolare

I vantaggi relativi ai diversi tipi di ciclo, che siano relativi alla rigenerazione piuttosto che la riutilizzazione o il riciclaggio, possono differire in termini di benefici apportati, sulla base del tipo di prodotto, di materiale, di catena di approvvigionamento e così via.

Tuttavia, possiamo individuare quattro principi generali della creazione di valore nell'economia circolare applicabili in tutti i contesti e fasi del processo produttivo (Ellen MacArthur, 2014):

- Potenzialità dei cicli corti → i cicli sono definiti corti quando il flusso di materiali rientra nel processo vicino alla fine del ciclo di vita. Più corti saranno i cicli, maggiori benefici e vantaggi si avranno in termini di riduzione dei costi dei materiali, della manodopera, di energia consumata, di emissioni di gas serra. I cicli brevi conservano maggiormente l'integrità e il valore del prodotto. Pratiche quali ad esempio la riparazione e la manutenzione conservano la maggior parte del valore.
- Potenzialità dei cicli multipli → si riferisce al beneficio ottenuto grazie alla massimizzazione del numero di cicli o del tempo di ogni ciclo. Si potrà ottenere un vantaggio maggiore se il ciclo viene prolungato, evitando il consumo di materiale, energia e lavoro per creare un nuovo prodotto o componente. Questo può essere attuato mediante più cicli, come ad esempio il ricondizionamento di un telefono o di un motore, oppure incrementando il tempo di un singolo ciclo.
- Potenzialità dei cicli in cascata → si riferisce alla capacità ottenere valore attraverso la diversificazione del riutilizzo di un materiale o componente lungo la supply chain e in ambiti industriali diversi. Un esempio può essere il caso del cotone che dopo un primo utilizzo nel settore dell'abbigliamento passa per il settore automobilistico come imbottitura della tappezzeria e infine viene riutilizzato come materiale isolante nell'edilizia. Questo permette di sostituire un afflusso di materiali vergini nell'economia.
- Potenzialità dei materiali puri → si riferisce al fatto che le componenti e i materiali dovrebbero essere progettate per conservare la loro purezza per quanto possibile, affinché sia facile separarle e recuperarle. Maggiore è il livello di purezza e la qualità dei materiali maggiore sarà la creazione di valore. Le economie di scala e la maggiore efficienza dei cicli inversi possono essere ottenute attraverso miglioramenti nella progettazione a monte dei prodotti, per avere una maggiore facilità di separazione,

una migliore identificazione dei componenti di un prodotto e dei materiali sostitutivi. Questi miglioramenti di prodotto e di processo nei cicli inversi generano una riduzione dei costi rispetto ai processi lineari, conservando una più alta qualità in tutto il ciclo dei nutrienti tecnologici e consentendo di estendere la longevità dei materiali e, quindi, di aumentare la produttività delle risorse a livello di sistema.

1.2.2.4 L'importanza dei business model circolari

Se i risultati a favore dell'ambiente sono positivi anche le prospettive economiche del modello circolare sono favorevoli. Secondo lo studio di Lacy et al. (2020) si stima che il comparto circolare possa generare 4,5 trilioni di dollari entro il 2030, trasformando quella che a prima vista può sembrare una semplice sfida in una vera e propria opportunità.

Molti studi affermano che l'approccio circolare può apportare una migliore produttività dei materiali e di conseguenza maggiori profitti per le imprese. Questo vantaggio è più ampio e non si limita solo alle imprese che adottano questi principi, ma si estenderebbe all'intero sistema economico fino ad arrivare al consumatore finale. Se da un lato migliora la produttività e l'efficienza dei materiali, dall'altro riduce sensibilmente il costo di approvvigionamento di tali beni, e inoltre, riducendo la domanda, abbassa la volatilità dei prezzi di quei materiali. Quindi il vantaggio per le imprese risiede in un bilanciamento tra l'aumento dell'efficienza nell'uso delle risorse e la riduzione degli oneri derivanti dalla gestione di loop differenti. Infatti, è necessario dedurre i costi derivanti dalle esternalità negative che nell'economia circolare vengono ridotte. Un altro vantaggio risiede nell'innovazione: la progettazione di prodotti con principi circolari comporta un forte stimolo per le imprese ad innovare.

Dal lato dell'utente finale, l'aumento del tasso di innovazione delle imprese porterebbe ad un aumento della produttività di capitale e quindi anche un aumento dell'occupazione. Sono già molti gli studi che cercano di capire gli effetti di un modello industriale circolare. In molti settori la gestione dei rifiuti e del riciclo sono già una realtà avanzata e con l'aumentare di queste pratiche saranno maggiori i posti di lavoro necessari.

Come abbiamo già detto, una riduzione dei materiali in circolo comporta minori esternalità negative e questo si riflette su un miglioramento dell'efficienza del sistema, ovvero, una maggiore capacità di "resilienza", cioè capacità di reagire a shock di ogni genere.

Sono evidenti i benefici e le potenzialità che i modelli circolari possono portare alle imprese da un punto di vista di maggiori profitti e maggiore produttività. È ormai un dato di fatto che la sostenibilità si presenta alle imprese come un vantaggio competitivo e che crea valore aggiunto. Tuttavia, è necessario che questo valore venga gestito in maniera adeguata. È qui che subentra il concetto di *business model*.

Il business model è un modello che va a considerare l'intera logica mediante il quale l'impresa ricerca la produzione e l'ottenimento di valore. Si tratta quindi di andare ad individuare la proposta di valore, catturarla e renderla disponibile agli stakeholders. L'intervento di sostenibilità dell'impresa deve passare nel cambiamento del modello di business.

Per un'impresa è necessario valutare in che modo il suo *core business* possa essere collegato alla proposta di valore. Per farlo è possibile attuare un modello di business basato su quattro variabili:

- 1) **Creazione di valore:** pone l'attenzione sull'insieme di soggetti che partecipano alla creazione di valore. Questi soggetti sono rappresentati dagli stakeholders, ovvero, partner chiave che partecipano al processo produttivo in maniera diretta o indiretta.
- 2) **Delivery del valore:** il valore generato viene destinato ad una serie di soggetti, vale a dire, i segmenti di clientela e relazioni con l'impresa.
- 3) **Comunicazione del valore:** occorre attivare processi di comunicazione, poiché il valore viene percepito in parte dai soggetti.
- 4) **Cattura del valore:** il valore prodotto è un valore generico. Occorre andare ad individuare quale sia la struttura dei costi e dei ricavi. Spesso questo valore viene generato mediante risultato economico.

Secondo la società di consulenza Accenture (2014) si possono identificare 5 modelli di business circolari:

- *Circular Supplies Model* → si basa sulla fornitura di input di risorse completamente rinnovabili, riciclabili o biodegradabili che sono alla base dei sistemi di produzione e consumo circolari. Attraverso questo modello le aziende sostituiscono gradualmente l'utilizzo di risorse critiche e scarse, riducendo gli sprechi e rimuovendo le inefficienze;

- Resource Recovery Model → è un modello di business che promuove la creazione e il recupero di valore mediante prodotti e cicli di vita industriali collegati, in modo da trasformare i rifiuti in input di produzione. Le soluzioni di questo modello possono spaziare dalla simbiosi industriale al riciclaggio integrato a circuito chiuso in un sistema Cradle-to-Cradle. Questo modello consente all'impresa di eliminare le perdite di materiale derivante dagli scarti e massimizzare il valore economico dai flussi di ritorno del prodotto.
- Product life extension model → consente alle aziende di estendere il ciclo di vita dei prodotti attraverso un mantenimento e un miglioramento dei materiali. L'estensione della vita del prodotto ha l'obiettivo di incrementare l'utilità di una risorsa e ridurre la necessità di nuove materie vergini per la produzione di nuovi prodotti. La riparazione, rigenerazione e l'aggiornamento sono tutte soluzioni in grado di allungare la vita di un bene.
- Sharing platforms model → si basa sui concetti di share economy e promuove la creazione di una piattaforma per la collaborazione tra gli utenti in modo tale che i beni e servizi possano essere condivisi, distribuiti e il loro valore massimizzato grazie un elevato tasso di utilizzo.
- Product as a service model → questo business model fornisce un'alternativa al modello tradizionale del "buy and own". Questo modello si basa sul concetto che i prodotti possono essere intesi come un servizio e il consumatore finale come un utente di un servizio e non più come un proprietario. Viene abbandonata l'idea di possesso di un bene.

CAPITOLO 2 – L’adozione degli EV e l’economia circolare nell’industria dell’auto

2.1 L’adozione degli EV

2.1.1 Introduzione

In linea con gli obiettivi delineati dai principali trattati internazionali, la riduzione delle emissioni di gas serra o GHG (*Green House Gas*) è diventata una priorità. Il settore dei trasporti a livello mondiale causa mediamente quasi il 30% delle emissioni totali di CO₂ nell’aria, di cui il 70% circa attribuibile al trasporto stradale. Il mondo sta iniziando a fare i conti con la necessità di svincolare l’economia dal consumo di fonti energetiche fossili. In questo senso, i veicoli elettrici sembrano poter essere l’alternativa in grado di scalzare i veicoli tradizionali a combustione interna, grazie alle loro caratteristiche che permettono la riduzione delle emissioni, di inquinanti acustici e un controllo sui prezzi del carburante. Tuttavia, gli effetti positivi sull’ambiente sono ancora molto dubbi e inoltre l’adozione e la commercializzazione degli EV ha riscontrato non pochi problemi e non è riuscita a penetrare ancora in maniera decisiva il mercato. In questo contesto, le variabili che entrano in gioco dovranno essere individuate e spiegate per avere una maggiore comprensione delle cause che portano gli EV ad essere una tecnologia ancora poco diffusa.

Nei prossimi capitoli verrà illustrata una panoramica generale della mobilità elettrica, dalle caratteristiche fino alla diffusione e mercato dei veicoli elettrici. Verranno poi descritti i principali benefici e fattori critici degli EV. Infine, nell’ultimo capitolo sarà presentato un confronto tra gli impatti ambientali dei BEV (*Battery Electric Vehicle*) e degli ICEV (*Internal Combustion Engine Vehicle*) in una logica LCA (*Life Cycle Assessment*).

2.1.2 Caratteristiche e tipi di EV

Un’auto elettrica è un’automobile dotata di un motore elettrico alimentato da energia accumulata, attraverso un processo elettrochimico, da una o più batterie ricaricabili.

Le automobili elettriche apparvero la prima volta nel XIX° secolo, ancora prima che venissero inventati i veicoli a combustione interna. Sebbene per un certo periodo le vendite di veicoli elettrici superassero quelle dei veicoli a benzina, i limiti tecnologici delle

batterie e dei motori elettrici imponevano prestazioni contenute, tali da rendere gli EV inferiori ai veicoli a motore termico (Danielis, 2015).

Negli ultimi decenni, complice la comparsa e la rapida diffusione delle batterie a ioni di litio (LIB), le prestazioni degli EV sono migliorate in modo significativo. Tuttavia, sono ancora evidenti i limiti tecnologici ed economici dei veicoli elettrici. Queste ragioni hanno spinto l'industria automobilistica a progettare e produrre veicoli intermedi che possano accompagnare la transizione definitiva, come ad esempio, i veicoli ibridi. Pertanto, possiamo distinguere diverse tipologie di EV:

- MHEV (*Mild Hybrid Electric Vehicle*) → si tratta di un veicolo che sfrutta due fonti di alimentazione. Al propulsore termico viene affiancato un motore elettrico la cui funzione è quella di alleggerire il lavoro svolto dal motore tradizionale durante le fasi di accensione e di rilascio per frenare la macchina, risparmiando quindi sui freni e ricaricando la batteria. Per via della sua bassa autonomia, un veicolo di questo genere non può essere guidato in versione completamente elettrica.
- HEV (*Hybrid Electric Vehicle*) → anche questa tipologia di EV presenta due sistemi di alimentazione: un motore termico connesso alle ruote motrici e un motore elettrico connesso a una batteria che viene ricaricata durante la fase di frenata. La principale differenza con la tipologia precedente è che le HEV possiedono una batteria più grande che permette al motore elettrico di percorrere brevi tratti oppure di scegliere un'azione combinata dei due propulsori, viaggiando ad esempio, al 50% a benzina/diesel e al 50% con energia elettrica. Una delle prime auto ibride ad essere stata commercializzata è stata la Toyota Prius.
- PHEV (*Plug-in Hybrid Electric Vehicle*) → a differenza delle HEV, la Plug-in presenta una batteria ancora più grande che può essere ricaricata sia attraverso la frenata, sia dalla presa della corrente. Avendo una batteria più grande è in grado di percorrere un maggior numero di km in autonomia in elettrico. Degli esempi di auto Plug-in Hybrid sono la BMW X3, Toyota Prius plug-in, Audi A3 e-tron, Volkswagen Golf e Passat GTE.
- BEV (*Battery Electric Vehicle*) → sono veicoli che hanno un motore alimentato totalmente da una batteria ricaricabile dalla rete elettrica e che non presentano quindi un motore a combustione. L'assenza del motore termico deve assicurare un'autonomia elevata del veicolo.
- FCEV (*Fuel-cell Electric Vehicle*) → da menzionare anche questo tipo di veicolo, anche se non verrà trattato in questo elaborato. Si tratta di un'auto con motorizzazione

elettrica nella quale l'energia per la propulsione è fornita da una cella a combustibile invece che da una batteria. La cella a combustibile è a sua volta alimentata dall'idrogeno, che viene stoccato a bordo del veicolo in bombole ad alta pressione, in questo modo l'autonomia dipende esclusivamente dalla dimensione del serbatoio di idrogeno. È un tipo di alimentazione che vale la pena menzionare, ma la scarsa rete di distribuzione dell'idrogeno ne limita l'utilizzo. Un esempio di auto FCEV è la nuova Toyota Mirai.

2.1.3 Diffusione e mercato degli EV

Abbiamo già detto che i primi prototipi di automobile erano alimentati con un motore elettrico, ma la scarsa tecnologia e lo sviluppo dei motori a combustione hanno portato i veicoli elettrici verso un veloce declino. Tuttavia, la storia e la diffusione degli EV non è limitata solo ai primi anni del '900. Infatti, nel secolo scorso ci sono stati diversi momenti in cui la tecnologia elettrica ha cercato di emergere.

Vale la pena citare gli anni '90, momento in cui alcune aziende di nicchia fuori dall'industria automobilistica dominavano gli sviluppi dei BEV. Questi attori avevano adottato un design differente per la carrozzeria, che dipendeva meno dall'economie di scala e permetteva loro di essere redditizie anche vendendo poche centinaia di veicoli. In quegli anni anche le grandi case automobilistiche avevano mostrato un forte impegno verso la tecnologia elettrica, forzate dall'introduzione della regolamentazione ZEV in California. Tuttavia, questo entusiasmo verso gli EV si spense nei primi anni del 2000. Per tutto il periodo degli anni '90, l'interesse dell'industria automobilistica era rimasto sulla tecnologia dei motori a combustione interna. Questo è dimostrato dal fatto che nel periodo 1990-2005 il numero di brevetti associati a tecnologie ICE (Internal Combustion Engine) erano l'80% contro il 20% per le tecnologie associate a veicoli elettrici o ibridi (Oltra e Saint Jean, 2009).

Nel complesso, i veicoli elettrici sono stati poco apprezzati negli anni '90. Un EV a quel tempo costava il doppio di un'auto convenzionale e impiegava diverse ore per la ricarica. Inoltre, gli sforzi di lobbying dell'industria automobilistica per allentare le normative ambientali hanno sicuramente frenato il successo commerciale dei veicoli elettrici.

L'unico grande successo nel periodo 1997-2005 è stato fornito dalla tecnologia ibrida. In particolare, case automobilistiche come Toyota e Honda furono le prime a muoversi verso questa direzione, commercializzando massicciamente questi tipi di veicoli. Emblematica

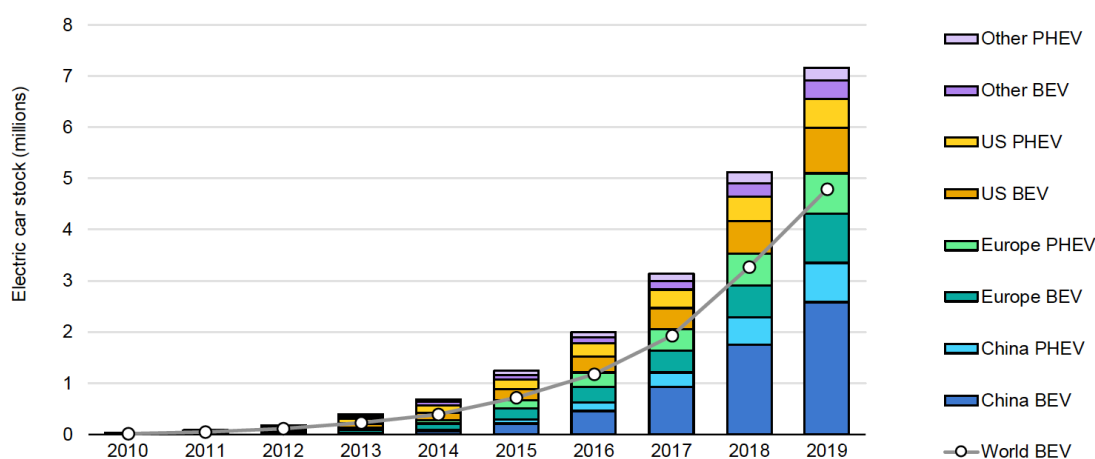
è stata la Toyota Prius lanciata nel 1997 nel mercato giapponese e si presentava come la berlina con il consumo più basso della sua categoria. Successivamente un nuovo modello di Prius è stato lanciato nel 2000 in California. Questa nuova versione presentava una maggiore accelerazione della prima e aveva un design più attraente. Questi fattori furono ben accolti dai consumatori e questo spinse l'azienda nipponica a fare un ulteriore passo verso una terza generazione della tecnologia ibrida nel 2004. Con la Toyota Prius si sono aperte le strade verso applicazioni più ampie della tecnologia ibrida-elettrica. Nel suo complesso, l'auto è stata un enorme successo per Toyota e nel periodo 1997-2007 ha venduto più di un milione di Prius nel mondo.

In netto contrasto con Toyota e Honda, tutte le altre case automobilistiche erano riluttanti ad investire nella tecnologia ibrida. Tuttavia, dopo il 2005 c'è stato un cambiamento nella percezione delle case automobilistiche che hanno incominciato ad investire notevoli risorse in R&S per recuperare il ritardo. Inoltre, i progressi e i miglioramenti nel campo delle batterie a litio hanno permesso di sostituire la vecchia tecnologia al piombo e ottenere numerosi vantaggi a partire dal minor peso, maggiore autonomia e densità energetica.

I primi anni del decennio scorso sono stati rivoluzionari per l'introduzione dei veicoli elettrici e per plasmare il mercato nascente. Le vendite di EV sono aumentate vertiginosamente negli ultimi 5 anni. Un grosso contributo è stato dato senza dubbio dal mercato cinese il quale ha avuto il maggior impatto sulle vendite. Nel 2010 il numero di autoveicoli elettrici nel mondo era di circa 17 000 unità e solo cinque paesi nel mondo potevano contarne almeno 1000 sulle loro strade: Cina, Giappone, Norvegia, UK e USA. Il mercato a quel tempo era ancora ai suoi inizi ed era composto prevalentemente dai cosiddetti "*Early Adopters*".

Secondo i dati riportati dal Global EV Outlook del 2020, nel 2019 il numero di autovetture elettriche (tra BEV e PHEV) nel mondo superava i 7 milioni, il 40% in più rispetto al 2018. Sebbene significativo, questo ritmo è stato più lento rispetto agli anni precedenti. Infatti, nel 2018 lo stock era aumentato del 63% e nel 2017 del 58%. Nell'ultimo decennio, solo il 2019 ha avuto una crescita inferiore del 50%. Attualmente lo stock globale di EV è concentrato in Cina, Europa e Stati Uniti. Nove paesi possono contare più di 100 000 vetture sulle proprie strade e almeno 20 paesi nel mondo hanno raggiunto una quota di mercato superiore all'1%.

Global electric car stock, 2010-19



IEA 2020. All rights reserved.

Sources: IEA analysis based on country submissions, complemented by other sources. For more details, see figure 1.1 in the main report.

Figura 4 – Stock globale di auto elettriche 2010-19

Nel 2019 quasi la metà della flotta mondiale di auto elettriche (47%) era in Cina, con uno stock di 3,4 milioni di unità e un incremento del 46% rispetto al 2018. L'Europa si attesta al secondo posto, con un parco auto di 1,7 milioni che rappresentano il 25% dello stock globale. Al terzo gradino vi sono gli Stati Uniti con una quota del 20% pari a 1,5 milioni di veicoli.

Considerando la quota di EV sul totale delle auto, la Norvegia è di gran lunga il leader globale con il 13% sul totale. Seguono l'Islanda (4,4%), i Paesi Bassi (2,7%), Svezia (2,06%) e la Cina (1,6%).

Sul lato delle vendite, il 2019 ha visto un incremento di 2,1 milioni di esemplari venduti. Una crescita che ha segnato una variazione positiva pari al 6% dall'anno precedente, ma un calo rispetto alla crescita delle vendite su base annua superiore al 30% del 2016.

La Cina rimane il più grande mercato automobilistico elettrico con il 50% delle vendite globali e circa 1,06 milioni di vetture vendute nel 2019. L'Europa e gli USA rispettivamente con 561.000 e 327.000 unità si posizionano al secondo e terzo posto.

In Europa le vendite sono aumentate del 50% rispetto al 2018, con un tasso di crescita notevole. I paesi europei con le quote più elevate di auto elettriche nelle vendite complessive sono stati Norvegia (56%), Islanda (22%) e Paesi Bassi (15%). In termini di volumi di vendite invece, la Germania ha superato la Norvegia con un aumento del 61% rispetto al 2018 con 109.000 vetture vendute. Altri paesi come Francia e UK hanno avuto vendite superiori a 50.000 unità.

Considerando il tipo di auto elettrica, i BEV occupano una quota del 67% della flotta mondiale di auto elettriche nel 2019. La quota di BEV è aumentata costantemente dal 50% nel 2012 al 68% nel 2018, questo grazie alla rapida crescita avvenuta in Cina che è un mercato dominato dai BEV (79%). La quota dei PHEV è rimasta solida in Europa, con Finlandia (76%) e Svezia (61%) nelle prime posizioni.

Il 2020 sarà ricordato nella storia come l'anno del Covid-19. La pandemia oltre ad aver causato un pesante impatto sulla salute ha causato un forte shock a livello economico. Uno dei settori più colpiti è stato senza dubbio il comparto automobilistico, il quale ha visto nei primi quattro mesi del 2020 un calo pari a un terzo delle vendite rispetto al 2019, il che significa circa 9 milioni di auto vendute in meno. La Cina che è il più grande mercato automobilistico ha visto una contrazione dell'80% nel mese di febbraio rispetto a febbraio 2019. Anche in altri mercati come quello Europeo si è visto un calo senza precedenti; nel mese di aprile in Germania e Francia vi è stata una riduzione del 60% e del 90%, mentre in Italia e UK il calo è stato addirittura del 98%.

Complessivamente l'IEA prevede che le vendite di auto nel 2020 saranno inferiori di circa il 15% rispetto l'anno precedente. Si tratta di una riduzione pari al doppio di quella registrata durante la crisi finanziaria del 2008.

In questo contesto, anche il mercato elettrico è stato investito in particolare in Cina dove a febbraio si è registrato un 60% in meno rispetto al 2019, con appena 16.000 veicoli elettrici venduti. Anche negli USA le vendite di auto elettriche nel mese di aprile si sono più che dimezzate. Non è stato così invece per i principali mercati di auto europei (Francia, Germania, Italia e Regno Unito) che in controtendenza rispetto al mercato globale dell'auto hanno raggiunto nei primi quattro mesi del 2020 oltre 145.000 veicoli elettrici, il 90% in più rispetto il 2019.

IEA stima che nel 2020 il numero di auto elettriche vendute supererà le 2,3 milioni di unità con leggero aumento rispetto l'anno precedente (2,2 milioni) portando il parco auto elettrico a un totale di 10 milioni di unità pari all'1% dello stock globale.

2.1.4 Benefici della mobilità elettrica

Quando si parla dei benefici delle auto elettriche si fa spesso riferimento ai vantaggi ambientali che queste possono apportare. L'assenza di un motore termico, infatti, azzerava totalmente l'emissione di gas inquinanti nell'aria e riduce la CO2 prodotta. In realtà, come vedremo più avanti, le emissioni di anidride carbonica, che è la principale sostanza che

contribuisce al surriscaldamento globale, vengono spostate geograficamente dal centro urbano a zone densamente meno popolate, ovvero, le zone nel quale viene prodotta l'energia elettrica. I principali benefici e le criticità della mobilità elettrica saranno oggetto di discussione nel capitolo 2.1.5. In questo capitolo saranno invece presentati i principali vantaggi economici apportati dalle auto elettriche che spesso vengono trascurati o addirittura sottodimensionati. Se è vero che i costi iniziali degli EV sono di gran lunga superiori a quelli delle rispettive auto convenzionali (almeno per il momento), è dimostrato invece che i costi di ordinaria manutenzione e i costi del carburante possono essere inferiori.

Nei prossimi paragrafi verranno affrontati in ordine: costi di manutenzione, i costi del carburante e infine il cosiddetto Total Cost of Ownership (TCO), cioè il costo totale di possesso di un'auto elettrica.

Costi di manutenzione

Quando si parla di costi di manutenzione di un'auto elettrica spesso si incorre in falsi miti che affermano la loro assenza. Sebbene non vi sia un motore termico e tutte le componenti annesse, gli EV condividono la medesima struttura e le stesse componenti di un'auto tradizionale, come ad esempio, ammortizzatori, freni, pneumatici e così via.

Secondo lo studio condotto da D'ambrosi (2019), in un confronto dei costi medi di manutenzione tra auto elettriche e quelle a combustione interna, in un arco temporale di 6 anni è stato dimostrato come un EV (1.095 €) costi meno di un'auto tradizionale equivalente (1.885 €). Una riduzione media del 42% che si tramuta in costo annuale di 182 euro per un EV, contro i 314 euro di un'auto a benzina/diesel. Se ci si riferisce alle ore di manodopera, la differenza non è così marcata, ma è comunque significativa, 8,8 ore di un EV contro le 10,1 ore di un ICEV.

Le differenze nel costo della manutenzione si riferiscono in larga parte alle componenti da sostituire di frequente, che nelle auto elettriche possono essere liquido freni o liquido di raffreddamento della batteria, mentre nelle auto convenzionali sono la cinghia di distribuzione, le candele, olio, filtri.

Sebbene vi sia una diminuzione dei costi di manutenzione, le indagini condotte da D'ambrosi affermano che per 9 auto elettriche su 10 è previsto il tagliando a seconda degli intervalli di km percorsi. In alcuni casi, il mancato tagliando può addirittura portare alla perdita della garanzia della batteria, che normalmente è di 8 anni per tutti i costruttori. Alcune case automobilistiche come Nissan, Renault, Citroen sono molto intransigenti e

impongono politiche restrittive sul piano di manutenzione, pena la decadenza della garanzia. Altri car maker, come Tesla, KIA, Volkswagen e Toyota, al contrario, non vincolano la garanzia della batteria al piano di manutenzione programmata.

Costi del carburante

Sono numerose le variabili da considerare quando si stima il costo del carburante o dell'energia elettrica. I consumi di un'auto possono dipendere dallo stile di guida, dalla guida urbana o extraurbana, dal tipo di auto che si considera (segmento B, C, D) e via dicendo. Se poi si considera il costo della benzina o del diesel queste dipendono dalle fluttuazioni di prezzo del petrolio. L'energia elettrica, al contrario, è più semplice da quantificare economicamente. L'energia elettrica può essere prodotta da fonti rinnovabili, quali energia solare, idroelettrica, eolica, nucleare, o da fonti non rinnovabili quali il carbone o il gas.

Se confrontiamo auto elettriche e auto a combustione interna dobbiamo, prima di tutto, individuare la loro capacità di accumulo dell'energia. I combustibili fossili possiedono un eccellente rapporto tra l'energia che possono fornire e la massa e il volume che occupano. Per unità di volume, un litro di benzina ha un potere di circa 9,6 kWh/l, mentre il diesel fornisce invece 10,7 kWh/l, in quanto più denso. Per unità di massa, i valori sono rispettivamente di 12,2 kWh/kg e 12,7 kWh/kg. Questi parametri così esplicitati sono fondamentali per confrontare prestazioni e consumi con un sistema di propulsione elettrico. L'accumulo di energia in un'auto elettrica è più complesso, infatti, necessita di una batteria. Delle batterie parleremo più nello specifico nel capitolo 3. Ora ci soffermeremo solo su alcuni aspetti. Le attuali batterie adottano una tecnologia agli ioni di litio che permette di avere una densità energetica mediamente sui 0,14 kWh/kg.

Per far un confronto reale, prenderemo in esame uno studio condotto da Peugeot, la quale va a confrontare: Peugeot 2008 benzina PureTech 130 CV, Peugeot Diesel BlueHDi 130 CV e la Peugeot e-2008.

La nuova electric car della casa automobilistica francese possiede una batteria con una capacità di accumulo di circa 50 kWh di energia. L'elevata densità energetica del carburante permette di accumulare l'energia sia in un minor spazio sia con un minor peso. Al contrario, le batterie a litio immagazzinano molta meno energia e il rapporto peso/potenza è molto più elevato. Tuttavia, l'auto elettrica ha bisogno di meno energia per potersi muovere, il che la rende molto più efficiente con una resa pari quasi al 90%.

Analizzando i parametri a kWh di energia consumata ogni 100 km, si possono notare delle grosse differenze in termini di consumo. Le versioni a benzina e diesel della 2008 consumano rispettivamente 5,8 l/100 km e 4,9 l/100 km che si traduce in consumo di energia pari a 55,68 kWh/100 km nella versione benzina e 51,94 kWh/100 km nella versione Diesel.

La versione elettrica ha un consumo nettamente più basso: 17,6 kWh/100 km che può scendere fino a 16,1 kWh/100 km, differenza che dipende dal sistema di rigenerazione dell'energia in frenata.

Come si può notare dai numeri, le auto tradizionali hanno una maggiore capacità di accumulo, ma consumano circa 3,5 volte di più di un'auto elettrica. In termini di costo dell'energia, la propulsione elettrica ha un buon vantaggio. Considerando un range di prezzo che va da 0,20 €/kWh (ricarica a casa) a 0,45 €/kWh (ricarica nelle colonnine), ricaricare completamente il modello Peugeot e-2008 può costare tra i 10 e i 22,5 euro. Ciò si traduce in un costo ogni 100 km che va da 3,12 a 7,03 euro. Nel caso delle versioni benzina o diesel, il costo ogni 100 km dipende dal prezzo del petrolio e dalla tassazione che varia da paese a paese. Mediamente, il costo del carburante per la versione a benzina è di 7,92 €/100 km, mentre per la versione a diesel scende a 6,15 €/100 km. Questo dimostra come vi sia un vantaggio economico anche nei confronti del diesel se si ricarica a casa. Inoltre, l'aumento nell'utilizzo di energie rinnovabili, l'utilizzo di sistemi *smart grid* e la rapida espansione dell'infrastruttura di ricarica non può che far diminuire il prezzo dell'energia elettrica incrementando il beneficio economico delle auto elettriche.

Total Cost of Ownership

Abbiamo già evidenziato come le auto elettriche siano caratterizzate da costi iniziali più elevati, ma da costi operativi inferiori rispetto alle auto a motore termico (costi di manutenzione, costi del carburante). Nel momento dell'acquisto, i consumatori potrebbero non essere in grado di valutare correttamente questa differenza, poiché i costi di acquisto sono maggiormente percepibili rispetto ai costi operativi, che spesso vengono sottostimati.

Con il modello di costo totale di proprietà (TCO) è possibile andare a cogliere quali siano le variabili di costo legate al possesso e alla gestione dell'auto, in modo tale da poter identificare correttamente la convenienza economica.

In letteratura, il modello di TCO proposto da Windisch (2013) è definito dalla seguente equazione:

$$TCO = IC + AOC + IG$$

Gli IC sono rappresentati dai costi iniziali necessari all'acquisto dell'auto, AOC sono i costi operativi annuali legati all'utilizzo dei veicoli durante il periodo di possesso e IG sono i guadagni o le perdite in conto interessi dovuti alle differenze di costi iniziali e operativi tra auto elettriche e auto convenzionali.

I costi iniziali (IC) sono definiti a loro volta da:

$$IC = MSRP - RD + RC - SUB + INFRA_H$$

MSRP è il prezzo di listino suggerito dal produttore, RD è l'eventuale sconto applicato dal venditore, RC rappresenta il costo di immatricolazione obbligatorio per l'acquisto di un'automobile, SUB indica gli eventuali sussidi statali erogati per incentivare l'acquisto di un certo tipo di veicoli (ad es. per favorire la diffusione di auto elettriche), INFRA_H rappresenta i costi di installazione di infrastrutture di ricarica per veicoli elettrici presso la propria abitazione. Questi ultimi vanno considerati esclusivamente nel calcolo del TCO di auto elettriche.

I costi operativi medi annuali (AOC) sono calcolati come media di tutti i costi sostenuti durante il periodo di possesso del veicolo sulla base T anni.

I guadagni (perdite) in conto interessi (IG) vengono calcolati tenendo conto degli interessi maturati sui risparmi (o mancati risparmi) di costi iniziali e di costi operativi annuali, tra il veicolo scelto e quello assunto come riferimento, in questo lavoro un'automobile elettrica. Si considera inoltre che i guadagni/perdite degli anni precedenti contribuiscono al guadagno/perdita nell'anno t . Per questo motivo i guadagni (perdite) in conto interessi dovranno essere attualizzati all'anno di acquisto del veicolo.

Un'ulteriore componente da aggiungere al TCO è il valore residuo (RV) del veicolo. Sommando IC e IG e sottraendo il valore attuale di RV, si ottengono così i costi espressi al tempo iniziale dell'acquisto. Moltiplicando tale somma per il fattore di recupero del capitale (CRF), otteniamo i costi fissi annui medi di possesso dell'auto. Se poi aggiungiamo l'AOC medio scontato e dividiamo il numeratore per la distanza annuale percorsa (AKT)

in km, otteniamo la metrica TCO/km, che rappresenta il costo medio del possesso del veicolo per km.

Nello studio condotto da Scorrano et al. (2018) si tenta di valutare il TCO/km, sulla base del modello appena descritto, di auto con diversi sistemi di alimentazione per cercare di capire se le auto elettriche sono competitive rispetto alle equivalenti a motore a combustione. Nello specifico, si vanno considerare tre modelli di veicoli del segmento medio/piccolo, ovvero, i tre modelli elettrici più venduti in Italia nel periodo gennaio/aprile del 2018 (www.unrae.it): la Nissan Leaf, Smart Forfour Electric Youngster e la Renault Zoe. Le equivalenti a benzina sono invece: la Nissan Pulsar, Smart Forfour e la Renault Clio. Per cominciare, lo studio va a distinguere tre diversi parametri:

- Parametri relativi al veicolo → prezzo di acquisto, valore residuo del veicolo, consumo di carburante/elettricità, manutenzione e riparazione, tassa di immatricolazione, bollo.
- Parametri relativi al soggetto che utilizzerà il veicolo → variabili territoriali e di mobilità, costi assicurativi.
- Parametri di mercato e di policy → sussidi e politiche pubbliche, tassi di interesse.

Dai risultati che emergono dallo studio, i costi iniziali attualizzati delle auto elettriche sono molto più elevati (da 1.062 a 1.878 €) rispetto le controparti a benzina, i quali non sono compensati da un minor costo operativo medio e da risparmi in conto interessi. La differenza è tale da rendere i TCO/km della auto elettriche superiori ai corrispondenti veicoli tradizionali. Tuttavia, la differenza si attenua nei casi in cui i possessori dell'auto hanno uno stile di vita caratterizzato da lunghe percorrenze annuali (25.000 km/anno). Considerando i tre modelli di auto proposti, la Nissan Leaf è più economicamente conveniente rispetto alla sua versione a benzina, invece per quanto riguarda gli altri due modelli elettrici continuano ad avere un TCO/km leggermente più alto.

Al fine di rendere più reale il confronto tra le due tipologie, lo studio ha condotto un'analisi di sensitività per valutare se la variazione di alcuni parametri può influenzare la convenienza economica dei veicoli elettrici. In particolare, i parametri impiegati nell'analisi riguardavano: il numero di anni di utilizzo, tassi di interesse, prezzi della benzina, sussidi all'acquisto e risparmi sui costi di parcheggio e pedaggi.

I risultati pendono ancora una volta a favore delle auto tradizionali nel caso della Renault Zoe e della Smart electric. Per quanto concerne la Nissan Leaf, gli esiti sono variabili; l'auto elettrica riesce ad essere competitiva e addirittura più conveniente quando si verificano tali assunzioni:

- il periodo di utilizzo dell'auto è almeno di 6 anni;
- i sussidi all'acquisto sono pari almeno a 5.000€;
- il prezzo della benzina è pari almeno a 1,64€;
- il risparmio sul pedaggio e parcheggi è di almeno 100€/anno.

In generale, i risultati ottenuti da Danielis (2018) dimostrano che il fattore preponderante degli EV è il loro costo iniziale. I costi operativi più bassi delle auto elettriche non sono ancora in grado di compensare l'elevato costo d'acquisto. Inoltre, le differenze del TCO/km dei due sistemi di alimentazione tende ad attenuarsi man mano che il chilometraggio annuale aumenta. Risultano poi fondamentali le agevolazioni dei governi nei sussidi all'acquisto. Un esempio di paese virtuoso che ha investito molto sulle agevolazioni è la Norvegia, la quale ha deciso di esentare i veicoli elettrici dalla tassa di proprietà e sull'IVA (25%) e concedere alle auto elettriche uno *status* privilegiato nelle strade, con esenzione dai pedaggi e parcheggi gratuiti. Grazie a queste politiche, nel 2019 il 57% delle auto immatricolate erano elettriche.

Un altro importante studio sul Total Cost of Ownership delle auto elettriche è quello condotto da LeasePlan (società di noleggio a lungo termine) denominato Car Cost Index 2020. Questo report ha fatto emergere i costi totali di proprietà delle auto (elettriche, benzina, diesel) di 18 paesi europei. Il TCO 2020 includeva i costi medi di assicurazione, manutenzione, imposte, deprezzamento e il carburante/elettricità. Visto il numero di paesi analizzati, è evidente la eterogeneità delle variabili considerate, a partire dai costi dell'energia e carburante fino alle imposte. Il report, inoltre, va a considerare il costo totale di possesso delle auto nei loro primi 4 anni, ipotizzando una percorrenza di 30.000 km/anno.

Dallo studio (Figura 5) emerge che una parte importante del TCO delle auto elettriche è il deprezzamento (59%), maggiore rispetto alle auto diesel e benzina. Questo rende più vantaggioso l'acquisto di auto elettriche usate non troppo vecchie. Se si osserva il costo

del carburante medio, le auto elettriche presentano un netto vantaggio. Infine, si osserva un leggero vantaggio anche sul lato dei costi di manutenzione.

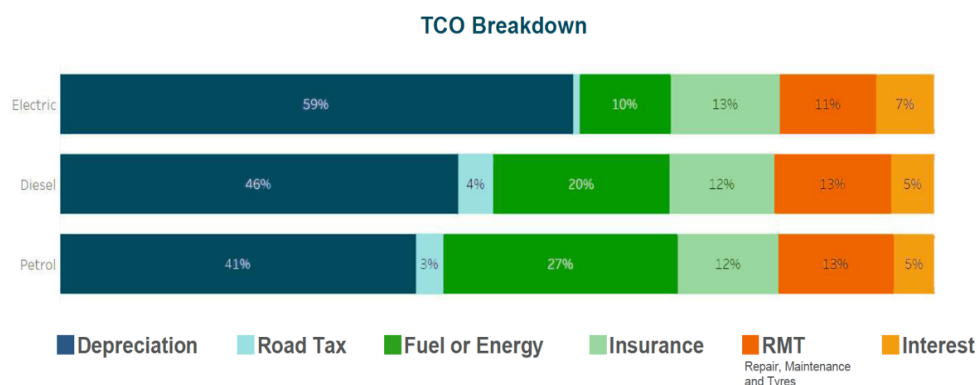


Figura 5 – Confronto TCO tra EV e ICEV

Nell'indagine vengono confrontati anche i TCO nei vari paesi europei sulla base delle diverse tipologie di auto (segmenti B, C, D, E). In figura 6 si nota che la situazione europea è abbastanza eterogenea se si considerano le auto del segmento C (le compatte). Al contrario, le auto del segmento D (mid-size) sono convenienti nella maggior parte dei paesi europei, eccetto in Ungheria e Finlandia.

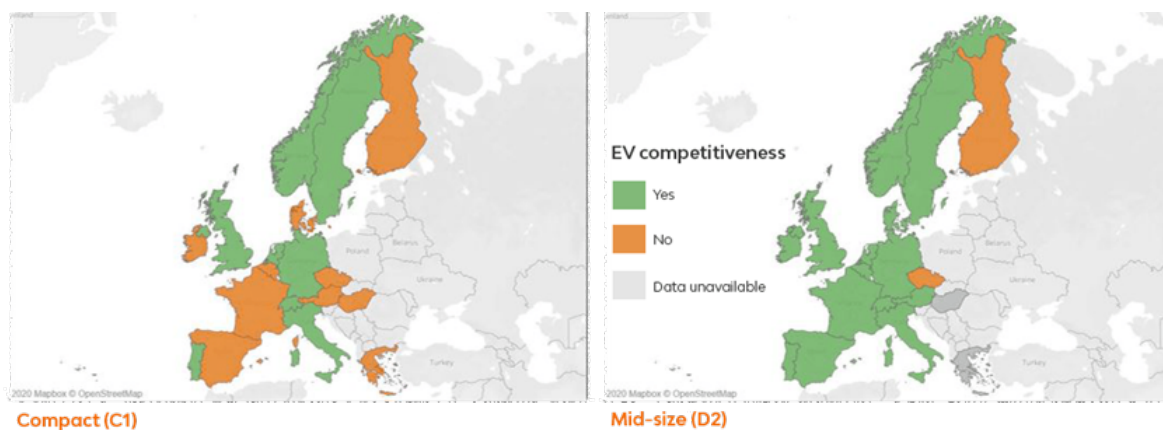


Figura 6 – Competitività economica degli EV (segmento C e D) in Europa

2.1.5 Fattori critici della mobilità elettrica

Nel seguente capitolo verranno illustrate inizialmente le principali barriere di adozione legate agli EV, le implicazioni ambientali ed energetiche della mobilità elettrica. In ultima analisi, verrà presentato un confronto tra BEV e ICEV in una logica di Life Cycle Assessment.

2.1.5.1 Barriere di adozione degli EV

Il processo di adozione di una tecnologia non è lineare. Uno dei contributi più importanti in letteratura in materia di diffusione dell'innovazione è senza dubbio quella di Everett Rogers, il quale identifica una serie di fasi che intercorrono nel processo di adozione di una nuova tecnologia. Egli sostiene che la curva di diffusione ha il tipico andamento a campana di una distribuzione normale (sebbene potrebbe essere simmetrica verso sinistra o destra) e individua 5 categorie di adottanti rappresentati da: Innovators, Early adopters, Early majority, Late majority e Late mass. Ciascun adottante differirà a seconda del valore attribuito all'innovazione, propensione al rischio, grado di coinvolgimento e rappresenterà una fetta della popolazione che adotterà la nuova tecnologia in tempi diversi. Per esempio, gli innovatori o i pionieri rappresentano circa il 2,5% della popolazione e sono quei soggetti che adottano una tecnologia ancor prima che questa sia conosciuta nel mercato. Se consideriamo invece il gruppo della maggioranza anticipatrice e ritardataria, che assieme costituiscono il 68% della popolazione, sono quelli che determinano il successo o meno di una innovazione.

Un altro concetto che Rogers ha osservato è che il tasso di miglioramento della performance di una tecnologia e il suo tasso di diffusione nel mercato tendono a seguire un andamento simile ad una "curva a S": si riscontra infatti un andamento iniziale più lento, quindi un'accelerazione e infine un rallentamento nel processo di miglioramento.

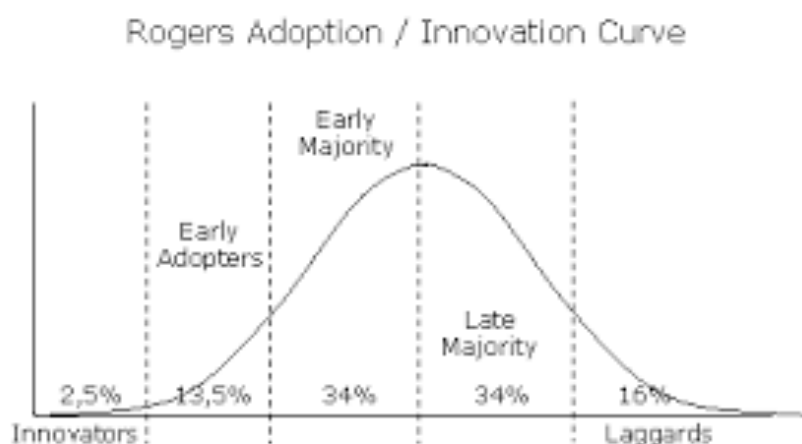


Figura 7 – Adozione di una innovazione

Sebbene il processo di adozione abbia un andamento comune per tutte le nuove tecnologie, ci sono tuttavia una serie di fattori specifici che possono accelerare o rallentare questo percorso. Queste variabili sono influenzate dalla capacità o meno di una tecnologia di affrontare e superare gli ostacoli e le barriere all'ingresso in un determinato settore.

La diffusione della mobilità elettrica, per esempio, è limitata da una serie di barriere che frenano la sua adozione. L'individuazione di questi problemi sarà di fondamentale importanza in questo elaborato, poiché lo scopo è quello di comprendere in che modo queste criticità possano essere superate mediante l'adozione di pratiche circolari sostenibili. I principali ostacoli che verranno spiegati in seguito possono essere classificati come: finanziari, funzionali ed infrastrutturali.

Barriere finanziarie

I principali ostacoli di natura finanziaria sono rappresentati dall'elevato prezzo di acquisto degli EV, dal costo delle batterie e da una scarsa comprensione dei costi riferiti al carburante e alla manutenzione.

Un primo grande errore è confrontare le tecnologie emergenti con i disegni dominanti, i quali possono beneficiare di economie di scala e di conseguenza il confronto non può essere equo.

Il prezzo è senza dubbio la componente monetaria che contribuisce maggiormente ad ostacolare l'adozione degli EV. Il lungo *Payback period* è spesso un grande ostacolo di inclinazione all'acquisto da parte dei consumatori. Occorre sottolineare che l'elevato prezzo riflette sia il costo delle batterie, sia la mancanza di una vera e propria scala di produzione delle auto elettriche. Maggiore sarà la produzione e la diffusione di EV maggiore sarà il beneficio di economie di scala. Non è un caso se l'industria automobilistica negli anni si sia sviluppata così velocemente. È stato proprio grazie a processi innovativi, quali ad esempio, la catena di montaggio a permettere una maggiore efficienza e di conseguenza una riduzione dei costi di produzione.

Sebbene negli anni il costo degli EV sia diminuito drasticamente, grazie ad una riduzione del costo delle batterie da 1.160 \$/kWh (2010) a 176 \$/kWh (2018), il prezzo comunque risulta poco competitivo anche al netto di eventuali incentivi. È giusto specificare che la politica degli incentivi è un fattore soggettivo che dipende da paese a paese. Quindi la sensibilità del prezzo varia a seconda delle politiche applicate.

Il costo delle batterie si riflette sul prezzo dell'auto elettrica. Ad incidere su questo aspetto è senza dubbio la mancanza di una scala produttiva efficiente, ma anche il costo delle componenti di una batteria. Come verrà spiegato in seguito nel capitolo 3, le principali chimiche delle batterie incorporano al loro interno materiali preziosi e scarsi che fanno lievitare notevolmente il loro prezzo.

Altri ostacoli di natura finanziaria sono la scarsa comprensione dei vantaggi che si possono ottenere nei costi del carburante e costi di manutenzione, come abbiamo già visto in precedenza. È necessario che i soggetti comprendano l'importanza di questi aspetti, al fine di non limitare l'adozione degli EV.

Barriere funzionali

In questa categoria si fa riferimento alle caratteristiche funzionali o di prestazione del veicolo elettrico. Le funzionalità possono riguardare fattori come la sicurezza, affidabilità, autonomia, tempi di ricarica, durata della batteria.

In molti studi è stato evidenziato come uno dei principali ostacoli sia l'ansia da autonomia, quella che viene definita anche come "*range anxiety*". Il fatto di non poter avere un'autonomia così ampia come quella degli ICEV spinge i consumatori ad evitare i veicoli elettrici. In molti casi si tratta di una paura irrazionale, poiché come dimostrato dalla National Household Travel Survey, il 95% dei trasferimenti non supera i 200 km di percorrenza, ovvero, un chilometraggio inferiore rispetto alle autonomie delle attuali auto elettriche nel mercato.

Un altro fattore importante sono i lunghi tempi di ricarica. In questo senso sono stati fatti dei grossi passi in avanti. Infatti, attraverso migliori prestazioni delle batterie e attraverso una maggiore installazione di colonnine ad alta velocità di ricarica, i tempi sono stati ridotti.

Un terzo fattore fa riferimento alla durata della batteria. In realtà, la durata della batteria riguarda la sua degradazione nel tempo che può essere ricondotta a molti fattori diversi come ad esempio, le temperature a cui è esposta, il tipo e la frequenza di ricarica e via dicendo. Inoltre, la durata in termini di km percorsi dipende da modello a modello. Mediamente, la durata di un pacco batteria è di 8 anni, tempo in cui la batteria perde circa il 20% della sua capacità iniziale, diventando inadatta alla trazione, poiché influisce sulle capacità di accelerazione, autonomia e rigenerazione del veicolo. Questo è un fattore non trascurabile dai consumatori, in quanto al momento la sostituzione di una batteria potrebbe addirittura costare quanto un'auto nuova.

Barriere infrastrutturali

In modo simile alle stazioni di servizio delle auto a benzina/diesel anche i veicoli elettrici richiedono investimenti in nuove infrastrutture di rifornimento. L'infrastruttura può diventare un ostacolo all'adozione se non disponibile in maniera sufficiente o se priva di colonnine di ricarica ad alta potenza. La presenza di un'adeguata infrastruttura è direttamente collegata alla *range anxiety* citata in precedenza.

Prendendo in esame la situazione infrastrutturale dell'UE, secondo l'European Alternative Fuels Observatory, in Europa si possono contare al 2020 circa 213.000 colonnine, un aumento del 30% rispetto l'anno precedente. A fare da prime della classe ci sono Paesi Bassi (61.000), Francia (44.000), Germania (42.000). L'Italia si posiziona al quarto posto come numero di colonnine installate, pari a 13.000, anche se ha un rapporto di colonnine per numero di EV pari a 5 che si distacca dalla media europea di 8. A dare un grosso contributo è stato senza altro il piano nazionale per le infrastrutture di ricarica dei veicoli elettrici promosso da Enel nel novembre 2017 che mirava alla installazione di 7 mila colonnine entro il 2020, per arrivare a 14 mila entro il 2022.

Un aspetto importante collegato all'infrastruttura di ricarica fa riferimento alla tipologia di colonnina che fornisce energia. Le colonnine possono essere distinte in:

- *Home charge*: erogano in genere tra i 3 e i 6 kW;
- *Normal charge*: offrono energia entro i 22 kW;
- *Fast charge*: erogano oltre i 22 kW.

Per le stazioni di ricarica la norma di riferimento è la IEC 61851-1. La norma prevede un'elettronica di controllo che utilizza un sistema di comunicazione "universale" tra la stazione ed il veicolo attraverso un circuito PWM (*Pulse Width Modulation*), necessario per garantire la sicurezza del processo di ricarica, sia per le persone che per evitare danneggiamenti del pacco batterie del veicolo. Secondo la normativa IEC 61851-1 relativa alle colonnine di ricarica, sono ammessi 4 "Modi" per la ricarica dei veicoli, e precisamente:

- **Modo 1**: Ricarica domestica senza PWM. Il Modo 1 consiste nel collegamento diretto del veicolo elettrico alle normali prese di corrente. Non è quindi previsto il Control Box.

Questa modalità è adatta solo a bici elettriche e alcuni scooter. Non è applicata per le auto elettriche.

- **Modo 2:** Ricarica sicura domestica/aziendale, lenta o veloce. Sul cavo di alimentazione del veicolo è presente un dispositivo denominato *Control Box* (Sistema di sicurezza PWM) che garantisce la sicurezza delle operazioni durante la ricarica; le prese utilizzabili sono quelle domestiche o industriali fino a 32A (sia monofase sia trifase – max 22 kW).
- **Modo 3:** Ricarica per ambienti pubblici, lenta o veloce. È la tipologia di ricarica obbligatoria negli ambienti pubblici; la ricarica deve avvenire tramite un apposito sistema di alimentazione dotato di connettori specifici; è presente il sistema di sicurezza PWM e la ricarica può essere di tipo lento (16A 230V) oppure rapido (fino a 32A, 400V).
- **Modo 4:** Ricarica diretta in corrente continua FAST DC. È la ricarica in corrente continua fino a 200A, 400V. Con questo sistema è possibile ricaricare i veicoli in alcuni minuti e il caricabatteria è esterno al veicolo (nella colonnina). Esistono due standard: CHAdeMO (Giapponese) e CCS Combo (Europeo).

Sono in fase di sperimentazione anche i sistemi High Power Charging (HPC), ovvero, le stazioni di ricarica ultraveloce. Questa soluzione consente di ricaricare le batterie delle auto elettriche in un arco di tempo compreso tra tre e cinque minuti per avere una autonomia di circa 100 chilometri. Con High Power Charging, la ricarica rapida di un'auto elettrica è paragonabile al rifornimento di un motore a combustione interna.

2.1.5.2 Implicazioni energetiche ed ambientali

Del beneficio ambientale delle auto elettriche ne è già stato discusso brevemente in precedenza, ma è necessario ampliare lo spettro d'analisi. Per farlo è necessario riprendere i concetti di ciclo di vita di un prodotto, più comunemente conosciuto in letteratura con il nome di *Life Cycle Assessment* (LCA). Questo strumento di valutazione permette di andare ad individuare qual è l'impatto ambientale di un bene o servizio durante la sua intera vita, considerando tutti i suoi aspetti.

Per quanto riguarda l'auto elettrica, sappiamo che durante la fase di utilizzo/consumo, il mezzo è vantaggioso in quanto non emette gas inquinanti, per via dell'assenza di un motore termico. Precisiamo, che in verità avviene un trasferimento geografico delle

emissioni, in quanto la produzione di energia elettrica comporta a sua volta l'emissione di CO₂ nell'aria. Se consideriamo invece, la prima e l'ultima fase, ovvero, la produzione e la sua dismissione, iniziano ad emergere i primi problemi. Nella fase di produzione vengono incluse: tutte le fasi di lavorazione e produzione dei materiali necessari alla costruzione del veicolo. Vengono perciò incluse anche le fasi di estrazione dei materiali necessari per la produzione delle batterie a litio. Nella fase di rifiuto vengono invece considerati gli impatti ambientali che le diverse componenti possono avere durante lo smaltimento o il loro deposito in discarica.

Nei capitoli che seguono verrà illustrato nel dettaglio lo strumento di LCA e verrà presentato un confronto tra gli EV e gli ICEV in termini di impatti ambientali.

2.1.5.2.1 Modello LCA

L'LCA (*Life Cycle Assessment*) o il LCEI (*Life Cycle Environment Impact*) è una metodologia standardizzata che mira a valutare gli impatti ambientali associati a prodotti o servizi in una prospettiva di ciclo di vita, dall'estrazione delle materie prime fino al trattamento del fine vita (*from Cradle-to-Grave*). Si tratta di uno strumento oramai consolidato e dal grande potenziale che offre un contributo efficace per una maggiore consapevolezza in chiave di sostenibilità.

Lo studio LCA di un bene o servizio prevede una serie di fasi che possono essere articolate in:

1. *Goal and scope definition* → si vanno a definire gli obiettivi e il campo di applicazione dell'analisi;
2. *Life Cycle Inventory* - LCI (Analisi dell'inventario) → è un bilancio che tiene conto sia degli ingressi (es: materiali, energia, risorse) che delle uscite (es: emissioni, consumo idrico e del suolo) di tutte le fasi all'interno di un sistema;
3. *Life Cycle Impact Assessment* - LCIA (Valutazione degli impatti) → va a individuare quali sono gli impatti ambientali, diretti ed indiretti, associati agli input ed output della fase precedente;
4. *Life Cycle Interpretation* (Analisi dei risultati) → va ad effettuare un'analisi delle due fasi precedenti e cerca di definire delle linee di intervento.

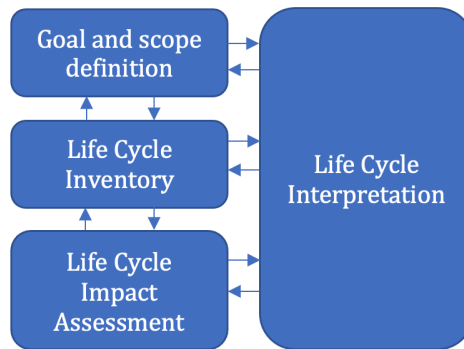


Figura 8 – Fasi di un'analisi LCA

Analizzando l'intero ciclo di vita di un'automobile possiamo identificare quattro diverse fasi che vanno a costituire il Life Cycle Inventory (LCI):

- **Raw material stage:** è la fase chiamata anche “*Well-to-Tank*”, letteralmente “dal pozzo al serbatoio”. È la fase di estrazione, lavorazione, raffinazione dei combustibili necessari ad alimentare gli ICEV o nel caso degli EV, per la produzione di energia elettrica;
- **Production stage:** è la fase di produzione, assemblaggio delle diverse componenti dell'auto compresa la batteria degli EV.
- **Use stage:** è la fase di movimento del veicolo, di utilizzo. Detta anche “*Tank-to-Wheel*”, ovvero, dal serbatoio alla ruota.
- **End-of-life stage:** è la fase del trattamento di fine vita dei veicoli e delle sue componenti.



Figura 9 – Fasi della Life Cycle Inventory di un'auto

2.1.5.2.2 Confronto BEV e ICEV

Quando si mettono a confronto i BEV e gli ICEV si possono identificare molte differenze che fanno riferimento alle prestazioni, la velocità, i tempi di ricarica, l'autonomia, i consumi, efficienza energetica, i costi, la manutenzione. In questo capitolo, tuttavia, ci occuperemo delle emissioni di GHG (*Green House Gas*), i principali responsabili dell'innalzamento delle temperature, e degli impatti sulla salute umana causati dalle due tipologie di alimentazione. Il confronto tra BEV e ICEV sarà condotto mediante la

metodologia LCA, valutando ogni fase del Life Cycle Inventory di un'automobile. Il suddetto confronto sarà basato sullo studio condotto dall'*European Energy Agency* (2018), nel quale viene effettuata un'analisi del ciclo di vita dei veicoli elettrici, in particolare quelli funzionanti esclusivamente a batteria (BEV).

Raw material stage

La produzione di BEV richiede una vasta gamma di materie prime. Rispetto agli ICEV, le principali differenze di materiali richiesti derivano dalla batteria, dall'elettronica e dal motore elettrico. Tutte queste componenti contengono notevoli quantità di materiali come rame, alluminio e quelli che vengono definiti come "*Critical Raw Material*" e "*Rare Earth Element*", ovvero, quei materiali che hanno un'elevata importanza economica oltre che una limitata presenza in natura. Questi materiali critici e rari sono più abbondanti nei BEV rispetto agli ICEV. Inoltre, l'estrazione e la raffinazione di questi materiali richiede un'elevata intensità energetica.

Per quanto riguarda il corpo dell'auto, non ci sono particolari differenze tra veicoli elettrici e veicoli tradizionali. Tuttavia, in alcuni casi, con l'obiettivo di alleggerire il veicolo elettrico e per massimizzare autonomia e prestazioni, vengono utilizzati materiali più leggeri, quali ad esempio, l'alluminio e il carbonio.

La presenza di materiali critici e in generale materiali che devono essere estratti e raffinati, rendono i BEV molto più impattanti rispetto agli ICEV. In particolare, possiamo distinguere tre diversi impatti: impatti in termini di GHG emessi, impatti sulla salute umana e impatti sugli ecosistemi.

Emissioni di gas serra: i processi coinvolti nell'approvvigionamento di materie prime, che comprendono le fasi di estrazione e raffinazione, assorbono elevate quantità di energia che si tramutano in significative emissioni di GHG e di inquinanti atmosferici.

Secondo diverse stime, le emissioni derivanti dall'estrazione di materie prime e la lavorazione per le batterie a litio causerebbe circa il 20% delle emissioni totali di GHG dalla produzione di batterie (Kim et al., 2016; Ellingsen et al., 2018). Infatti, l'energia utilizzata per la loro estrazione può avvenire sia sotto forma di elettricità sia attraverso il calore derivante da combustibili fossili. In questa fase l'utilizzo di combustibili fossili sembra essere dominante.

Oltre alle emissioni derivanti dall'uso di energia, un'altra fonte di GHG sono le emissioni dirette di CO₂ derivanti dalla produzione di alluminio. Come abbiamo già detto,

l'alluminio è ampiamente utilizzato in diverse parti dell'auto, in particolare sui BEV in cui è necessario ridurre il peso complessivo del veicolo per migliorarne le sue prestazioni. Audi è stato il primo costruttore a utilizzarlo per i propri modelli. I vantaggi sono evidenti; è resistente, facile da lavorare e rende le auto più leggere. Lo svantaggio è che la sua lavorazione richiede molta energia, infatti, per una tonnellata di alluminio sono necessari circa 15 MWh di potenza.

Impatti sulla salute umana: il potenziale di tossicità per gli esseri umani in questa fase è compreso tra i 2,2 e 3,3 volte maggiore per i veicoli elettrici rispetto agli ICEV (Hawkins et al., 2013). L'ampio range di impatto è dovuto alla grande varietà di elettrico (BEV, HEV, PHEV ecc.), dal tipo di batteria impiegata fino al tipo di energia elettrica utilizzata.

I potenziali impatti sulla salute derivano dalla tossicità delle emissioni associate all'estrazione e alle produzioni di metalli come il rame o il nichel.

Un peso importante delle emissioni deriva dallo smaltimento degli sterili di rame e nichel che contribuiscono per il 70-75% del totale impatto per la fase di produzione.

È importante evidenziare che la maggior parte delle estrazioni di CRM e REE avviene spesso in paesi in cui non sono previste norme di sicurezza per la salute. Questo può portare a inquinamento delle fonti idriche delle comunità locali con un aumento del rischio di esposizione a sostanze radioattive e malattie respiratorie. In generale, gli impatti sulla salute umana derivano dagli sterili minerari, poiché la maggior parte dei depositi di terre rare contengono sostanza radioattive.

Inoltre, si sottolinea come l'esaurimento di CRM e REE possa stravolgere anche la sfera sociale ed economica, con conseguenti violazioni dei diritti umani nei principali paesi produttori spesso localizzati nella porzione di globo più povera.

Impatti sull'ecosistema: l'impatto dei processi di estrazione mineraria, le emissioni di GHG associati e le fughe di sostanze tossiche nell'aria possono avere effetti dannosi anche per l'ecosistema. Le principali conseguenze possono essere:

- Eutrofizzazione
- Acidificazione dei corpi idrici
- Contaminazione del suolo e la sua erosione
- Perdita delle biodiversità

L'utilizzo di energia dalla combustione di carburanti si traduce nell'emissione di inquinanti atmosferici come NOX e SOX che contribuiscono alla eutrofizzazione e l'acidificazione. In aggiunta, le emissioni da consumo energetico determinano emissioni dirette di: Anidride solforosa (SO₂) che viene rilasciata durante i processi di produzione di rame, nichel e da minerali di solfuro; Acido cloridrico e acido fluoridrico rilasciati durante la produzione di alluminio.

Production stage

Al giorno d'oggi tutte le principali case automobilistiche si sono impegnate nella produzione di veicoli elettrici o veicoli ibridi. Le principali caratteristiche che distinguono i BEV dai ICEV riguardano i componenti per l'accumulo di energia della propulsione e della frenata. Al posto del serbatoio del carburante del motore, del cambio e dello scarico presenti negli ICEV, i BEV richiedono una batteria, un motore elettrico e un sistema di elettronica. Per quanto riguarda invece altri componenti, come la carrozzeria e i sistemi ausiliari, non differiscono particolarmente. Molti BEV sono adattati alle carrozzerie ICEV per risparmiare tempo, costi di sviluppo e per sfruttare le linee di produzione esistenti (Delogu et al., 2017).

La produzione della batteria e di altri componenti specifici per BEV richiede materie prime e processi di assemblaggio diversi da quelli per la produzione ICEV, con conseguenti impatti ambientali differenti. In questa fase ci si concentrerà sulle differenze degli impatti ambientali della produzione di BEV e ICEV, una volta che i materiali sono stati trasformati in una forma utilizzabile (es: fogli di alluminio).

Come nel caso degli ICEV, i vari componenti BEV vengono spesso prodotti in una varietà di luoghi e poi assemblati altrove. Da una prospettiva ambientale, l'ubicazione della produzione della batteria è molto importante, poiché la batteria costituisce una grande frazione (fino al 25%) della massa del veicolo (Mayyas et al., 2017) e coinvolge processi ad alta intensità energetica.

Lo sviluppo delle batterie agli ioni di litio ha svolto un ruolo cruciale nell'aumentare la praticità dei BEV e l'interesse dei consumatori nei loro confronti, grazie alla loro elevata densità energetica e durata superiore rispetto alle precedenti tecnologie di batterie. La produzione, composizione e l'impatto ambientale dei pacchi batteria saranno temi affrontati più nel dettaglio nel capitolo 3, in questo momento ci soffermiamo velocemente su quelle che sono le principali fasi del processo di produzione delle batterie a litio: 1) preparazione dei materiali anodici e catodici; 2) combinazione dei materiali anodici e

catodici con l'elettrolita, collettore e separatore; 3) assemblaggio delle diverse celle in un pacco batteria, che comprende l'involucro, il sistema elettrico, il sistema di gestione termica e il sistema di gestione della batteria (BMS).

Le emissioni di GHG e inquinanti atmosferici associati alla fase di produzione dei BEV sono legati sostanzialmente alla generazione di elettricità necessaria per i processi ad alta intensità energetica. Inoltre, la maggior parte delle analisi LCA sui BEV rileva che la produzione delle batterie è responsabile della maggior parte dell'uso di energia nella fase di produzione (Nordelöf et al., 2014), con stime comprese tra il 10 e il 75% dell'energia di produzione e tra il 10 e il 70% delle emissioni di GHG di produzione (Nealer et al., 2015). Più nel dettaglio, le fasi nella produzione di batterie identificate come energivore sono l'essiccazione degli elettrodi e il funzionamento delle sale di essiccazione durante la produzione delle celle (Ellingsen et al., 2018).

Considerando altri componenti del veicolo, il motore elettrico contribuisce per circa il 7-8% delle emissioni totali legate alla produzione (inclusa l'estrazione di materie prime) a causa dell'elevato contenuto di rame e alluminio, altri componenti del gruppo propulsore con un alto contenuto di alluminio contribuiscono per il 16-18%, e il resto del veicolo contribuisce per circa il 35% (Hawkins et al., 2013).

Le stime LCA non indicano la fase produttiva come la fase più dispendiosa in termini di energia e di GHG emessi. Infatti, rimane la fase di utilizzo quella più critica. Tuttavia, laddove il consumo di elettricità nella fase di utilizzo possa essere fornito prevalentemente da fonti rinnovabili, la fase di produzione sarebbe responsabile fino al 75% delle emissioni di GHG durante l'intero ciclo di vita (Faria et al., 2013). Questo perché la maggior parte delle batterie prodotte avviene in paesi in cui l'elettricità è prodotta con elevata quantità di carbone (es: la Cina). Se per esempio, utilizzassimo il mix energetico UE del 2015, la fase di produzione delle batterie rappresenterebbe circa il 30% delle emissioni di GHG.

Confrontando le emissioni di GHG tra la produzione di BEV e ICEV, i risultati LCA concordano sul fatto che l'impatto della produzione di BEV è maggiore di quella delle auto tradizionali. Quando le emissioni di GHG di BEV e ICEV di dimensioni comparabili vengono confrontate nella fase di produzione, si stima comunemente che le emissioni di GHG della produzione di BEV siano circa 1,3-2 volte quelle della produzione di ICEV (Ellingsen et al., 2016; Kim et al., 2016). È importante sottolineare come la batteria abbia un ruolo cruciale. Infatti, l'energia richiesta per produrre un motore elettrico e il sistema elettrico associato è paragonabile a quella di un motore termico e la trasmissione

associata. È la batteria la responsabile della grande differenza tra BEV e ICEV nel fabbisogno energetico di produzione, ma di questo ne parleremo più nello specifico nel capitolo 3.

Use stage

Quando si analizza l'impatto ambientale della fase di utilizzo di un veicolo, si devono considerare due tipi di analisi:

- *Well-to-Tank (WTT)* → letteralmente “dal pozzo al serbatoio”, considera gli impatti ambientali associati alla produzione di carburante o di energia elettrica;
- *Tank-to-Wheel (TTW)* → letteralmente “dal serbatoio alle ruote”, considera gli impatti delle emissioni di gas o inquinanti dal tubo di scappamento.

Per poter confrontare BEV e ICEV è necessario considerare congiuntamente entrambe le fasi, in un'analisi che prende il nome di *Well-to-Wheel (WTW)*, dal “pozzo alle ruote”.

L'assenza di un motore termico, e quindi di un tubo di scappamento, permette ai BEV di non emettere gas serra o inquinanti atmosferici nell'aria. Questo aspetto rende i veicoli elettrici vantaggiosi rispetto agli ICEV, azzerando l'emissione di inquinanti locali, come PM, NOX, SO2, e riducendo notevolmente anche l'inquinamento acustico. Se da un lato, l'analisi TTW ci dice che i BEV non emettono gas serra a livello locale, dall'altro, l'analisi WTT ci dice che vengono emessi durante la produzione di energia elettrica.

Così come nella “*Raw material stage*”, individuiamo anche in questo caso i principali impatti in termini di emissioni di GHG e della salute umana.

Emissioni di gas serra: quando si parla di auto elettriche è corretto dire che esse comportano una transizione geografica delle emissioni di GHG, dal centro urbano a zone meno densamente popolate. Se da un lato si azzerano le emissioni di inquinanti locali e acustici nei centri urbani, dall'altro aumenteranno le emissioni di CO2 nell'aria in maniera globale. Spostare spazialmente il problema però, non significa risolverlo, in particolar modo se l'energia elettrica prodotta proviene dal carbone, come avviene attualmente in alcuni grandi paesi come Cina e India.

La produzione di energia elettrica è un fattore molto variabile che dipende dal mix energetico di un paese. Se consideriamo l'UE nel 2015, le principali fonti di energia

elettrica includevano l'energia nucleare, con una quota del 26,68%, i combustibili solidi con il 26,04% e il gas naturale con il 17,41%. Le altre fonti rimanenti rappresentavano il 29,87%.

Secondo il mix energetico dell'UE nel 2015, le emissioni WTW di un BEV di medie dimensioni erano comprese tra i 60 e 75 gCO₂/km, tra il 47% e il 58% in meno rispetto alle emissioni di un ICEV comparato del 2015 con circa 143 gCO₂/km (Nordelöf et al., 2014). Progressivamente, in linea con le disposizioni ambientali concordate (pacchetto quadro 2030), vi sarà una graduale riduzione delle fonti a combustibile fossile a favore di fonti rinnovabili. I primi effetti di decarbonizzazione in UE già si possono osservare: nel 2019 l'energia generata dal carbone era pari a 469 TWh contro i 787 TWh del 2015 (Agora Energiewende e Sandbag 2020)

Secondo (Hawkins, 2013), un BEV alimentato mediante il mix energetico europeo riduce le emissioni di circa il 30% rispetto ad un ICEV. Sempre lo studio, afferma che se un'auto viene alimentata da un'energia completamente green, la riduzione scende al 90%. Al contrario, se un'auto viene alimentata da energia prodotta totalmente o in larga misura da combustibili fossili, il bilancio complessivo sarebbe a favore delle auto a diesel o benzina. Si è dimostrato quindi, che in alcuni casi, la sostituzione dei veicoli tradizionali con i veicoli elettrici potrebbe aumentare le emissioni anziché diminuirle. Il problema diventa quindi capire in quali Stati o regioni è utile promuovere la mobilità elettrica.

Considerando i 27 stati UE, abbiamo già detto che complessivamente la produzione di energia elettrica pende a favore dei combustibili fossili in misura vicino al 30%. È giusto però, fare una distinzione dei paesi nel quale si produce maggiormente energia pulita e quindi nel quale l'introduzione di veicoli elettrici può avere un grande impatto in termini ambientali. Ad esempio, in paesi come la Norvegia, Svezia, Islanda e l'Austria l'utilizzo di auto elettriche sarebbe estremamente vantaggioso in termini ambientali, in quanto questi paesi sfruttano in larga parte energie rinnovabili. Anche in paesi come la Francia o la Slovacchia le auto elettriche sono molto vantaggiose, grazie ad una elevata quota di energia nucleare, anche se poi ci sarebbe il problema di come smaltire le scorie. Al contrario, paesi come Polonia ed Estonia, l'utilizzo di EV sarebbe addirittura più dannoso rispetto alle auto tradizionali.

Impatti sulla salute umana: in Europa il trasporto è la principale fonte di inquinamento atmosferico e acustico nella maggior parte delle aree urbane. L'esposizione a lungo termine di questi inquinanti possono causare danni al sistema cardiocircolatorio e

portare alla nascita di tumori. Un'alta percentuale di persone che vivono in aree urbane in Europa è esposta a concentrazioni di inquinanti superiori agli standard di qualità dell'aria, ovvero, a livelli ritenuti dannosi per la salute (EEA, 2017).

Un altro fattore da considerare è l'esposizione a lungo termine al rumore della strada, ai quali sono collegati problemi di salute come disturbi del sonno, effetti negativi sul sistema cardiovascolare e sul metabolismo. Si stima che i motori elettrici, a basse velocità, siano circa 10 dB più silenziosi dei motori ICEV (RIVM, 2010). All'aumentare della velocità si attenua il rumore. Infatti, a 50 km/h, il potenziale di riduzione del rumore di un BEV rispetto a un ICEV è solo di circa 1 dB (RIVM, 2010; Campello et al., 2017), una differenza appena percettibile dall'orecchio umano. Visti questi risultati, si prevede che l'impatto dei BEV sul rumore delle autovetture sarà significativo nelle aree urbane dove le velocità sono basse e il traffico stazionario è comune, mentre sulle strade extraurbane e autostrade questo problema sarà trascurabile.

In generale, i BEV sembrano essere ideali per affrontare i problemi legati alla salute umana avendo zero emissioni di inquinanti atmosferici dallo scarico e ridotta rumorosità del motore. Tuttavia, ci sono alcune considerazioni chiave che influenzano il risultato netto per la salute umana, come le emissioni di inquinanti atmosferici per la generazione di elettricità. Come già detto in precedenza, la produzione di elettricità per caricare le batterie dei veicoli elettrici provoca emissioni di inquinanti atmosferici dalle centrali elettriche che possono variare dai SO₂, NO_x ai PM. Allo stesso modo delle emissioni di GHG, le quantità di emissioni di inquinanti atmosferici attribuibile ai BEV varia in base alla fonte di generazione dell'energia.

Alcuni studi hanno rilevato come in alcune regioni della Cina o degli Stati Uniti, dove vi è un'elevata percentuale di elettricità a base di carbone, le emissioni WTW di inquinanti atmosferici dei BEV risultavano essere fino a due, tre, quattro volte quelli di un ICEV (Huo et al., 2015).

Per comprendere le differenze di impatto degli ICEV e dei BEV sulla salute umana, la posizione geografica diventa rilevante. Nei centri urbani, le emissioni di NO_x e PM e altri inquinanti da ICEV possono portare ad elevate concentrazioni locali nelle aree vicine a dove le persone vivono e lavorano. Al contrario, le emissioni delle centrali elettriche avvengono in zone meno densamente popolate. Questo comporta ad una minore esposizione umana nelle zone urbane, sebbene vi sia un aumento dell'esposizione in alcune aree extraurbane.

Un'ultima nota di demerito dei BEV (così come per gli ICEV) fa riferimento all'impatto ambientale dovuto all'usura di pneumatici e freni, che secondo lo studio condotto dalla *Emissions Analytics* (2020), possono generare emissioni di particolato fino a 1.000 volte superiori rispetto a quelle prodotte dallo scarico di un motore. Il particolato è problema ambientale molto grave e in rapida crescita, grazie alla crescente popolarità di veicoli grandi e pesanti come i SUV e le auto elettriche, più pesanti delle auto standard. Infatti, più i veicoli sono pesanti e più particolato viene prodotto. Inoltre, l'agenzia sottolinea il fatto che non esiste una regolamentazione sull'inquinamento da usura dei pneumatici, a differenza delle emissioni di scarico che sono state rapidamente ridotte dai produttori di veicoli.

End-of-life stage

La fase conclusiva del ciclo di vita di un'automobile è quella che viene definita "*End-of-life*" (fine vita). Con questo termine si indica quell'insieme di pratiche, strumenti e processi che hanno lo scopo di andare a trattare o eliminare un bene che si trova alla fine della sua vita utile. I processi EOL, quindi, non coinvolgono solo pratiche dirette allo smaltimento di un rifiuto, ma prevedono anche strumenti di economia circolare come il riutilizzo e riciclo.

Il mercato dell'auto elettrica è in crescente aumento e le stime prevedono che entro il 2025 ci saranno tra i 50 e gli 80 milioni di EV nel mondo e le loro vendite saranno tra i 14 e i 25 milioni di unità (IEA, 2020). Di conseguenza, il tema del fine vita delle auto elettriche sarà di vitale importanza nei prossimi anni.

Un'automobile è da considerarsi "a fine vita" quando ha raggiunto un determinato numero di km percorsi. Questo fattore è influenzabile direttamente dal tipo di alimentazione (ad esempio un diesel ha una durata maggiore), ma anche dalle dimensioni del veicolo. Infatti, segmenti inferiori (A e B) percorrono in genere meno km rispetto a segmenti superiori (C e D). Un altro fattore da considerare è il fattore tempo. In genere un'auto inizia ad essere considerata vecchia quando raggiunge i 15/20 anni dall'immatricolazione.

Una volta che il mezzo non è più utilizzabile, la direttiva sui veicoli fuori uso (2000/53/CE) richiede ai produttori di veicoli di assumersi la responsabilità estesa dei loro veicoli e componenti. Il veicolo sarà rottamato e smantellato, parte dei suoi pezzi verranno recuperati e rivenduti al mercato dell'usato. Le componenti rimanenti invendute dovranno essere riciclate o termovalorizzate. Dal 2015, inoltre, è obbligatorio recuperare almeno il 95% del peso del veicolo, di cui l'85% riciclato o riutilizzato mentre il restante 10% impiegato nel recupero energetico.

Da un punto di vista ambientale, la fase di fine vita ha un impatto molto limitato rispetto ad altre fasi come quella di produzione o di utilizzo. La differenza sostanziale tra ICEV e BEV sta ancora una volta nella presenza del pacco batteria. I suoi componenti chimici, se non trattati adeguatamente, potrebbero causare danni all'ambiente e alla salute umana. Il tema del trattamento delle batterie è di fondamentale importanza. Secondo le attuali prospettive di crescita, sono previsti circa tra i 100 e i 120 GWh di batterie da trattare entro il 2030 (IEA, 2020).

Una volta che la batteria ha perso circa il 20% della sua capacità diventa inutilizzabile. A questo punto le strade percorribili sono diverse:

- Riutilizzo/Seconda vita
- Riciclaggio
- Collocamento in discarica

Attraverso il riutilizzo mediante applicazioni stazionarie è possibile sfruttare la capacità teorica (80%) della batteria, in quanto viene richiesta minore densità energetica. In questa fase le batterie vengono raccolte, disassemblate, riassemblate in nuovi pacchi batterie e infine riutilizzate per le stesse applicazioni per cui sono state fabbricate oppure riutilizzate per altre applicazioni diverse.

I processi di riciclo mirano a recuperare parte dei materiali preziosi e dei metalli contenuti all'interno delle batterie. Si procede quindi all'estrazione dei metalli più pregiati mediante processi pirometallurgici e idrometallurgici. Questi processi hanno un impatto ambientale rilevante come è stato rilevato in alcuni studi, in quanto richiedono molta energia. Il riutilizzo e riciclaggio verranno discussi in maniera più approfondita in seguito nel capitolo 4.

Infine, l'ultima strada percorribile è quella del collocamento in discarica, che è sicuramente l'opzione meno desiderabile per il trattamento di fine vita. Infatti, a causa delle sostanze impiegate nella produzione delle batterie a litio, si presentano rischi per l'ambiente e per la salute umana. In particolare:

- Rischio di incendio nelle discariche o nei mezzi di trasporto
- Contaminazione del suolo
- Possibile inquinamento delle falde acquifere

I residui della frantumazione dei veicoli durante il processo di fine vita vengono spesso inviati in discarica. Sebbene non siano classificati come rifiuto pericolosi, potrebbero esserci ancora componenti come metalli pesanti che sono pericolosi e possono causare l'inquinamento del suolo o delle falde acquifere (Sakai et al., 2014). Tuttavia, non sono solo gli impatti ambientali delle discariche devono essere considerati; il conferimento in discarica dei materiali esclude opportunità di risparmio di risorse ed energia lungo tutto il ciclo di vita (Gaustad, 2018).

In conclusione, possiamo affermare che le auto elettriche non sono sicuramente veicoli ad emissione zero. Tuttavia, molti studi LCA hanno riscontrato emissioni di GHG dei BEV inferiori a quelli degli ICEV. Le emissioni GHG associate alle materie prime e alla fase di produzione dei BEV sono 1,3-2 volte superiori a quelle degli ICEV, ma questo può essere più che compensato dalle emissioni della fase di utilizzo, a seconda della fonte di generazione di elettricità.

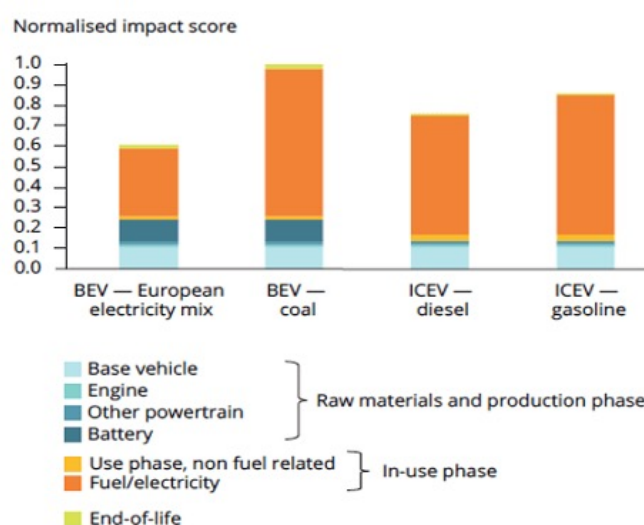


Figura 10 – Confronto Emissioni CO2 tra BEV e ICEV

Hawkins et al. (2013) hanno riportato le emissioni di gas a effetto serra nel ciclo di vita dei veicoli elettrici caricati mediante il mix energetico europeo. I risultati hanno mostrato emissioni inferiori del 17-21% per i veicoli a diesel e del 26-30% per i veicoli a benzina (Figura 10). Il mix di generazione dell'elettricità influenza in maniera preponderante tutte le fasi del ciclo di vita, ma in particolar modo la fase di utilizzo. Come si nota in figura (), i

BEV che sono alimentati da elettricità proveniente da centrali a carbone sono molto più impattanti rispetto alle loro controparti a diesel e benzina. Al contrario, l'utilizzo completamente green di fonti di energia comporterebbe una riduzione delle emissioni pari al 90% rispetto ad un ICEV equivalente (IEA, 2017).

2.2 L'economia circolare nell'industria dell'auto

Sebbene i concetti teorici di economia circolare e più in generale di sviluppo sostenibile siano storicamente datati, la loro applicazione come proposte di valore e come vantaggi competitivi per le aziende è piuttosto recente.

In un momento storico nel quale nasce una maggiore consapevolezza dei problemi di natura sociale e ambientale da parte dell'uomo, le imprese incominciano a capire di avere un ruolo sociale, oltre a quello economico. Si parla di *Corporate Social Responsibility* (CSR), ovvero, l'integrazione da parte delle imprese dei problemi sociali ed ambientali che si vengono a creare nell'attività economica nei confronti di tutti gli stakeholders.

Parallelamente, si parla di "*shared value*", un concetto più evoluto di CSR, il quale viene inteso come un vero e proprio cambiamento nel pensiero e che si manifesta in un mutamento del modello di business delle aziende coinvolte. In questa filosofia si attua un meccanismo di creazione del valore nel lungo periodo e di ricerca di un vantaggio competitivo. Le politiche di *shared value* devono portare ad un equilibrio fra le tre dimensioni: sociale, economica ed ambientale.

Accanto a queste filosofie, sono sempre più diffuse nuove tendenze globali, come standard ambientali restrittivi, maggiore sensibilità e responsabilità dei cittadini alle tematiche relative al clima, che spingono gli operatori economici a partecipare in modo più attivo alla sostenibilità ambientale attraverso strategie proattive e approcci di business innovativi.

Come abbiamo già descritto in precedenza, l'attuale approccio lineare, basato su una logica del "produci-consumi-rifiuti", implica costi derivanti dalla ricerca e dalla dipendenza continua da risorse scarse, nonché la produzione di inefficienze sociali ed economiche dovute alla gestione e allo smaltimento dei rifiuti.

Il modello circolare, al contrario, trae un vantaggio di costo derivante da un minor utilizzo di materie prime e dall'impiego alternativo delle risorse quando giungono a fine vita, attraverso il loro riutilizzo o il loro riciclo, volto a chiudere il ciclo produttivo. Tuttavia,

l'approccio circolare non potrà essere attuato senza un concreto, congruo e coerente coinvolgimento politico e normativo, il quale dovrà essere allineato con le strategie messe in atto dalle imprese. Per questi motivi, i principali paesi industrializzati nel mondo sono intervenuti per promuovere questa transizione. Nell'Unione Europea, ad esempio, nel 2018 è stato attivato il cosiddetto "pacchetto economia circolare", il quale prevede ambiziosi obiettivi di riciclaggio e riduzione dei rifiuti. Più nel dettaglio, il pacchetto prevede che entro il 2025 il riciclo dei rifiuti urbani e degli imballaggi raggiunga rispettivamente il 55% e il 60%. Questi valori dovranno aumentare al 60% e al 70% entro il 2030. Per ottenere tali risultati sarà necessario rivedere la progettazione dei prodotti in modo tale che la loro vita possa essere estesa più a lungo e che possano essere riutilizzabili in altre forme.

In questo contesto anche il settore dell'auto si trova in un momento di profondo cambiamento. Infatti, l'industria automobilistica e il trasporto nel suo complesso sono tra i settori che causano maggiore inquinamento atmosferico ed emissioni di GHG, i quali sono i principali responsabili del cambiamento climatico.

Le automobili sono prodotti molto complessi che impiegano una considerevole varietà di materiali, ed è per questo motivo che l'approvvigionamento di materie prime, è una delle più grandi sfide del settore. Tuttavia, il sistema circolare è un paradigma che è già stato assorbito dai modelli di business dell'industria automobilistica. Infatti, sono molti gli sforzi che sono stati compiuti sia nel riutilizzo, che nella progettazione dei prodotti per il riciclo e il remanufacturing. Anche la normativa europea sul fine vita dei veicoli impone limiti restrittivi; l'attuale direttiva 2000/53/CE prevede l'obbligo di riciclo di almeno il 95% del peso del veicolo, di cui l'85% relativo al riutilizzo o riciclo e il restante 10% attraverso il recupero energetico. Tuttavia, questo non basta e le sfide future richiedono ulteriori sforzi. In una logica LCA (*Life Cycle Assessment*), il ciclo di vita di un'automobile si divide in molte fasi, che vanno dall'estrazione dei materiali necessari per la sua produzione fino alla fase di *End-of-life*. Sebbene la fase di fine vita di un'auto tradizionale possa essere più efficiente rispetto a quella di un'auto elettrica, per via dell'assenza di una batteria, questo non lo si può affermare anche per quanto riguarda la fase di produzione del veicolo. La produzione di automobili è in continua espansione, solo nel 2019 la produzione ha raggiunto gli 85 milioni di vetture prodotte. Questo trend comporta lo sfruttamento di molte risorse, nonché l'aumento degli impatti ambientali connessi all'estrazione e alla lavorazione dei materiali. Oltre ai materiali, i processi produttivi

richiedono un elevato consumo idrico, che viene stimato in media tra i 52 e gli 83 metri cubi per automobile (Bompan, 2018).

Sono molti i casi virtuosi di economia circolare nell'industria dell'auto. Un importante passo avanti in tal senso è stato fatto nell'ambito degli pneumatici. Da quando sono stati inventati, gli pneumatici hanno rivoluzionato il concetto di mobilità e a distanza di 150 anni, il materiale con cui vengono realizzati è ancora la gomma, la quale risulta insostituibile. Al contrario di quello che si può pensare, i processi di recupero e di riciclo degli pneumatici è molto efficiente e permette di ridurre gli impatti ambientali.

Una volta arrivato a fine vita, lo pneumatico può prendere due strade: può essere ricostruito oppure smaltito. Con la ricostruzione si prevede di creare un nuovo battistrada con un utilizzo ridotto di materia prima. Con lo smaltimento, invece, il processo porta alla frantumazione dello pneumatico fino ad ottenere due prodotti distinti: il polverino (70%) e il carburante (30%) che viene impiegato per la produzione di energia. Il polverino è la componente più importante, in quanto può essere impiegata in diversi campi, dall'edilizia per la creazione di isolanti o rivestimenti impermeabili, dall'industria del cemento per la creazione di catrame o la realizzazione di strade, fino ad arrivare ad un utilizzo in ambito sportivo per la creazione di piste di atletica oppure la pavimentazione di campi da gioco. Per molte imprese di pneumatici, l'attenzione ambientale è diventata un punto in cui trarre vantaggi competitivi ed economici. Il colosso francese Michelin, per esempio, si è posto l'obiettivo di arrivare al 2048 producendo gomme esclusivamente sostenibili e di riciclare il 100% delle gomme usate.

Altri casi importanti di economia circolare nel campo automobilistico sono i cosiddetti impianti "zero rifiuti", come ad esempio, lo stabilimento FCA di Cassino, nel quale vengono prodotti alcuni modelli del marchio Alfa Romeo. Questo impianto, infatti, recupera e ricicla il 100% dei rifiuti. In un anno si è in grado di recuperare fino a 45.000 tonnellate di lamiera, 500 di legno, 400 di carbone e 50 di plastica (Spaziani, 2018). Inoltre, non vengono utilizzate risorse idriche locali, bensì l'acqua piovana. Vengono raccolti così oltre 500 mila metri cubi di acqua ogni anno. L'impianto di Cassino è anche "zero CO2 emission" visto che il 100% dell'energia elettrica utilizzata proviene da fonti rinnovabili, quali idroelettrica, solare ed eolica. Il gruppo FCA inoltre per alcuni veicoli bio-based utilizza fibre naturali come il kenaf e la juta, riducendo gli scarti del 18,7% e in particolar modo il consumo di acqua nella filiera pari al 27,5% e le emissioni di CO2 del 10%.

Un altro esempio virtuoso è quello del gruppo Renault, il quale grazie ad una collaborazione con Filatures du Parc (azienda specializzata in fili cardati) e Adient Fabrics (1° fornitore al mondo di sedili), utilizza come rivestimenti dei sedili, della leva del cambio, delle portiere, un tessuto composto da fili cardati al 100% riciclati provenienti da cinture di sicurezza di auto usate oppure da bottiglie di plastica.

Sempre Renault, attraverso il suo impianto di Choisy-le-Roi riesce a recuperare e rigenerare componenti usate che vengono vendute come pezzi di ricambio. I pezzi recuperati possono avere prezzi inferiori del 70% rispetto al prezzo originale.

Infine, merita di essere citato anche il caso di Audi e di tutto il gruppo Volkswagen il quale si è posto l'obiettivo di una "Carbon Neutrality" attraverso una visione basata sui principi di economia circolare del ridurre, riutilizzare e riciclare. Insieme ai suoi fornitori, Audi ha deciso di tagliare le emissioni a monte del processo, utilizzando energie rinnovabili e chiudendo i loop di processo. Un esempio è il progetto "*Aluminum Closed Loop*", il quale mira a ridurre gli sprechi e gli scarti di produzione. Come abbiamo detto in precedenza, Audi è stato il primo produttore ad impiegare l'alluminio nella progettazione delle proprie vetture. Nel 2013 Audi entra a far parte del ASI (*Aluminium Stewardship Initiative*), organizzazione che ha sviluppato degli standard globali per la gestione dell'alluminio, con criteri ambientali e sociali lungo la filiera. Nel 2018 Audi è stata certificata da ASI come performance standard.

Per concludere, questo capitolo aveva l'obiettivo di dimostrare che l'industria dell'auto è un settore pioniere per quanto riguarda l'adozione di politiche e di modelli di economia circolare. Le imprese possono ottenere grandi vantaggi grazie alla creazione di valore sostenibile e si stima che le potenziali entrate dei modelli di business circolare per le aziende automobilistiche potrebbero raggiungere i 400-600 miliardi nel 2030 (Bompan, 2018). Tuttavia, la sfida dei prossimi anni richiederà alle imprese un grande impegno. Con la diffusione sempre maggiore dei veicoli elettrici, l'industria automotive dovrà considerare gli ingenti volumi di batterie che arriveranno alla fine della loro vita utile, le quali potranno essere un grande problema sociale ed ambientale se non smaltite e gestite correttamente.

CAPITOLO 3 – Panoramica generale sulle LIB

3.1 Introduzione alle batterie a ioni di litio

Una batteria è un dispositivo elettrochimico in grado di convertire l'energia chimica immagazzinata in energia elettrica in maniera efficiente e senza alcuna emissione di gas inquinanti. Proprio per questo motivo, le batterie sono utilizzate come forma di alimentazione delle auto di nuova generazione, in seguito ai sempre più severi standard di emissioni di CO₂ che i car-maker devono soddisfare.

Nello scenario odierno, i più grandi costruttori di auto al mondo sono alla ricerca di una tecnologia di batteria che possa garantire: economicità, efficienza nelle prestazioni e durata. Attualmente, il tipo di batteria che soddisfa queste fondamentali caratteristiche è la batteria agli ioni di litio, che d'ora in poi abbrevieremo con "LIB" (Lithium-Ion Battery). Le LIB furono sviluppate inizialmente dal chimico britannico M. Stanley Whittingham, ma le prime celle commercializzate apparvero nel 1991 da Sony, grazie a un team di sviluppo guidato da John B. Goodenough, il quale dopo innumerevoli ricerche sui materiali degli elettrodi e questioni di sicurezza, riuscì ad ottimizzarne le prestazioni e rendere i processi economicamente sostenibili (Blomgren, 2017).

Con l'avvento dei dispositivi elettronici degli ultimi dieci anni, l'attenzione del mondo scientifico verso nuove tipologie e tecnologie di LIB è cresciuta. L'impiego delle batterie a litio, infatti, passa da dispositivi portatili come smartphone, laptop fino ad applicazioni su larga scala come veicoli elettrici e sistemi di stoccaggio dell'energia. Questa rapida crescita è dimostrata anche dal loro tasso di produzione che è notevolmente aumentato negli anni. Nel 2011 erano state prodotte appena 4500 milioni di cellule LIB con un aumento stimato del 43% rispetto al 2008 (Bernhart, 2014). Nel 2015, almeno 5600 milioni di celle LIB sono state vendute in tutto il mondo (Pillot, 2016) e si prevede che la dimensione del mercato LIB aumenterà di un altro 10,6% dal 2016 al 2024, raggiungendo un valore di mercato di 56 miliardi di dollari entro il 2024 (Mohammadi, 2018). Per quanto riguarda le applicazioni negli EV, le vendite di LIB sono passate dai 5 milioni del 2015 a 7 milioni del 2020, e raggiungeranno i 180 milioni nel 2045 (Gao et al., 2018).

L'importanza di questi dispositivi di accumulo nella società odierna è dimostrata anche dall'assegnazione del premio Nobel per la chimica nel 2019 a John B. Goodenough, M. Stanley Whittingham e Akira Yoshino per lo sviluppo delle batterie agli ioni di litio.

Le batterie al litio al momento sono considerate le migliori tipologie di batterie, ma come vedremo nei capitoli che seguono, differiscono tra loro a seconda della chimica che viene utilizzata. In generale, tutte le tipologie di LIB presentano una serie di vantaggi: elevata densità energetica (120 Wh/kg) che la rende un prodotto leggero e dal design compatto, una migliore resistenza all'autoscarica, un ampio range termico ($-20/60$ ° C), una tensione di uscita più elevata, nonché la una lunga durata rispetto ad altri tipi di batterie. La ragione principale della loro maggiore durata è dovuta all'intercalazione degli ioni di litio negli elettrodi. Tuttavia, in questa reazione chimica, il litio subisce numerose reazioni collaterali riducendo così la concentrazione di litio per il processo di intercalazione e facendo diminuire la durata della batteria durante il suo ciclo di vita. Questi vantaggi tecnici rendono le batterie al litio le migliori candidate alla mobilità elettrica e sono diventata un'opzione promettente per la riduzione della CO₂. Tuttavia, il loro rapido tasso di utilizzo ha come conseguenza lo sfruttamento dei giacimenti minerari per fornire le materie prime necessarie per la loro produzione, causando il raggiungimento di livelli critici nell'estrazione di metalli preziosi e l'aumento dell'impronta ambientale associata. Nei capitoli successivi verrà svolta una panoramica generale delle LIB, dal loro funzionamento e composizione fino agli impatti economici e ambientali della loro produzione.

3.2 Funzionamento e composizione delle LIB

Lo scopo di una batteria è quello di immagazzinare e rilasciare energia elettrica, attraverso un flusso di elettroni che passa tra due elettrodi, uno positivo chiamato catodo e uno negativo chiamato anodo. Nel caso delle batterie agli ioni di litio, il funzionamento avviene in questo modo: durante la fase di scarica, gli ioni di litio si trasferiscono dall'anodo al catodo attraverso l'elettrolita e gli elettroni vengono trasferiti dall'anodo al catodo mediante circuito esterno; nella fase di carica, gli ioni di litio presenti nel catodo si trasferiscono all'anodo passando per l'elettrolita e gli elettroni vengono nuovamente trasferiti dal catodo all'anodo tramite un circuito esterno. Il passaggio di elettroni dall'anodo al catodo comporta un processo di intercalazione degli ioni di litio, il quale è responsabile della degradazione della batteria nel tempo.

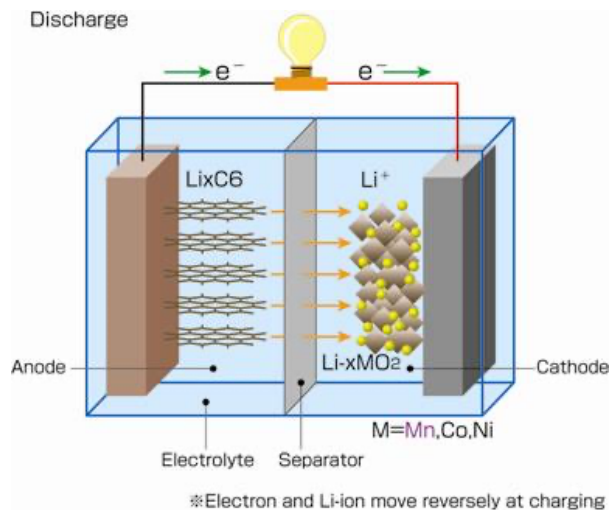


Figura 11 – Funzionamento di una LIB

Un pacco batteria di un EV è composto da due elementi: i moduli batteria e il sistema di gestione della batteria, chiamato anche Battery Management System (BMS). A sua volta, i moduli batteria sono costituiti da celle di batterie collegate in serie o in parallelo. Ciascuna cella di batteria è composta da quattro componenti principali: due elettrodi (anodo e catodo), un elettrolita e un separatore. Inoltre, sono presenti anche dei collettori di corrente, di solito costituiti in rame o alluminio, la cui funzione è quella di collegare i due elettrodi e favorire il moto degli elettroni dalla cella al circuito, evitando reazioni non desiderate.

Più dettagliatamente, i quattro componenti possono essere descritti:

- **Anodo:** è l'elettrodo negativo nel quale avviene una semi-reazione di ossidazione. Attualmente il materiale anodico maggiormente utilizzato nelle LIB è la grafite grazie al suo basso costo, abbondanza e alle sue proprietà elettrochimiche e l'espansione a basso volume durante la carica e scarica. La ricerca scientifica ha permesso di ottimizzare questo materiale ed è giunta al punto di massima capacità teorica e ci si possono aspettare solo miglioramenti incrementali.

Un altro materiale utilizzato è il LTO (litio titanio ossidato), il quale possiede un'elevata stabilità termica, sicurezza e durata. Tuttavia, il suo utilizzo è limitato a causa dell'elevato costo del titanio e l'inferiore densità energetica rispetto alla grafite. È stato dimostrato che l'aggiunta di piccole quantità di metalli, come ad esempio il silicio, può incrementare notevolmente la densità energetica complessiva. Di contro,

l'aggiunta eccessiva di questi componenti può andare a causare diversi problemi come le espansioni di volume e una minor durata.

- Catodo: è l'elettrodo positivo nel quale avviene una semi-reazione di riduzione. Si tratta della componente più importante della batteria, in quanto le differenti chimiche catodiche possono offrire più o meno potenzialità alla batteria. Inoltre, la presenza di materiali e minerali preziosi, lo rendono il componente più costoso. Nei capitoli successivi ci soffermeremo sulla questione della chimica del catodo, in quanto da essa dipendono molti fattori, quali ad esempio le prestazioni dell'auto elettrica. Inoltre, non è ancora stata trovata una chimica standard.
- Elettrolita: ha la funzione principale di trasportare gli ioni dall'anodo al catodo e viceversa, assicurando il minor numero possibile di reazioni collaterali del litio. Possiamo individuare diversi tipi di elettroliti per LIB, tra i più diffusi gli elettroliti liquidi e gli elettroliti polimerici. I primi vengono utilizzati in maniera efficace per una varietà di applicazioni della batteria. Possono essere costituiti da sali di litio disciolti in un unico o una combinazione di solventi organici come ad esempio, il carbonato di etilene o il carbonato di propilene. Gli elettroliti polimerici sono invece più diffusi nell'elettronica portatile, grazie alla loro leggerezza e flessibilità di forma della batteria.
- Separatore: ha lo scopo di tenere separati i due elettrodi per evitare cortocircuiti elettrici consentendo anche il trasporto dei portatori di carica ionica necessari per chiudere il circuito durante il passaggio di corrente in una cella elettrochimica (fonte Wikipedia). Ad oggi i materiali più usati nella produzione di separatori sono le membrane poliolefiniche, come polietilene e polipropilene, grazie alla loro economicità e buona stabilità meccanica e chimica (Heiskanen et al., 2019).

3.3 Tipologie di LIB

Come già anticipato, le LIB possono differenziarsi a seconda della chimica che possiedono, sia nell'anodo che nel catodo. Stabilito che la chimica anodica più utilizzata è la grafite, per via delle sue proprietà e caratteristiche che la rendono il candidato migliore e il materiale standard per la produzione di LIB, non è lo stesso caso per la parte catodica la quale influisce in maniera considerevole sulle caratteristiche finali del prodotto. Infatti, a seconda del catodo utilizzato possono variare diverse proprietà chiave, tra le quali, la densità energetica, la potenza, l'autonomia e il costo.

In letteratura sono presenti una moltitudine di articoli scientifici che analizzano e presentano le diverse chimiche catodiche. Le chimiche maggiormente utilizzate e prodotte dai car-maker possono essere riassunte in:

- **LiCO (litio-cobalto-ossigeno):** il catodo a base di cobalto è il più vecchio catodo prodotto per le LIB e ad oggi risulta essere anche il più venduto (Li M. et al., 2018). Viene utilizzato spesso nei dispositivi elettronici portatili, grazie alle sue caratteristiche che garantiscono una buona autoscarica ed un'elevata densità energetica. Tuttavia, presenta problemi legati ad una bassa stabilità termica, un elevato prezzo a causa del cobalto e una minore sicurezza.
- **LiMO (litio-manganese-ossigeno):** anche questo è un catodo abbastanza vecchio, introdotto per sostituire le LIB con cobalto per via del loro elevato costo. La chimica catodica a base di manganese, oltre ad essere economicamente conveniente, presenta alcuni vantaggi legati alla sicurezza e maggiore durata. Al momento viene utilizzata nel campo degli e-bikes e dei dispositivi portatili. Tuttavia, possiede una ridotta densità di energia, il che non la rende la candidata migliore per gli EV.
- **LiNCA (litio-nichel-cobalto-alluminio):** si tratta di un catodo relativamente nuovo, possiede migliori proprietà di densità energetica e ha una durata maggiore rispetto alle LCO, ma come svantaggio perde notevole capacità e stabilità ad alte temperature, il che la rende poco sicura (Itou et al., 2005). Al momento il più importante produttore di batterie NCA è Panasonic in collaborazione con Tesla, la quale le impiega nei propri veicoli (Purwanto et al., 2018).
- **LiNMC (litio-nichel-manganese-cobalto):** è la chimica più utilizzata nei veicoli elettrici grazie alla possibilità di variare le proporzioni tra i suoi componenti e la rendono estremamente versatile a seconda degli ambiti in cui viene utilizzata. Esistono varianti come NMC (1:1:1), NMC (5:3:2). La tendenza è quella di utilizzare di più il nichel, poiché fornisce maggiore densità di energia. È la stessa chimica che viene utilizzata in auto come: BMW i3, Audi e-tron, VW e-Golf, Renault ZOE, Nissan Leaf S Plus (Wangda Li et al., 2020).
- **LiFP (litio-ferro-fosfato):** possiede una lunga durata, maggiore sicurezza, basso costo e un ridotto impatto ambientale. Tuttavia, la sua elevata autoscarica e bassa energia specifica non la rende utilizzabile nel campo delle EV. Viene comunque

utilizzata nel settore degli e-bikes. Questo tipo di catodo viene spesso utilizzato assieme ad un anodo LTO per ottenere una durata complessiva della batteria migliore.

La scelta del catodo porta le case automobilistiche a compiere una serie di compromessi in termini di prestazioni e altri criteri chiave. La scelta del catodo influenza anche l'ammontare di impatto ambientale, poiché determinate batterie richiedono processi o materiali di produzione ad alta intensità di energia. In questo senso, le chimiche LiMO e LiFP sono le migliori, in quanto contengono materiali ancora abbondanti in natura e non tossici. Inoltre, la loro aspettativa di vita dovrebbe ammortizzare gli impatti di produzione su un più lungo periodo di tempo (Majeau-Bettez et al., 2011). Tuttavia, le tecnologie che contengono il cobalto sono le migliori in termini di densità energetica, caratteristica che risulta essere fondamentale negli EV, in quanto l'ansia da autonomia è ancora un grande ostacolo all'adozione degli EV. Per affrontare tale problema, i produttori dovrebbero offrire una batteria con una capacità superiore. Sebbene questo aumenti l'attrattiva dei consumatori, di contro c'è che aumenterebbero gli impatti derivanti dall'estrazione e lavorazione dei materiali. Infatti, il modo per aumentare la capacità della batteria è quella di aumentare semplicemente il numero di celle presenti nel pacco. Aumentando il numero di celle, aumenta proporzionalmente l'impatto ambientale di estrazione e lavorazione delle materie prime. Un altro modo per aumentare l'autonomia dei veicoli sarebbe quello di scegliere una chimica con una maggiore densità energetica. Dall'altro canto, gli attuali materiali che offrono una maggiore densità sono anche quelli che impattano maggiormente da un punto di vista di emissioni di gas serra e inquinanti atmosferici.

La LiNMC risulta, oggi, la tecnologia LIB più adatta e promettente per gli EV in futuro. Anche la LiNCA utilizzata da Tesla può essere un'ottima alternativa in quei casi in cui è richiesta una maggiore densità energetica a fronte di una ridotta durata.

Sebbene la tecnologia agli ioni di litio abbia compiuto enormi progressi negli ultimi decenni in termini di densità energetica, costi e ciclo di vita, ci sono ancora margini di miglioramento.

La ricerca scientifica è in corso per migliorare tutti i componenti chiave delle celle delle batterie: catodi, anodi ed elettroliti. Un esempio sono le nuove tecnologie "Cell-to-Pack" di CATL e "Blade Battery" di BYD che mirano a rimuovere le componenti intermedie del modulo, riducendo così i costi e aumentando la densità di energia fino al 20% (CATL, 2019; BYD, 2020).

Per il prossimo decennio, è probabile che le LIB domineranno il mercato dei veicoli elettrici, in quanto: 1) è una tecnologia ben consolidata e vi è una notevole esperienza nella sua produzione su larga scala e una solida conoscenza delle sue caratteristiche; 2) gli ingenti investimenti nella produzione di ioni di litio e nelle catene di fornitura costituiscono una barriera all'ingresso per tecnologie alternative; 3) tutte le tecnologie alternative sono ancora ad una fase di test di laboratorio, nessuna è stata utilizzata in condizioni reali in applicazioni per veicoli commerciali. Inoltre, una volta che una tecnologia raggiunge un livello di maturità che la rende potenzialmente disponibile, ci sarà un considerevole ritardo prima che inizi a penetrare nel mercato.

Tutti quei materiali chimici alternativi che non richiedono una sostanziale riconversione delle infrastrutture di produzione esistenti avranno una posizione privilegiata per sostituire le batterie agli ioni di litio. Al momento, le potenziali tecnologie in grado di sostituire le LIB in futuro sono: litio-zolfo, ione di sodio, litio-aria, anodo di litio allo stato solido (IEA 2020).

3.3.1 Valore economico e approvvigionamento dei materiali

La figura 12 mostra la percentuale di componenti presenti in una tipica batteria a litio, in questo caso una LIB con una chimica NMC. Come si può notare, catodo e anodo rappresentano da soli più del 40% dei componenti presenti nel pacco batteria. Da un punto di vista economico, il costo complessivo di un EV è attribuibile per circa il 40% alla batteria (ICESP, 2020). Come già anticipato, il catodo è la componente più costosa, per via della presenza di materiali preziosi di cui è composta. La presenza di materie prime scarse ed instabili come ad esempio il cobalto, comportano una volatilità dei prezzi che si riflettono sul costo finale della batteria.

La domanda di materiali per le LIB è aumentata considerevolmente negli ultimi anni. Secondo le stime, nel 2019 sono stati impiegati per la produzione di EV circa 19.000 tonnellate di cobalto, 17.000 di litio, 22.000 di manganese e 65.000 di nichel (IEA, 2020). Secondo le attuali previsioni, il fabbisogno di materiali nel 2030 potrebbe essere il seguente: 180 mila tonnellate di cobalto, 185 mila di litio, 177 mila di manganese e 925 mila di nichel.

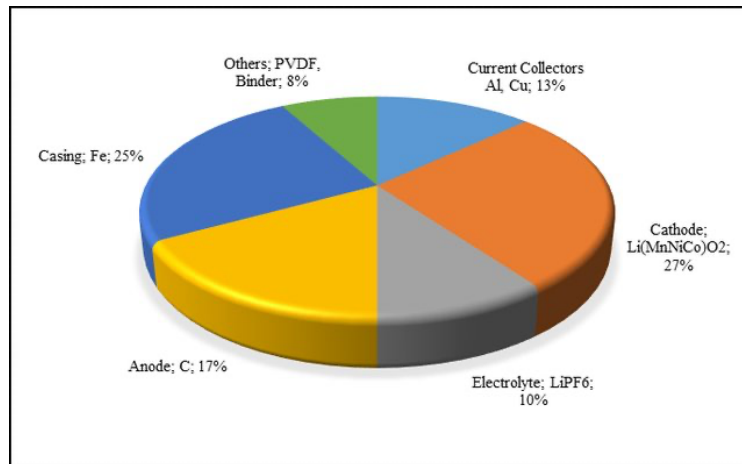


Figura 12 – Percentuale di componenti di una LIB (NMC)

Nel capitolo 2 è già stato illustrato l'impatto che i cosiddetti CRM e REE possono avere in termini di emissioni di GHG e impatto sulla salute umana. In questo capitolo, invece, andremo ad analizzare l'impatto economico, la disponibilità in natura e l'approvvigionamento dei principali materiali che compongono catodo e anodo di una LIB: litio, grafite, cobalto, nichel e manganese.

Litio

La più importante materia prima di cui è composta ogni LIB è il litio. Questo metallo ha visto una rapida espansione negli ultimi anni. Secondo diverse stime (U.S. Geological Survey, 2020), il suo utilizzo nel campo elettrochimico è passato dal 35% al 65% dal 2015 al 2019. Il litio è abbondantemente presente sulla crosta terrestre e nel mare, ma per questioni economiche, la sua estrazione avviene principalmente nelle salamoie e nei minerali. Per quanto riguarda l'estrazione nelle salamoie, avviene principalmente in Sud America, nel cosiddetto "Triangolo del Litio" tra Cile, Bolivia e Argentina. Questi tre stati assieme alla Cina detengono il 70% delle riserve di salamoie di litio nel mondo (Stampatori et al., 2020).

Il litio non è una risorsa a rischio di esaurimento, infatti, le riserve disponibili nel mondo ammontano a circa 80 milioni di tonnellate (U.S. Geological Survey, 2020). È necessario però, considerare il fatto che la richiesta di litio nei prossimi anni sarà esponenziale se il mercato dell'auto elettrica si espanderà definitivamente. Questo porterà ad una possibile carenza temporanea, derivante dall'incapacità di estrazione e raffinazione di quantità necessarie a soddisfare la domanda del settore. Questo problema riguarderà in primis i paesi produttori di batterie, i quali hanno già stretto accordi per garantire una catena di approvvigionamento continua, diversificata e sicura.

A fronte della continua domanda di litio, molte imprese hanno studiato l'estrazione di litio nell'acqua di mare. Infatti, nel mare si dissolvono circa 230 miliardi di tonnellate di litio che potrebbero essere recuperate mediante processi di elettrolisi a energia solare, ottenendo così un vantaggio rispetto ai metodi tradizionali, in quanto si produrrebbe direttamente litio metallico e di conseguenza si rinunciarebbe al trattamento richiesto per l'estrazione del minerale.

Grafite

Il materiale più utilizzato nell'anodo di una LIB è la grafite. Questo minerale è un derivato del carbonio, utilizzato abbondantemente per via delle sue caratteristiche elettrochimiche. Con circa il 60% della produzione nel 2019, la Cina è il maggior produttore nel mercato della grafite naturale (U.S. Geological Survey, 2020). La grafite è altamente presente in natura e il suo processo estrattivo non pone grosse difficoltà. Per tali motivi, la grafite non suscita grosse preoccupazioni né sul costo, né sulla possibilità di un mercato monopolizzato da pochi paesi. Inoltre, la grafite può essere anche prodotta sinteticamente. Tuttavia, questo procedimento non è ancora economicamente ed energeticamente conveniente, con costi quasi dieci volte superiori rispetto alla estrazione di grafite naturale (U.S. Geological Survey, 2020).

Cobalto

Il cobalto è un materiale che viene impiegato prevalentemente nella produzione di batterie. Infatti, quasi il 50% del cobalto prodotto nel mondo viene utilizzato nel settore delle batterie. Il cobalto è considerato una risorsa critica per diversi aspetti. In primo luogo, più del 50% delle sue riserve, che ammontano a circa 7 milioni di tonnellate, sono presenti nella Repubblica Democratica del Congo, nazione politicamente instabile, la quale è anche la prima produttrice al mondo con una quota del 70% (U.S. Geological Survey, 2020).

In secondo luogo, il cobalto è un sottoprodotto di rame e nichel, quindi la sua produzione e il suo prezzo dipendono da questi mercati. Tuttavia, il suo elevato prezzo permette un'estrazione economicamente vantaggiosa per le compagnie minerarie. La determinante del suo prezzo risiede nella centralità di pochi paesi, come il Congo, nella catena di approvvigionamento, con un inevitabile aumento incontrollato dei prezzi. Tra il 2015 e il 2018 il prezzo del cobalto è triplicato assestandosi a 78.000 \$/Tonnellata (ICESP, 2020).

Nel 2019 si è assistito ad una sensibile riduzione del prezzo, dovuto all'entrata nel mercato di un maggior numero di fornitori e ad un progressivo cambio di batterie a ridotto contenuto di cobalto.

In questo contesto, la Cina assume un ruolo fondamentale, in particolare nella raffinazione del materiale con una quota del 46% del cobalto prodotto nel mondo. Inoltre, il governo cinese ha avviato una campagna di investimenti in africa, arrivando a controllare il 29% della produzione mineraria (Gulley et al., 2019). In questo modo, il governo cinese si è tutelato da eventuali problemi nella catena di approvvigionamento.

Nichel

Un altro importante metallo è il nichel. Il suo mercato ha subito una crescita grazie al suo impiego nella produzione di batterie a litio. Per scopi elettrochimici, è possibile utilizzare solamente nichel con una purezza del 99,8%, la cui produzione è economicamente vantaggiosa solo da minerali di solfato di nichel (Stampatori et al., 2020). La sua produzione avviene in maniera localizzata in poche aree del mondo, principalmente Filippine ed Indonesia. La disponibilità di riserve di nichel è abbondante e non può essere considerata una risorsa critica come il cobalto. Tuttavia, non si può escludere una simile problematica. Infine, è necessario specificare che la produzione di nichel causa elevati impatti in termini ambientali, causando una grossa impronta ambientale nelle zone di estrazione e raffinazione.

Manganese

Infine, il manganese è un materiale fortemente legato alla produzione di acciaio. Le sue riserve sono localizzate principalmente in Sud Africa e Australia e ammontano a circa 810 milioni di tonnellate. La sua raffinazione avviene principalmente in Cina e Ucraina. Grazie alla sua elevata disponibilità il prezzo del manganese non ha subito grosse variazioni, mantenendosi sostanzialmente stabile. Anche per questi motivi il manganese non è considerato un materiale critico nella *supply chain* (Wentker et al., 2019).

3.4 Produzione delle LIB

Secondo i dati riportati da BloombergNEF, la produzione di batterie a ioni di litio si è attestata nel 2019 a circa 316 GWh. Con una quota del 73% della capacità, la Cina si attesta come leader indiscusso, seguita da gli USA con il 12%. Il mercato asiatico, grazie alle

politiche dei governi che hanno incentivato gli investimenti, è da sempre leader nel settore. Nel 2015 Cina, Giappone e Corea del Sud controllavano l'88% della capacità produttiva mondiale e buona parte dei processi necessari per la lavorazione dei suoi materiali (Lebedeva et al., 2016). Gli Stati Uniti sono passati negli ultimi anni dalla quarta alla seconda posizione tra i maggiori produttori di LIB. Questo dovuto in larga parte a Tesla che grazie alle sue "Gigafactories", ovvero grandi impianti produttivi per le batterie dei suoi veicoli, rappresenta l'89% delle batterie prodotte nel suolo americano, pari a circa 25 GWh nel 2016. Infine, per quanto riguarda l'Europa, nel 2016 occupava appena l'1,6% della produzione mondiale, passando al 3% nel 2018, grazie a diversi investimenti dei grandi colossi del settore. Secondo diverse stime, entro il 2023 l'UE potrebbe superare gli Stati Uniti per numero di batterie prodotte (IEEFA, 2019).

Si prevede che la capacità globale crescerà notevolmente nel prossimo futuro: entro il 2025 sono previsti 1211 GWh secondo BloombergNEF, mentre Avicenne Energy (2019) prevede 1200 GWh di batterie agli ioni di litio vendute nel 2030.

Nel 2019 i principali player nella produzione di batterie a litio erano: LG Chem, CATL, BYD, Panasonic e Tesla (Benchmark Mineral Intelligence, 2019).

La prima compagnia produttrice al mondo è la sudcoreana LG Chem con una capacità nel 2018 di circa 51 GWh. La LG è stata una delle aziende più aggressive nella sua espansione con ben 5 megafactories in tre continenti.

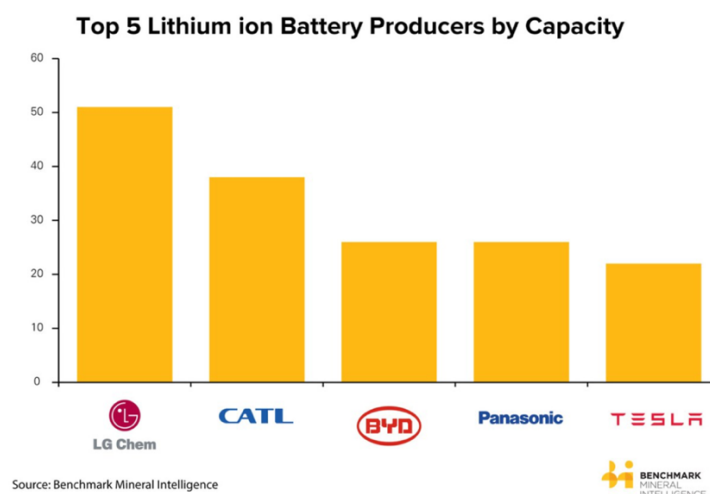


Figura 13 – Maggiori produttori di LIB per capacità

Al secondo e al terzo posto troviamo le cinesi CATL e BYD con una capacità produttiva rispettivamente di 40 e 25 GWh. Entrambe le aziende sono in espansione e prevedono l'apertura di nuovi stabilimenti nel mondo.

Infine, troviamo i produttori Panasonic e Tesla che devono essere menzionati insieme, in quanto hanno stretto una delle più grandi joint-venture automobilistiche fino ad oggi. I due colossi hanno collaborato assieme nella costruzione della Tesla Gigafactories 1, di cui Panasonic è azionista, che al momento si attesta come il più grande impianto di produzione di batterie a litio al mondo con una capacità di 22 GWh nel 2018.

Al di fuori delle Gigafactories, Panasonic gestisce quattro impianti in Giappone che globalmente forniscono una capacità di circa 20 GWh. Inoltre, è da sottolineare come Panasonic abbia stretto un'ulteriore collaborazione nel 2019 con Toyota, secondo produttore di auto al mondo. Questa joint-venture prevede lo sviluppo di batterie a litio allo stato solido e altre tecnologie di nuova generazione per l'industria automobilistica.

Per quanto riguarda le tipologie di LIB prodotte, la domanda nel 2018 è stata circa di 350.000 tonnellate, di cui il 41 % batterie con chimica NMC.

Secondo le previsioni di Avicenne Energy 2019, nel 2030 la domanda di LIB nel mondo ammonterà a più di 1,6 milioni di tonnellate, il 75% delle quali prodotte dalla Cina.

Cathode active materials for LIB in Tons, 2010-2018 (Demand)

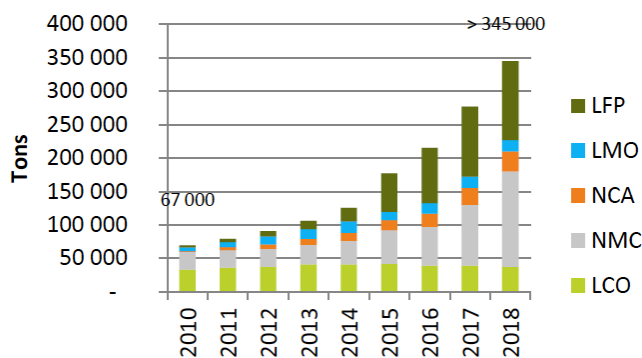
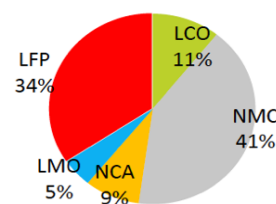


Figura 15 – Domanda di materiali catodici per LIB al 2018

Cathode active materials in 2018 350 000 Tons



Cathode active materials in 2030 1 670 000 Tons

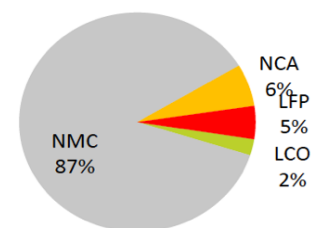


Figura 16 - Domanda di materiali catodici per LIB al 2018 e Previsione di materiali catodici al 2030 (Diagramma a torta)

Cathode active materials 2000-2030 - Tons

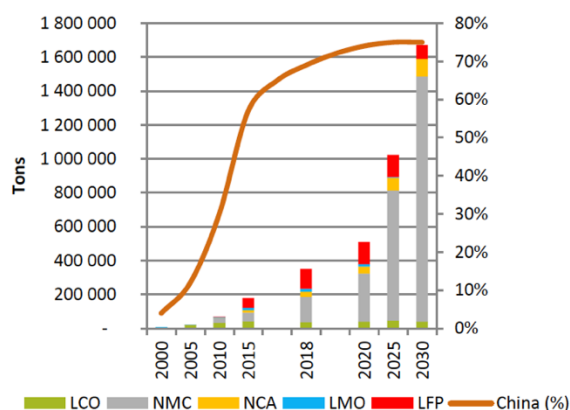


Figura 14 – Previsione di materiali catodici per LIB al 2030

3.4.1 Costi di produzione

Per valutare il costo delle LIB occorre utilizzare un'unità di misura specifica, ovvero, il costo medio necessario per produrre un kWh. In letteratura ci sono diversi modelli utilizzati per il calcolo del costo di una batteria, ma il più diffuso è quello che viene chiamato "*Battery and Performance Cost Model*" (BatPaC) (Duffner et al., 2020). Questo modello, introdotto nel 2011 dall'Argonne National Laboratory, permette di valutare il costo di una batteria a seconda dei materiali utilizzati e dal suo design. I costi prima di tutto devono essere distinti in: variabili e fissi. I costi variabili sono associati al costo delle materie prime e alla manodopera, i costi fissi sono legati ai costi GSA (generals, sales and administration), costi di R&S e costi di ammortamento. I limiti di questo modello sono l'esclusione dal computo dei costi, dei processi di estrazione e raffinazione dei materiali. Per questo motivo è necessario utilizzare assieme al modello BatPaC anche altri modelli di costo focalizzati esclusivamente su parti del processo produttivo.

I fattori che incidono maggiormente sul costo di una LIB sono le componenti della cella, che rappresentano mediamente il 70% del costo totale di una batteria. All'interno della cella sono invece i materiali attivi del catodo a pesare sull'elevato costo, a causa dell'alta volatilità dei prezzi delle materie prime. Per esempio, tra il 2017 e il 2018, il prezzo del cobalto era passato da 35 a 95 \$/Kg, causando un aumento del costo delle batterie LIB con chimica NMC del 40/60%.

Secondo i dati attuali (BloombergNEF, 2019), si stima che entro il 2030 il mercato delle batterie raggiungerà i 116 miliardi di dollari, senza tener conto degli investimenti nella supply chain. Questi risultati saranno dovuti ad una incrementale crescita nella produzione di batterie, causata da una maggiore diffusione di EV e alla nascita di nuovi impianti (*Gigafactories*), grazie al quale si otterranno maggiori economie di scala. Una produzione su larga scala permetterà di ammortizzare i costi dei materiali per cella e diluire tutti i costi fissi. Tutto questo porterà la riduzione dei prezzi delle batterie. I risultati sono già visibili, come si può notare in figura 17. Dal 2010 al 2018 il prezzo delle batterie è diminuito dell'85% attestandosi a un prezzo medio di 176 \$/kWh. Tra il 2018 e il 2019 il costo di produzione di una LIB era stimato tra i 100 e i 150 kWh (Duffner et al., 2020). Non è tutto, secondo le attuali previsioni il prezzo delle LIB scenderà ulteriormente nei prossimi anni fino a raggiungere i 94 \$/kWh nel 2024 e i 62 \$/kWh nel 2030.

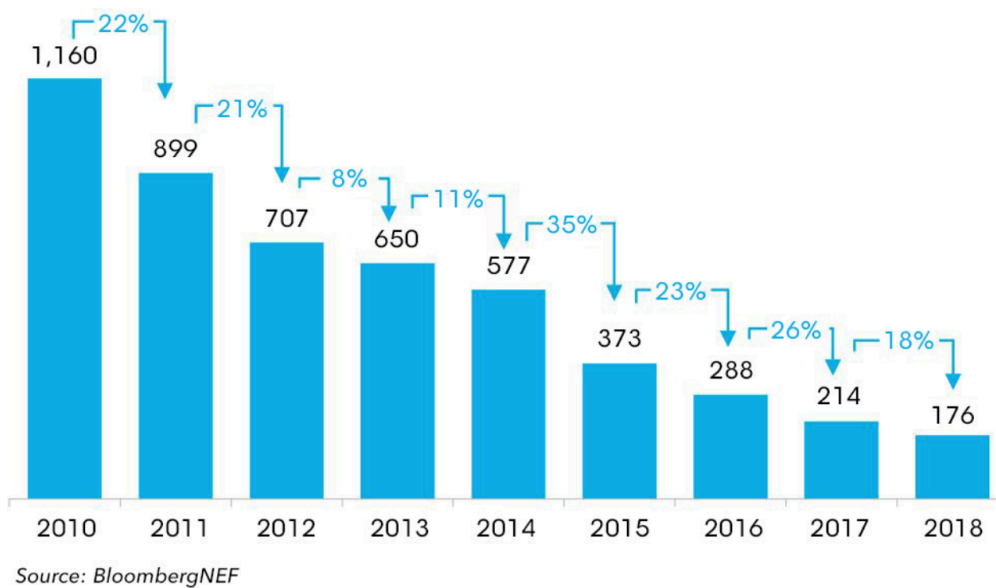


Figura 17 – Riduzione del prezzo medio delle LIB dal 2010-18

Infine, di rilevante importanza sono gli impatti che i diversi approcci di economia circolare, come riciclo e riutilizzo, possono avere sui costi di produzione e più in generale sul prezzo finale delle batterie. Questi aspetti verranno discussi in maniera più dettagliata nel capitolo 4.

3.4.2 Impatto ambientale della produzione

Come accennato nel capitolo 2, la catena produttiva delle batterie a litio è piuttosto complessa e i suoi impatti ambientali incidono in modo pesante sul ciclo di vita di un veicolo elettrico. La produzione di una LIB richiede una ventina di materiali differenti, ognuno dei quali necessita di più fasi di estrazione, lavorazione e raffinazione. Occorre sottolineare che molte di queste fasi avvengono in luoghi differenti, di conseguenza la scelta del mix energetico è fondamentale per i risultati dell'analisi ambientale, in particolare per i processi ad alta intensità energetica. È stato evidenziato (Hao et al., 2017) che l'uso di elettricità rappresenta circa il 40% di tutte le emissioni di GHG del processo di produzione.

Nello studio condotto da Philippot et al., (2019), si dimostra che vi è una correlazione diretta tra l'impatto causato dalla produzione di energia in un paese e quello della produzione di una batteria nel suo territorio. Nella figura 18 si può notare che nei paesi in cui la produzione di energia è più inquinante, l'impatto delle batterie sarà maggiore. Inoltre, se andiamo a confrontare le emissioni di CO2 emesse dai processi produttivi dei primi due paesi produttori, Cina e Stati Uniti, si può evidenziare che le LIB cinesi (NMC,

LFP e LMO) sono fino a 3 volte più impattanti delle controparti americane (Hao et al., 2017).

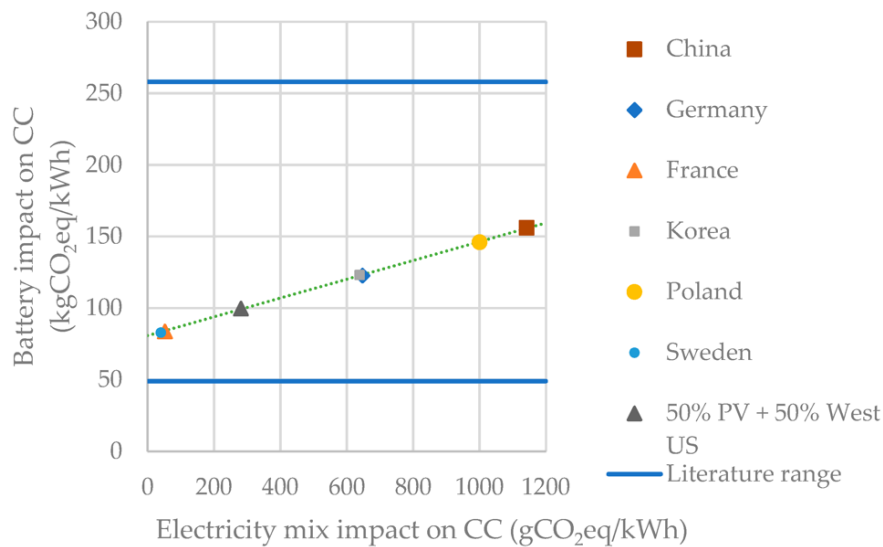


Figura 18 – Impatto di CO₂ in base al mix elettrico

Anche la variabilità delle soluzioni catodiche, delle configurazioni delle celle e dei pacchi batterie hanno un forte impatto sull'impronta ambientale totale delle LIB. È stato dimostrato (Ciez et al., 2019) come, per lo stesso mix energetico considerato, differenti chimiche e configurazioni della batteria corrispondono a differenti emissioni di GHG. Ad esempio, se si considera la configurazione cilindrica, la chimica NMC ha un'emissione media più bassa (36 kg di CO₂/KWh) mentre quella NCA è più alta (49 kg di CO₂/KWh).

Un altro fattore da considerare quando si parla di oneri ambientali della produzione di batterie è il beneficio che le economie di scala possono apportare. Se è vero che aumentare la capacità produttiva di un impianto permette di ottenere vantaggi economici dovuti alla diluizione dei costi, allo stesso modo aumentare il volume di produzione permette di ridurre la quantità di emissioni per KWh prodotto. Questa differenza è particolarmente evidente negli impianti di piccole dimensioni. Se ci sposta in un impianto di grandi dimensioni, il beneficio è presente, ma molto meno evidente. Per esempio, aumentare la capacità produttiva annuale di un impianto da 17 GWh a 35 GWh, consente di abbassare di circa il 6% le emissioni prodotte per KWh (Philippot et al., 2019).

CAPITOLO 4 – End-of-Life delle LIB

4.1 End-of-Life LIB

Sulla base dei dati riportati dell'International Energy Agency (IEA) 2020, si stima che entro il 2030 tra i 100 e i 120 GWh di batterie saranno ritirate, un volume approssimativamente equivalente all'attuale produzione annuale di batterie. L'assenza di misure efficaci per far fronte a tali volumi può diventare un problema ambientale significativo. Si parla quindi di strumenti di End-of-Life (EoL), cioè di misure che hanno l'obiettivo di trattare il fine vita di un bene.

Per le sue caratteristiche particolari è evidente che la batteria non può essere trattata o smaltita normalmente indirizzandola semplicemente in discarica. Abbiamo già visto nel capitolo 2 quali potrebbero essere gli impatti ambientali della collocazione in discarica. Proprio per questi motivi, le azioni volte a favorire l'approccio di economia circolare possono aiutare a gestire in maniera efficiente questi rifiuti. Uno degli obiettivi chiave dell'approccio circolare è proprio quello di ridurre la dipendenza dalle risorse naturali scarse e critiche, massimizzando l'utilità dei materiali già in uso.

I principali strumenti di economia circolare che vengono impiegati nel EoL delle batterie al litio sono il riutilizzo e il riciclo. Il primo ha l'obiettivo di rallentare il ciclo delle risorse estendendo la vita dei prodotti. Il secondo, invece, si pone l'obiettivo di chiudere il loop di risorse.

Questi due processi sono complementari fra di loro e il più grande vantaggio di sostenibilità può essere raggiunto se le batterie degli EV vengono prima riutilizzate e poi riciclate. Tuttavia, il riutilizzo della batteria ritarda l'ingresso nel circuito del riciclaggio, impedendo il recupero di materiali critici e limitando lo sviluppo di un'industria del riciclaggio che richiede volumi maggiori di rifiuti per operare in maniera redditizia su larga scala. Per questo motivo, non vi è accordo sul fatto che la gerarchia dei rifiuti sia appropriata nel caso delle batterie degli EV.

Da un punto di vista normativo l'End-of-life delle batterie è trattato, a livello europeo, dalla direttiva sulle pile e accumulatori 2006/66/CE. La normativa introduce il concetto di "*Extended Producer Responsibility*" (EPR), ovvero, la responsabilità estesa del

produttore. Tale nozione è stata introdotta la prima volta dall'accademico svedese Thomas Lindhqvist nel 2000, il quale ha definito l'EPR come un approccio di politica ambientale in cui la responsabilità di un produttore per un determinato prodotto è estesa alla fase post-consumo e quindi al termine del ciclo di vita del bene (OECD, 2001).

La finalità della direttiva era quella di focalizzare l'attenzione sull'intero ciclo di vita in fase di progettazione e di ottimizzare il recupero delle risorse, riducendo fin dall'inizio gli sprechi. Tuttavia, il regolamento non incorpora i recenti sviluppi tecnologici e gli obblighi di responsabilità estesa del produttore non sono chiari. Per tali ragioni, la direttiva sulle batterie è in fase di revisione, con l'obiettivo di favorire la creazione di una mobilità sostenibile e circolare.

Un ulteriore regolamentazione a livello europeo è la direttiva quadro 2008/98/CE che sancisce nuovamente la responsabilità estesa del produttore nella gestione dei rifiuti.

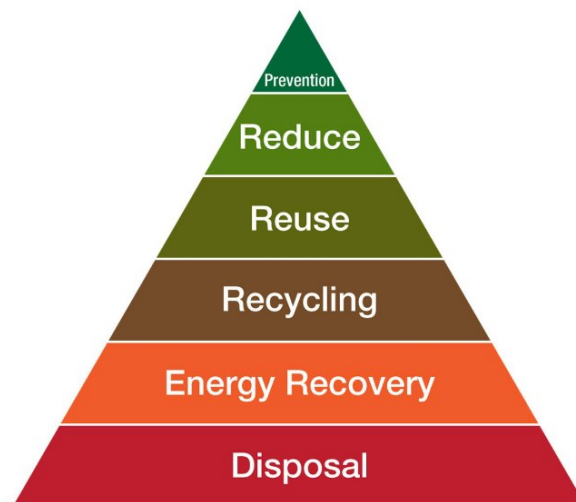


Figura 19 – Gerarchia nella gestione e trattamento dei rifiuti

All'articolo 4 della suddetta direttiva viene istituito il principio della gerarchia di trattamento dei rifiuti (*The Waste Management Hierarchy*), con il quale si va a stabilire che la corretta gestione del rifiuto deve seguire e rispettare una precisa gerarchia di azioni che segue un ordine basato sulle priorità e sulla sostenibilità ambientale. In questo modo, come si può notare in figura 19, la scala gerarchica vede al primo posto la prevenzione dei rifiuti e all'ultimo gradino lo smaltimento in discarica.

Prima di procedere con la descrizione del riciclo e del riutilizzo è bene andare a spiegare quale possono essere le cause che portano una batteria a degradarsi. Tra i principali fattori che causano il normale degrado della batteria vi sono:

- Temperatura: l'esposizione a temperature estreme accelera il degrado della batteria riducendone la durata. Questo impatto è più evidente nei climi caldi piuttosto che freddi (Neubauer et al., 2015). La sensibilità al calore può essere mitigata dotando le batterie di un sistema di gestione termica (es. Raffreddamento). I primi BEV di solito non erano dotati di gestione termica, che è uno dei motivi per cui i veicoli più recenti hanno una maggiore durata della batteria;
- Schema di carica e scarica: è probabile che l'utilizzo ripetuto dell'intera capacità di una batteria (ovvero un'elevata profondità di scarica) e il caricamento e scaricamento rapido (ovvero un elevato tasso C) riducano le prestazioni della batteria;
- Tempo: le prestazioni diminuiranno nel tempo a causa dei processi chimici passivi e delle condizioni ambientali, un processo denominato degradazione del calendario.

4.1.1 Riciclaggio delle LIB

Il processo di trattamento di fine vita degli EV prevede prima di tutto lo smontaggio e la separazione delle componenti che sono considerate pericolose. Tra queste, vi rientrano le batterie a litio. Con la direttiva sulle batterie (2006/66/CE) si mira a ridurre al minimo l'impatto delle batterie e dei rifiuti associati sull'ambiente stabilendo una serie di requisiti su come esse devono essere riciclate. Originariamente la direttiva era stata sviluppata per le batterie al nichel-cadmio e al piombo-acido. Infatti, ai sensi della direttiva, le batterie a litio degli EV rientrano nella categoria delle "batterie industriali", in cui non è previsto un obiettivo di raccolta, ma solo l'obbligo di trattamento e un requisito di riciclaggio del 50% del peso (Commissione Europea, 2006). Al contrario, vengono stabiliti elevati livelli di efficienza per le batterie al piombo-acido o al nichel-cadmio, favorendo così il recupero di metalli di base. Tuttavia, non si promuove il riciclaggio di metalli scarsi o di EER (earth elements rare) che causano un impatto ambientale elevato e che rappresentano il principale fattore economico del riciclo delle LIB. L'elevato prezzo di metalli come il cobalto e il nichel rappresenta così il driver dei processi di riciclo. Anche per questi motivi, la direttiva europea sulle batterie è in fase di revisione (Mossali et al., 2020) per far fronte alla crescita esponenziale del mercato delle LIB e le sue peculiari caratteristiche durante i processi di riciclo. A seguito di ciò, sarà necessario approfondire l'intero panorama sul riciclo delle batterie al litio esauste: dal mercato ai principali processi; i player; le barriere; le sfide che si dovranno sostenere e gli impatti ambientali.

4.1.1.1 Il mercato del riciclo

La crescita del mercato degli EV e la produzione di LIB impone la domanda di infrastrutture e strategie per la gestione dei rifiuti e il recupero dei metalli preziosi del catodo. Il mercato del riciclo delle batterie a litio è in rapida espansione, solo nel 2018 sono stati riciclati quasi 100.000 tonnellate di batterie nei diversi campi di utilizzo, dai telefoni e PC, fino alle auto elettriche. Secondo le stime (Richa et al., 2014), tra il 2015 e il 2040 potrebbero essere generate fino a 4 milioni di tonnellate di LIB da batterie per veicoli elettrici. Queste stime si basano sulle diverse proiezioni di vendita degli EV e sulla durata dei pacchi batteria stimata in media sui 8-10 anni.

Il mercato asiatico, così come per la produzione di LIB, risulta essere il primo al mondo anche nel riciclo di LIB. Con 67.000 tonnellate riciclate nel 2018, la Cina si conferma leader di mercato davanti alla Corea del Sud (18.000 tonnellate). Seguono, l'Europa, il Giappone e gli Stati Uniti (Circular Energy Storage, 2019). Tuttavia, circa l'80% delle batterie riciclate proviene da dispositivi portatili. Inoltre, le attuali stime sono approssimative in quanto i riciclatori tendono ad accumulare le batterie sfruttando i picchi dei prezzi.

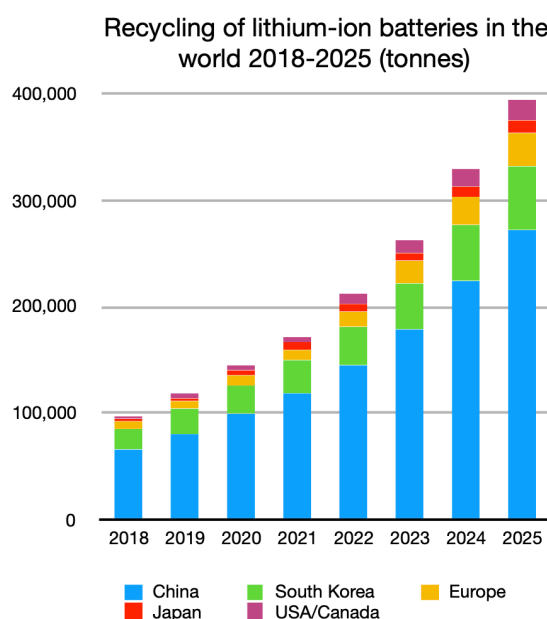


Figura 20 – Riciclo delle LIB nel mondo dal 2018-2025

Il settore del riciclo di LIB è caratterizzato da un contesto molto variegato, in rapida evoluzione e cambiamento. Non sono molti i player che operano in questo mercato, ma sono diverse le tecnologie che vengono impiegate nei processi di recupero, le quali si differenziano sulla base di efficienza del prodotto riciclato.

Seppur in rapida crescita, al momento il riciclaggio non è paragonabile a livello della produzione. Oggigiorno, il divario fra riciclaggio e produzione rappresenta una fonte

inutilizzata di materiali preziosi. Oltre a rappresentare una perdita economica diretta e un rischio ambientale, questo divario si traduce in un maggior bisogno di materie prime vergini, con impronta ambientale associata (Wang et al., 2014).

Secondo lo studio condotto da Melin (2019), l'industria del riciclo ha attualmente una capacità di trattamento superiore rispetto ai volumi di batterie effettivamente trattati. Si parla di "overcapacity", determinata da fattori, quali la mancanza di sistemi efficienti per la raccolta delle batterie o dovuto ad una carenza nella progettazione delle batterie che non permette il facile recupero.

4.1.1.2 Processi di riciclo

Il processo di riciclaggio delle LIB prevede la combinazione di due fasi principali:

1. Processo meccanico → si tratta di un processo che prevede il pretrattamento della batteria, mediante la sua disattivazione, lo smontaggio, la frantumazione e separazione. In questa fase, l'obiettivo è rendere innocua la batteria da eventuali esplosioni o incendi, e scindere i diversi materiali che dovranno poi passare alla fase successiva.
2. Processo metallurgico → è la fase di raffinazione ed estrazione dei materiali contenuti nella batteria. Questo processo può essere attuato mediante processi pirometallurgici, idrometallurgici e biometallurgici.

Processo meccanico

Il pretrattamento consiste prima di tutto nello smontaggio e nella disattivazione della batteria. Lo smontaggio è una fase che richiede tempo e notevoli costi a causa della complessità delle batterie esauste, visto che un pacco batteria di un EV può arrivare a contenere più di 1000 celle. (Yun et al., 2018).

Attraverso la fase di smontaggio si generano parti metalliche, plastiche e altri componenti elettronici che possono seguire un loro percorso di riciclo indipendente. Per far fronte al considerevole numero di batterie esauste dei prossimi anni e per migliorare l'efficienza nel processo di smantellamento sarà necessaria una sequenza di smontaggio adeguata. Secondo i risultati di Wegener et al. (2015), l'efficienza della postazione di lavoro migliorerà grazie a processi automatizzati e ad una migliore collaborazione tra lavoratori e robot intelligenti.

Per quanto riguarda la disattivazione della batteria, la sua funzione è quella di impedire il trasferimento di componenti critici o pericolosi alle fasi successive ed evitare il rilascio di emissioni tossiche nell'ambiente. La disattivazione o bonifica della batteria avviene:

- Processo di scarica → è un metodo che va ad abbassare il contenuto di energia elettrochimica della batteria. Questo metodo è spesso usato nei processi di riciclo che prevedono lo smontaggio e la separazione meccanica. Le celle elettrochimiche vengono scaricate mediante immersione in soluzioni saline, in polveri di conduttori metallici o in grafite (Pinegar et al., 2020).
- Trattamento termico → avviene mediante processi di pirolisi o calcinazione e rimuovono facilmente i componenti elettronici infiammabili e abbattano i componenti organici. Questi processi termici, di contro, decompongono parzialmente alcuni componenti come il separatore e il legante dei reinvestimenti metallici degli elettrodi.

Come ultime fasi di pretrattamento delle batterie, si prevede la frantumazione dei componenti della cella con il fine di separarli in frazioni definite.

La fase di frantumazione include il controllo delle dimensioni per influenzare l'adattabilità e l'efficienza delle tecnologie di separazione fisica. Le batterie a bassa capacità vengono frantumate in atmosfera protetta a base di gas come CO₂, azoto, argon o elio, oppure in acqua o soluzione saline (Werner et al., 2020).

Per quanto riguarda la separazione, può avvenire attraverso processi di separazione magnetica, per gravità o con tavoli oscillanti pneumatici, nonché la flottazione. I materiali elettrodi recuperati con metodi meccanici e fisici sono una miscela multicomponente che necessita di essere raffinata ulteriormente mediante un processo metallurgico al fine di ottenere prodotti ad elevata purezza.

Processo metallurgico

I processi metallurgici possono essere classificati in: pirometallurgici, idrometallurgici e biometallurgici.

- Processo pirometallurgico: Questo metodo è quello attualmente più utilizzato al mondo e prevede l'utilizzo di elevate temperature (comprese tra gli 800 e 1250 C°) per recuperare in maniera efficiente i materiali metallici. Durante il processo di

fusione si viene a formare una lega di metalli composta da rame, cobalto, nichel e ferro. Le scorie del processo invece sono composte da litio, manganese, alluminio, silicio, ma il riciclo di alluminio o litio dalle scorie non è né economico, né ad alta efficienza energetica. Pertanto, in genere le scorie vengono utilizzate come materiali di riempimento, ad esempio nella costruzione delle strade o nel calcestruzzo, oppure vengono conferite in discariche.

Tale processo ha il vantaggio di riciclare efficacemente materiali come il rame, nichel e cobalto, inoltre, molti potenziali pericoli vengono minimizzati grazie alla fusione ad alte temperature. Di contro, gli svantaggi sono molti, a partire dall'elevato consumo di energia, limitata efficienza di riciclo, perdita di materiali importanti.

- Processo idrometallurgico: Questo tipo di processo a differenza del precedente prevede il recupero dei materiali e dei metalli preziosi delle LIB mediante un processo di lisciviazione con acidi. Queste operazioni vengono generalmente eseguite con acido cloridrico, solforico o nitrico a temperature non elevate (60 C°). Successivamente, le soluzioni sono sottoposte a procedure di separazione e purificazione completate tramite operazioni che riescono ad isolare e concentrare i metalli interessati. Queste operazioni possono essere: estrazione con solvente, precipitazione, scambio ionico e l'elettrodeposizione. Tra queste, la più utilizzata è la precipitazione, in quanto offre elevate rese di purezza dei metalli ottenuti, oltre ad usare reattivi che hanno un minor impatto rispetto alle altre.

In generale, i vantaggi rappresentati dai processi idrometallurgici sono: elevata purezza dei prodotti finali, recupero efficiente dei metalli, basso consumo energetico, limitate emissioni ambientali e flessibilità e modularità degli impianti. La sfida principale della lisciviazione acida è la selettività: durante il processo vengono sciolti anche altri metalli e ioni, rendendo più difficile la separazione dei materiali target. Un altro problema significativo dell'idrometallurgia è la forte dipendenza dai pretrattamenti, in grado di separare la polvere catodica da lisciviare. I risultati potrebbero variare molto a seconda delle tecnologie utilizzate nei passaggi precedenti (Mossali et al., 2020).

- Processo biometallurgico: Questo processo di recupero prevede l'utilizzo di batteri o funghi per recuperare i metalli preziosi all'interno delle batterie a litio. Questo approccio è già stato utilizzato con successo nell'industria mineraria, e si pone come tecnologia di recupero complementare ai processi piro e idrometallurgici.

La biometallurgia si distingue in due aree: la biolisciviazione ed il bioassorbimento. La biolisciviazione è stata applicata con successo nel recupero di metalli da solfuri metallici mediante reazioni battericamente assistite. L'estrazione di metalli come cobalto, nichel, piombo e zinco da minerali solfurei mediante biolisciviazione è quindi tecnicamente fattibile. Il bioassorbimento è un processo in cui possono essere utilizzati organismi sia viventi che non viventi. Si tratta, infatti, di un'interazione passiva fisico-chimica tra i gruppi superficiale carichi del microrganismo e gli ioni in soluzione. Numerosi microrganismi, compresi alghe, batteri, lieviti e funghi, sono noti per la loro capacità di accumulare attivamente metalli pesanti e metalli preziosi. Questi processi di bioassorbimento offrono vantaggi legati ad una riduzione dei costi di gestione, una minimizzazione del volume di sostanze chimiche o di fanghi biologici da manipolare ed alta efficienza nella decontaminazione degli effluenti (De Angelis, 2014).

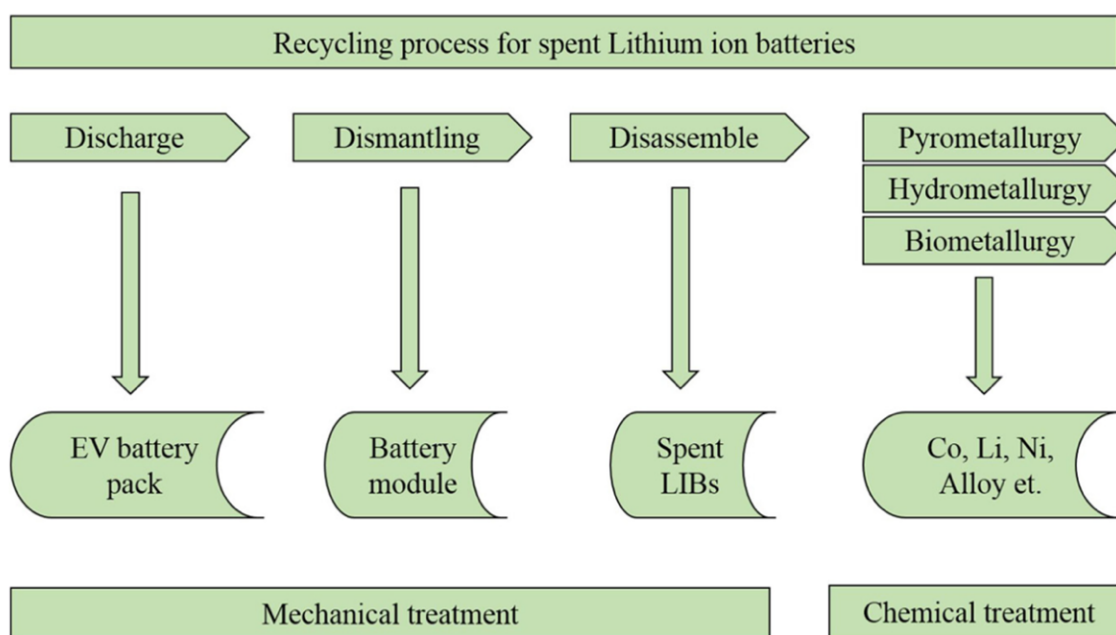


Figura 21 – Processo di riciclaggio delle LIB

4.1.1.2.1 Player nel riciclo

A livello industriale, i principali player nel mercato sono rappresentati in tabella 1. Come si può notare ci sono alcuni esempi nel mercato di impianti che combinano sia processi pirometallurgici che idrometallurgici.

Concentrando l'attenzione al mercato europeo, il più grande centro di riciclaggio è Umicore (Belgio) in grado di elaborare fino a 7000 tonnellate di batterie all'anno (Ahuja et al., 2019). Questo impianto combina processi pirometallurgici e idrometallurgici.

Umicore è impegnata in diversi progetti di ricerca, un esempio è la partnership stipulata con Audi, il cui obiettivo è quello di realizzare un circuito di riciclo sostenibile delle batterie della casa automobilistica. Nel dicembre 2019 sono stati già stati realizzati i test sulle batterie delle Audi e-tron e i risultati hanno dimostrato la capacità di recuperare fino al 90% del cobalto e del nichel presente. Tale materiale è già stato utilizzato per realizzare nuove celle destinate, per il momento, ad applicazioni diverse da quelle automobilistiche, senza però escludere, che una volta affinati i processi di riciclaggio, si possa creare un sistema chiuso, nel quale le batterie per veicoli elettrici saranno realizzate con materiale proveniente da vecchie batterie. Infatti, gli ottimi valori raggiunti non rappresentano l'obiettivo finale. La partnership mira a rendere l'intera filiera circolare, ovvero trasformare le fasi finali della vita delle batterie nelle fasi iniziali di un nuovo ciclo di produzione.

A livello europeo, un altro grande player è Northvolt (Svezia) produttore di batterie a litio, nata nel 2016 per fare da contrappeso ai grandi produttori asiatici. L'azienda dispone già di un programma pilota instaurato su suolo svedese, precisamente presso i suoi laboratori di Västerås, un programma che ha visto il suo inizio ufficiale nel 2020 con l'obiettivo di recuperare 100 tonnellate all'anno di materiale utile provenienti da batterie NMC (Litio-Nickel-Manganese-Cobalto) e NCA (Litio-Nickel-Cobalto-Alluminio).

Northvolt ha stretto collaborazione anche con Volkswagen, la quale quest'ultima, ha investito quasi un miliardo di euro e ha costruito l'impianto pilota di Salzgitter, che in futuro diventerà una Gigafactory da 16 GWh annui di produzione. Nello stesso impianto ci sarà anche una linea di riciclo delle vecchie batterie.

Infine, secondo i progetti, nel 2021 dovrà nascere in Norvegia la prima fabbrica europea di riciclo delle batterie per EV, grazie alla neonata joint venture tra Northvolt e Hydrovolt, nei pressi di Fredrikstad. La materia prima che verrà lavorata nell'impianto Hydro Volt di Fredrikstad saranno le batterie per auto elettriche provenienti dalla prima ondata di vendite di auto elettriche in Norvegia, dove gli EV si vendono già da parecchi anni. L'impianto sarà in grado di processare oltre 8000 tonnellate/anno di batterie nella prima fase operativa, con l'obiettivo di espandere la capacità nel tempo. Sarà utilizzato un sistema altamente automatizzato e il materiale prodotto dai processi di riciclaggio

includeranno principalmente i materiali della cosiddetta “*black mass*” (Litio, Manganese, Nichel, Cobalto) e l’alluminio.

Questo sarà seguito da un secondo impianto che sorgerà a Skellefteå, in Svezia, nel 2022. Quest'ultimo è un progetto sponsorizzato dall’Unione Europea con quasi 350 milioni di euro di fondi comunitari e prevede la costruzione di un impianto in grado di processare circa 25.000 tonnellate all’anno di celle, con metà del materiale recuperato destinato a nuove batterie per veicoli elettrici del gruppo Volkswagen.

Azienda	Paese	Processo	Capacità
Umicore	Belgio	Pirometallurgico/idrometallurgico	7000 ton/anno
Retriev Technologies	USA/Canada	Meccanico/Idrometallurgico	4500 ton/anno
Accurec	Germania	Meccanico/Pirometallurgico	4000 ton/anno
GEM High-Tech	Cina	Meccanico/Idrometallurgico	10.000 ton/anno
Brunp	Cina	Meccanico/Idrometallurgico	25.000/30.000 ton/anno
JX Nippon Mining and Metals	Giappone	Pirometallurgico/idrometallurgico	5000 ton/anno
Inmetco	USA	Pirometallurgico	6000 ton/anno
SungEel Hitech	Sud Corea	Idrometallurgico	8000 ton/anno
Glencore Plc	Canada/Norvegia	Pirometallurgico/idrometallurgico	7000 ton/anno

Tabella 1 - Principali Player nell'industria del riciclo delle LIB (Pinegar et al., 2019), (Edujee et al., 2020), (Mossali et al., 2020), (Chen et al., 2019)

4.1.1.3 Barriere al riciclaggio

La letteratura in materia di riciclo delle LIB è molto vasta e spesso vengono identificati diversi problemi e ostacoli che possono sorgere. In questa sezione verranno identificate le principali complicazioni del riciclaggio delle batterie a litio che vanno a minare la creazione di valore sostenibile. In particolare, queste barriere possono essere suddivise in quattro categorie:

- Barriere legate al design del pacco batteria
- Barriere legate agli impianti e ai processi di recupero
- Barriere legate alla logistica e al trasporto
- Barriere legate a condizioni economiche

È bene sottolineare che tutte le categorie sopraelencate sono interdipendenti fra di loro, in una sorta di relazione causa-effetto.

Barriere legate al design del pacco batteria

Le problematiche legate a questa categoria si riferiscono alla diversità di caratteristiche che compongono le batterie. Più volte abbiamo sottolineato come le batterie LIB siano in continua evoluzione e che le case automobilistiche adottino specifiche chimiche diverse. La eterogeneità delle batterie non può che non essere uno scoglio per il riciclo. Infatti, questo comporta trattamenti diversi e specifici a seconda del tipo, pertanto il loro trattamento simultaneo può aumentare le risorse richieste o può avere un impatto negativo sulla qualità delle componenti recuperate.

In uno scenario di incertezza come quello attuale, in cui i progressi nel campo delle batterie sono in continua evoluzione, i player nel mercato del riciclo tenderanno a non assumersi il rischio di sviluppare infrastrutture legate ad una specifica chimica, se poi questa cambierà in un secondo momento. In questo contesto l'incertezza non gioca a favore del riciclo.

Infine, un ulteriore problema legato al cambiamento delle chimiche o delle caratteristiche della batteria, è il rischio di spostarsi verso elementi catodici meno costosi, il che ridurrebbe l'incentivo al riciclo. Ci sono già molti studi di ricerca concentrati su nuove LIB basate su tecnologie litio-aria o litio-zolfo.

Barriere legate agli impianti e ai processi di recupero

Gli ostacoli al riciclo collegati agli impianti e ai processi sono tra i più importanti. Questi fattori dipendono da molte variabili che si riferiscono non solo alla quantità o la capacità produttiva di riciclo di LIB, ma anche alla qualità finale del processo, ovvero, ai requisiti di purezza che i materiali riciclati devono possedere. I principali motivi sono da associare alla mancanza di impianti e di processi efficienti e consolidati. Abbiamo già detto in precedenza che il processo di riciclaggio delle batterie a litio avviene mediante un primo

processo (meccanico) che prevede la disattivazione, smantellamento, frantumazione e separazione della LIB, e in seguito un secondo processo (metallurgico) che permette di creare delle leghe di metallo o isolare i materiali provenienti dalla fase precedente.

Entrambe le fasi del processo possiedono una serie di criticità che le rendono poco efficienti nell'attività di riciclo.

Per quanto riguarda i limiti dei processi meccanici, si riferiscono alla poca efficienza e sicurezza nello smontaggio e smantellamento del pacco batteria. Ad oggi lo smontaggio avviene ancora in molti casi mediante lavoratori. Con l'aumentare dei veicoli elettrici e quindi delle batterie che giungeranno al fine vita sarà impossibile reggere determinati ritmi. Sarà necessario quindi automatizzare il processo di pretrattamento della batteria, in particolare nella fase di smontaggio.

La fase metallurgica invece, prevede tre processi distinti: i processi pirometallurgici, idrometallurgici e biometallurgici. In questo caso, il problema più evidente è la mancanza di un'applicazione industriale dei processi idrometallurgici. Sebbene vi siano già molti player nel mercato che adottano tale processo, si tratta comunque di un metodo che è utilizzato principalmente su scala di laboratorio. Nei paragrafi precedenti abbiamo già affermato che il processo idrometallurgico sarebbe molto più vantaggioso in termini monetari, energetici e di risultato finale dei materiali riciclati rispetto al processo pirometallurgico.

Un altro problema legato a questi processi è la mancanza di un processo di recupero di altri componenti, come gli elettroliti e anodi, il che non rende del tutto efficiente il processo di riciclaggio del pacco batteria.

Barriere legate alla logistica e al trasporto

Per barriere logistiche e di trasporto si intende quell'insieme di problemi legati alla gestione e al trasporto dei sistemi di raccolta delle batterie quando terminano la loro vita utile. Infatti, al fine di garantire un corretto avvio delle LIB esauste a tutte le possibili soluzioni di fine vita, è fondamentale un sistema efficiente ed efficace di raccolta. Spesso le inefficienze nella gestione di raccolta sono da imputare ad una normativa carente, la quale non prevede sistemi di tracciamento e non incentiva l'avvio dei rifiuti verso canali legali. Infatti, i circuiti di raccolta possono venire intercettati da sistemi che non operano nella legalità.

L'ottimizzazione della rete di raccolta deve diventare una prerogativa, in quanto le inefficienze di percorso possono avere impatti in termini di perdita di volumi con

ripercussioni a livello industriale, le cui efficienze si basano sulla quantità e qualità degli input di lavorazione e traggono beneficio dalle economie di scala.

I problemi legati al trasporto delle LIB non si riferiscono solo alla gestione efficiente dei sistemi di raccolta, ma comprendono anche aspetti che riguardano la sicurezza del loro trasporto. Le LIB sono prodotti che contengono materiali pericolosi e a rischio esplosione, quindi è necessario osservare determinate misure che garantiscano la sicurezza quando si trasportano. A bordo di un aereo o di un treno, le conseguenze di un'esplosione o di un incendio fuori controllo possono essere molto pesanti. Le norme che regolano il trasporto di batterie a litio impongono severi requisiti per quanto riguarda la manipolazione, la preparazione e l'imballaggio. Queste prerogative si riflettono anche sul costo del trasporto che risulta essere una delle componenti che incide maggiormente sul costo totale del riciclaggio (Olsson et al., 2018).

Barriere legate a condizioni economiche

I principali ostacoli di natura economica si riferiscono all'attuale basso flusso di batterie in circolazione. In questo momento i volumi di batterie esauste sono molto bassi, poiché i veicoli elettrici che sono stati venduti negli ultimi 5-10 anni devono ancora raggiungere la fase di fine vita. La letteratura è concorde nell'affermare che la durata degli EV è stimata intorno agli 8-10 anni. Secondo queste stime un notevole ammontare di batterie esauste dovrebbe incominciare ad arrivare nei prossimi cinque anni.

Proprio per questi motivi, in Europa sono pochi gli impianti di riciclaggio e il flusso di LIB a fine vita va verso paesi come la Germania o il Belgio dove sono presenti grandi stabilimenti (es: Umicore).

In generale, la redditività di un impianto di riciclaggio dipende da due fattori: 1) dal flusso in entrata di LIB; 2) dalla qualità, in termini di chimica del catodo, del flusso. Man mano che il flusso in entrata aumenta e l'attenzione del riciclaggio si sposta verso materiali preziosi (es: cobalto), più alto sarà l'incentivo a riciclare e viceversa (Wang et al., 2014).

Un esempio di quanto sia importante il tipo di materiale nel catodo è riportato in letteratura (Wang et al., 2016), sulla base delle efficienze di riciclaggio, una tonnellata di batterie LCO (litio-cobalto) può produrre un valore di 8900 \$ mentre una massa equivalente di LMO (litio-manganese) produce solo 890 \$.

4.1.1.4 Impatti ambientali

Il riciclaggio delle LIB ha il potenziale per ridurre l'impatto ambientale complessivo dei veicoli elettrici riducendo le emissioni di CO₂ e inquinanti atmosferici collegati all'estrazione e alla raffinazione di materiali vergini. Inoltre, il riciclo evita che i materiali considerati scarsi e critici vengano esauriti. Questo vale per i materiali rari, poiché in alcuni casi il riciclo di materiali abbondanti in natura, come ad esempio il ferro o il manganese, può essere più dannoso dell'estrazione stessa dei materiali vergini. In questi casi è necessario approfondire mediante una analisi LCA per capire quale dei processi sono più vantaggiosi. Ad esempio, molti studi LCA hanno mostrato impatti positivi del recupero e del riutilizzo di materiali come il cobalto o il nichel. È stato dimostrato che il consumo di energia per l'estrazione è inferiore del 51% per il catodo di una batteria al litio prodotto partendo da cobalto e nichel riciclati, rispetto alla produzione partendo da materie vergini (UNEP 2013).

In via generale, è stato dimostrato che il recupero di materiali derivante da un processo di riciclo pirometallurgico può apportare una riduzione della domanda di energia richiesta del 6-56% e una riduzione delle emissioni di GHG del 23-43% rispetto ai processi di estrazione e raffinazione di materiali (Hendrickson et al., 2015). Nel processo pirometallurgico, la fase che ha un impatto più elevato in termini di surriscaldamento globale è quella relativa all'incenerimento delle diverse componenti plastiche, mentre il maggior impatto in termini di tossicità sull'ecosistema e sulla salute è nella fase di generazione dell'energia (Boyden et al., 2016).

Allo stesso modo, i processi idrometallurgici hanno il potenziale di ridurre notevolmente l'impatto ambientale dovuto al recupero dei materiali. È stato dimostrato inoltre, una maggiore efficienza nei processi di recupero dei processi idrometallurgici rispetto ai processi che prevedono la pirolisi.

Anche per quanto riguarda gli impatti ambientali negativi i processi idrometallurgici risultano essere migliori di quelli pirometallurgici. Nel dettaglio, il maggior impatto sul surriscaldamento globale dei processi idrometallurgici deriva dal mancato riciclo di materiali utilizzati nei processi come il gesso e il loro conferimento in discarica. invece, il maggiore impatto sul potenziale di tossicità umana deriva dalla fase di generazione di energia. Rispetto alla pirometallurgica vi sono minori oneri ambientali per via dell'assenza di processi di combustione. Tuttavia, la catena di approvvigionamento dei materiali chimici richiesti per questo processo potrebbe ridurre questo vantaggio. Infine,

un ulteriore impatto sull'ecosistema terrestre è dovuto all'utilizzo intensivo di acqua il che può portare a seri problemi di scarsità idrica.

Considerando poi entrambi i processi, occorre tener presente anche il potenziale impatto derivante dai mezzi che trasportano le batterie esauste agli impianti di riciclaggio (Hendrickson et al., 2015). Questo mette in luce l'importanza dell'ubicazione quando si pianifica una nuova infrastruttura di riciclaggio.

Il riciclaggio di LIB potrebbe avere impatti ambientali positivi se si considera l'intero ciclo di vita. Quando si considerano i singoli processi, questi benefici potrebbero essere massimizzati aumentando la proporzione di fonti rinnovabili nel mix energetico, attraverso una maggiore efficienza nel riciclo e un recupero di quei materiali che attualmente non vengono trattati e finiscono in discarica.

4.1.2 Riutilizzo e Second Life

Nei capitoli e nelle sezioni precedenti è stato ripetuto più volte di come il mercato degli autoveicoli elettrici abbia conosciuto un forte sviluppo negli ultimi anni e di come questo fenomeno abbia portato a un conseguente incremento della produzione e diffusione delle LIB.

A causa delle reazioni chimiche interne che si verificano nei diversi componenti, le batterie a litio perdono la loro capacità con il loro utilizzo e con il passare del tempo. Le LIB sono considerate non adatte alla trazione quando mantengono il 75-80% della loro capacità iniziale e il loro ciclo di vita termina in tempi che vanno dagli 8-10 anni, a seconda della marca e del modello.

Questi aspetti legati al End-of-Life delle batterie portano alla luce molti interrogativi, in particolare, come verrà affrontato il grande flusso di batterie che concluderanno il loro ciclo di vita nei prossimi anni e la sempre più crescente domanda di risorse.

Le soluzioni a questi problemi sono da ricercare nei principi di economia circolare che sono stati fin qui proposti. Il riciclo potrebbe essere una buona soluzione per il corretto smaltimento dei pacchi batteria, riducendo in questo modo gli oneri ambientali associati all'estrazione di nuovi materiali per la produzione di nuove LIB. Tuttavia, la soluzione che offre maggiori vantaggi in termini ambientali ed economici è il riutilizzo o il "Second Life". Uno dei pilastri dell'economia circolare è la capacità di conservare il valore delle risorse che sono già state sfruttate, con il fine di allungarne la loro utilità. In questo senso, il riutilizzo soddisfa a pieni voti questo importante pilastro, in quanto prevede di

riutilizzare un bene per lo stesso scopo per cui è stato prodotto o per scopi diversi, estendendo la sua vita. Nel caso delle batterie a litio di un EV è stato stimato che il loro riutilizzo come stoccaggio stazionario di energia allunghi la loro durata dai 5 ai 15 anni, a seconda del loro stato di salute iniziale e il tipo di applicazione di seconda vita (Neubauer et al., 2015).

Prima di procedere a discutere dei diversi aspetti che riguardano il secondo utilizzo, occorre andare a fare una distinzione tra i diversi riutilizzi dei pacchi batteria degli EV. Secondo la RECHARGE (*European Association of Advanced Rechargeable Batteries*) si possono distinguere due possibili utilizzi delle celle o moduli di batterie (Pasquali et al., 2016):

- Re-use: le batterie non sono considerate a fine vita e sono trattate per essere reimpiegate per la stessa finalità per la quale erano state inizialmente progettate e prodotte. I componenti chiave dei sistemi di batterie (es: moduli) sono ancora funzionanti una volta ritirati. In molti casi, quando il veicolo è stato ritirato a causa di un incidente o perché difettoso, i moduli e le celle possono essere rimessi a nuovo e riutilizzati direttamente in un altro veicolo elettrico. Ad esempio, Tesla e Nissan hanno perseguito una strategia di ricondizionamento e offrono pacchi ricondizionati come sostituti per problemi di garanzia nei veicoli usati (Ambrose et al., 2016).
- Second use: in questo caso le batterie vengono utilizzate per scopi diversi da quello per il quale sono state immesse nel mercato. Si parla infatti, di “Second Life” e occorre distinguere le differenze che intercorrono tra utilizzo primario e utilizzo secondario. In questi casi le applicazioni possono essere molto varie. In genere, le batterie di seconda vita sono impiegate per lo stoccaggio di energia. Il gruppo Renault, ad esempio, ha realizzato sull’isola di Porto Santo (Portogallo) un ecosistema elettrico intelligente che fa leva sullo stoccaggio stazionario di energia (rinnovabile) attraverso batterie di seconda vita.

Sempre RECHARGE ha stabilito una serie di requisiti minimi che devono essere soddisfatti prima di autorizzare il riutilizzo o il secondo utilizzo delle batterie dopo una prima vita di servizio. Questi requisiti sono illustrati in figura 22 (Recharge, 2014).

Proposed Minimum Requirements for	
Re-use (identical use)	Second-use
<p>Application</p> <ul style="list-style-type: none"> - Re-furbishment or re-conditioning by qualified professional - Control of equivalent performances, e.g. through the BMS - Quality, Safety and Performance standards to be observed - Etc... 	<p>In absence of a legal basis, additional criteria might be required – e.g.</p> <ul style="list-style-type: none"> - Compatibility issue between 1st and 2nd application - Responsibility for the technical performances - Producer responsibility to be defined: technical and EoL - Compliance with safety testing requirements before second-use
<p>Producer Responsibility</p> <ul style="list-style-type: none"> - Producer identified - Warranty offered by producer 	
<p>Safety</p> <ul style="list-style-type: none"> - Technical requirements maintained - Safety standards respected (tests) 	

Figura 22 - Requisiti minimi proposti per Re-use e Second-use (RECHARGE)

Il riutilizzo delle LIB può seguire due diverse strategie di preparazione (Casals et al., 2016):

- **Direct Re-use:** prevede il riutilizzo diretto della batteria dopo un’attenta valutazione dello stato di salute (SoH) e delle sue funzionalità. È la soluzione economicamente più sostenibile, in quanto non richiede ulteriori lavorazioni.
- **Battery Repurposing:** prevede lo smantellamento della batteria in diversi moduli per raggrupparli per formare un nuovo prodotto progettato per applicazioni di second life. Questa strategia richiederà nuovi materiali/componenti e di conseguenza un aumento dei costi relativi alla fase di riutilizzo e la renderà meno competitiva in termini economici e ambientali rispetto al precedente, ma la batteria riutilizzata sarà più flessibile e adatta agli usi più specifici.

4.1.2.1 Applicazioni del Second Life

Le LIB, in assenza di problemi specifici, vengono ritirate dagli EV quando la loro capacità residua ha raggiunto circa l’80%. Quando si parla di applicazioni di secondo utilizzo occorre tenere in considerazione anche il cosiddetto “State of Health” (SoH) della batteria, per identificare l’applicazione di secondo utilizzo più adatta. Nello studio dello stato di salute si va a comprendere quanto una batteria non è più in grado di assolvere agli scopi

per cui è stata fabbricata, ma è ancora in grado di svolgere i compiti in altre applicazioni diverse.

In termini matematici, l'SoH viene calcolato come il rapporto tra la capacità residua e la capacità nominale di una batteria. In alternativa può essere calcolato come rapporto tra la sua resistenza misurata e quella iniziale (Pasquali et al., 2017). Si determina quindi il rapporto tra il valore attuale di un parametro che caratterizza le prestazioni di una batteria (ad esempio: la capacità, resistenza, durata) e il suo valore nominale. Lo stato di salute non è legato esclusivamente al numero di cicli di vita delle batterie e alla tipologia di cicli a cui sono sottoposte, ma anche ad altre variabili esterne quali ad esempio l'esposizione ad alte o basse temperature o i processi di carica o scarica troppo drastici.

Un aspetto fondamentale che è stato evidenziato (Kampker et al., 2017), al fine di facilitare il riutilizzo mediante una seconda vita della batteria, è il concetto di "*design for disassembly*", ovvero, un metodo di progettazione che prevede tecniche mirate a semplificare il montaggio di un prodotto e facilitarne così la sua manutenzione, rigenerazione e ricostruzione. Questo concetto risulta essenziale in quanto l'obiettivo dell'economia circolare è anche quello di massimizzare il valore di un bene durante l'intero ciclo di vita, incluso il suo secondo utilizzo. Un esempio che potrebbe facilitare il riutilizzo di una batteria potrebbe essere l'istituzione di un BMS (Battery management system) flessibile in grado di memorizzare diverse informazioni e dati a livello di singola cella (temperatura, voltaggio, profondità di scarica, stato di carica, cortocircuiti), grazie al quale è possibile identificare al meglio lo stato di salute dell'accumulatore (Reid et al., 2016).

In genere, quando si parla di riutilizzo delle LIB si fa riferimento alla seconda vita che queste possono avere in campi diversi rispetto all'utilizzo in veicoli elettrici. Le batterie di seconda vita possono funzionare in maniera ottimale in un'applicazione fissa o stazionaria rispetto alle applicazioni nei veicoli elettrici. Questo perché le batterie in applicazioni fissa richiedono meno densità energetica e inoltre non hanno problemi legati al peso e allo spazio. I beneficiari di queste applicazioni possono essere i gestori delle reti elettriche, i servizi elettrici, i clienti commerciali o residenziali. Qui di seguito andremo a elencare una serie di possibili applicazioni diverse dal riutilizzo negli EV.

Tra le applicazioni più interessanti al momento per la Second Life delle LIB vi sono (Casals et al., 2019):

- Energy storage → si tratta dell'applicazione più comune e si basa sull'immagazzinamento dell'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili, quali il fotovoltaico e l'eolico. Questa applicazione può avvenire sotto forma di autoconsumo sia in ambito domestico sia industriale.
- Area regulation → si basa sulla precedente applicazione di energy storage, ma allo stesso tempo funge da stabilizzatore di rete. La stabilizzazione permette di risolvere il problema della non programmabilità delle energie rinnovabili. In situazione di sovrapproduzione energetica non programmata, il surplus viene suddiviso in pacchetti di energia, inviato ai sistemi di storage e immagazzinato fino al momento in cui potrà essere reimmesso nella rete.
- Transmission deferral → i sistemi di accumulo forniscono supporto di alimentazione della rete quando la richiesta di energia è superiore alla capacità della rete stessa. Si parla in questi casi di "*Peak Shaving*" (limatura del picco) e "*Load Leveling*" (livellamento del carico), la cui funzione è proprio quella di fornire energia nei momenti in cui la richiesta è elevata e caricare quando la richiesta è bassa, con conseguenti benefici sia per l'utente sia per la rete elettrica.
- Fast EV charge → le batterie di second life vengono utilizzate anche per la carica veloce dei veicoli elettrici. In questi casi, potrebbe essere necessaria, per un breve periodo, una potenza superiore rispetto a quella fornita dall'alimentatore. Questa potenza extra può essere fornita dalle batterie invece di aumentare l'installazione dell'alimentatore (con annessi costi, materiali e inquinamento) e pagare costi aggiuntivi della tariffa fissa.

Un esempio di come le batterie possano fornire servizi di accumulo di energia e di rete (mediante regolazione della frequenza della corrente alternata nella rete) è il sistema di accumulo installato nel 2018 alla "Joahn Cruyff Arena" di Amsterdam. Durante gli eventi allo stadio, la domanda di elettricità per l'illuminazione, trasmissione di energia, ristorazione, servizi di sicurezza aumenta da un carico di base di circa 200 kW a oltre 3000 kW, per l'intera durata dell'evento (Robb J., 2018).

Con il sistema di accumulo di energia installato, composto da 590 pacchi batterie (di cui 340 nuove e 250 second life) è possibile gestire in maniera ottimale sia il fotovoltaico sia la rete elettrica recuperata a basso costo dalla rete durante le ore notturne. L'energia fotovoltaica generata durante la giornata anziché essere immessa in rete e venduta al gestore di rete a basso prezzo, va a caricare il pacco batterie, la cui capacità nominale è

stata scelta per soddisfare la richiesta energetica dai carichi dello stadio durante gli eventi più importanti.

In questo modo, appiattendolo il picco della domanda con il fotovoltaico gratuito o elettricità di rete a basso costo immagazzinata nelle batterie a litio, è possibile da un lato, ridurre il costo del carburante diesel (il carburante viene utilizzato nei generatori il cui utilizzo è reso obbligatorio dalle autorità calcistiche), e dall'altro evitare i picchi di domanda. Inoltre, si viene a generare un flusso di entrate quando il sistema di accumulo di energia viene utilizzato per fornire servizi di bilanciamento della rete, come ad esempio il controllo della frequenza.

4.1.2.2 Benefici del Second Life

Quando si parla di benefici del secondo utilizzo l'attenzione si sposta sui vantaggi di natura ambientale ed economica che si possono ottenere.

I benefici ambientali connessi al riutilizzo si riflettono in primo luogo, nell'opportunità di ritardare i processi di riciclaggio e smaltimento, che al momento rappresentano un onere ambientale, e in secondo luogo l'opportunità di estendere il ciclo di vita di un prodotto, spremendo valore dalle risorse esistenti. Se consideriamo l'impatto ambientale, il riutilizzo diretto delle LIB dei veicoli elettrici consente al materiale di rientrare nel mercato delle batterie, causando minor impatti, poiché non sarà necessario impiegare tecniche di trattamento sui materiali recuperati. Per quanto riguarda il secondo utilizzo per applicazioni diverse, l'onere ambientale è maggiore rispetto al riutilizzo diretto, poiché saranno necessari dei lavori di riconversione, ma comunque nettamente inferiori rispetto al riciclaggio e lo smaltimento. Inoltre, occorre considerare anche il mancato impatto ambientale derivante dalla produzione di nuove batterie per applicazioni fisse.

Uno dei principali vantaggi ambientali del second use è che favorisce l'integrazione nella rete delle energie rinnovabili. È stato stimato che la sostituzione dell'elettricità prodotta da un generatore diesel con un sistema di stoccaggio rinnovabile di seconda vita ridurrebbe le emissioni di GHG del 32% (Casals et al., 2019).

Infine, bisogna considerare i molteplici benefici di tipo economico che si possono trarre dal secondo utilizzo delle batterie degli EV. Diversi studi evidenziano che il riutilizzo abbia il potenziale di ridurre notevolmente il costo delle batterie e di conseguenza ridurre il costo complessivo dell'EV, in quanto la batteria rappresenta la voce di costo più rilevante.

In questo contesto la creazione di una rete di partnership più forte tra i diversi attori e gli stakeholder lungo la catena del valore delle batterie può facilitare la fattibilità del secondo utilizzo. Si vengono così a creare anche relazioni tra attori di diversi settori in una prospettiva multi-stakeholders, come ad esempio, tra il settore automobilistico e quello energetico, per il riutilizzo delle batterie come energy storage per fonti rinnovabili (Reinhardt et al., 2017).

Tutti i benefici sopraelencati avrebbero il potenziale di ottenere numerosi vantaggi in termini ambientali ed economici. Tuttavia, ci sono diverse problematiche da considerare e da risolvere affinché il mercato del second life possa emergere effettivamente. Come vedremo nel capitolo che segue, gli ostacoli al riutilizzo sono molti e di diversa natura.

4.1.2.3 Barriere al Second Life

I principali ostacoli del secondo utilizzo sono in parte analoghi a quelli che abbiamo già incontrato per il riciclaggio. In particolare, possiamo individuare una serie di barriere che limitano l'emergere del mercato del second life:

Barriere normative

Si fa riferimento a quell'insieme di schemi normativi che limitano le opportunità di mercato e comportano un aumento dei costi del riutilizzo. La mancanza di un mercato regolamentato e i modesti volumi di batterie esauste, ostacolano la diffusione del second life e provocano un basso tasso di riutilizzo delle LIB.

Altri ostacoli normativi che vale la pena menzionare sono le difficoltà legate al trasporto delle LIB, in quanto classificate come rifiuti pericolosi. Il loro trasporto è altamente regolamentato e attraverso l'adozione di specifiche misure di sicurezza, i costi complessivi dello loro spostamento aumentano notevolmente (Elkind, 2014). Ciò solleva la questione di dove si trovano i mercati per i veicoli elettrici e quelli per le soluzioni di seconda vita.

Un altro problema è la mancanza e lo sviluppo di politiche volte ad incoraggiare e incentivare il secondo life, in particolare nelle applicazioni di ESS (Energy Storage System) (Neubauer et al., 2015).

L'assenza di una regolamentazione chiara e definita genera problemi anche per quanto riguarda l'assegnazione di responsabilità della proprietà delle batterie una volta che hanno completato il primo ciclo di vita. L'attore che immette la batteria sul mercato ha la

responsabilità del produttore, cioè la responsabilità di fornire un sistema per la raccolta e il trattamento quando la batteria diventa un rifiuto. Attualmente, il produttore è responsabile dello smaltimento o del riciclaggio delle batterie, indipendentemente dalla seconda o terza vita. Per incoraggiare il riutilizzo delle batterie è necessario che vi sia un quadro giuridico che preveda la possibilità di trasferire la responsabilità se la batteria si trasforma in un nuovo prodotto con una nuova funzione o con un nuovo marchio (Olsson et al., 2018).

Barriere tecniche

In questo caso gli ostacoli sono di natura funzionale e di sicurezza. Le batterie di seconda vita non sono ancora considerate efficienti da un punto prestazionale, in quanto possiedono un ciclo di vita ridotto e risultano più degradate rispetto a quelle di nuova produzione.

Chi opera nel mercato del riutilizzo dovrà garantire perciò sicurezza e affidabilità nelle prestazioni, che dipendono in larga parte dalla gestione e dall'utilizzo fatto durante la prima vita. Dovrà essere compiuta una corretta valutazione dello stato di salute (SoH) che deve comprendere l'analisi di parametri che riguardano l'invecchiamento e lo stress nella prima vita, le informazioni sull'utilizzo della batteria e la sua cronologia di ricarica (Ahuja et al., 2020). Lo stato di salute di una batteria dipende poi anche dallo stile di guida di ciascun individuo, il che rende le batterie in alcuni casi molto eterogenee fra loro. Se per esempio, un proprietario continua ad usare una batteria al di sotto della capacità dell'80% (soglia raccomandata in cui il veicolo dovrebbe sostituire la batteria), questo comporta una riduzione delle celle disponibili per un secondo utilizzo efficace, il che avrà un impatto negativo sul modello di economia circolare.

Nonostante questi problemi tecnici, è stato dimostrato che le batterie di seconda vita possono avere ancora un lungo ciclo di vita dopo la loro prima applicazione in un veicolo elettrico. Le applicazioni fisse richiedono meno densità energetica rispetto agli EV, quindi sono ancora in grado di restituire molta energia. Inoltre, una LIB riutilizzata potrebbe essere considerata un prodotto sicuro, poiché costruita in condizioni impegnative e testata a fondo durante la sua vita nel veicolo. Recenti progressi hanno affrontato alcuni problemi di sicurezza e salute attraverso miglioramento nella progettazione iniziale delle batterie. Alcuni produttori stanno migliorando il design del pacco batteria, facilitando la sua apertura in modo che i componenti siano meno rischiosi da sostituire (Hill et al., 2019).

Barriere economiche

Per ostacoli di natura economica ci si riferisce ai costi connessi alla riconversione delle LIB usate. Queste problematiche sono senza alcun dubbio rilevanti, in quanto il secondo utilizzo di una batteria deve essere prima di tutto economicamente sostenibile e conveniente rispetto all'acquisto di una batteria nuova per applicazioni fisse.

I costi del riutilizzo sono da attribuire in primis all'acquisto del pacco batteria e in seguito ai costi della manodopera tecnica necessaria per trasformare e riconvertire la batteria. Si stima che il costo complessivo di riutilizzo della batteria di un veicolo usato potrebbe ammontare a 25-49 \$/kWh, o circa la metà del prezzo di vendita della batteria riutilizzata (Neubauer et al., 2015).

Ci sono anche altri aspetti che causano perplessità nel mercato del second life, in particolare la eterogeneità delle chimiche e il continuo sviluppo di nuove tecnologie di batterie. Chimiche e design variano di anno in anno e spesso le LIB sono sprovviste di etichette di riconoscimento, rendendo le operazioni di ricondizionamento e riassettaggio più difficili e costose (Engel et al., 2019). In questo contesto, gli attori nel settore non sono incentivati ad investire in infrastrutture fin tanto che non verranno stabiliti determinati standard nelle chimiche e nel design delle batterie.

Infine, un altro ostacolo fondamentale per l'industria delle batterie di seconda vita è la loro capacità di competere con i nuovi sistemi di storage e le nuove batterie di stoccaggio, dato il rapido calo dei costi e il miglioramento delle prestazioni dei nuovi sistemi. I costi delle batterie a litio sono diminuiti di oltre l'85% dal 2010 (IEA, 2020). Questo a dimostrazione che gli operatori nel mercato dovranno affrontare difficoltà nel valutare la curva dei costi a lungo termine senza conoscere il prezzo dei probabili sistemi concorrenti (Elkind, 2014).

4.2 Le sfide nella circolarità delle LIB

Nei capitoli precedenti abbiamo visto che le pratiche di economia circolare come il riciclo e il riutilizzo hanno il potenziale per far fronte agli ingenti volumi di batterie che giungeranno a fine vita nei prossimi anni. Tuttavia, abbiamo anche mostrato che gli attuali processi circolari presentano una serie di evidenti gap che dovranno necessariamente essere colmati per affrontare le sfide future. Queste "barriere", come le abbiamo definite, sono le principali problematiche che limitano le performance della catena del valore

sostenibile delle LIB, rendendo i processi di recupero e riutilizzo poco efficienti, e di conseguenza meno competitivi e sostenibili economicamente.

L'obiettivo di questo capitolo sarà quello di identificare le principali sfide presenti e future della circolarità, alla luce dei problemi che abbiamo descritto in precedenza, con un focus sulle possibili soluzioni concrete che possono essere adottate.

Possiamo individuare due grandi sfide che l'economia circolare dovrà sostenere: 1) la capacità del settore e dell'intera filiera di delineare un design delle batterie che possa essere il più allineato possibile ai processi di riciclo e di riutilizzo; 2) un intervento giuridico e politico a sostegno della catena del valore circolare. È bene sottolineare che senza un intervento politico e normativo mirato ed efficace, l'economia circolare difficilmente potrà emergere e raggiungere risultati concreti.

Progettazione delle batterie

Il “*battery design*” è senza alcun dubbio una delle più grandi sfide del fine vita delle batterie a litio. A differenza delle tradizionali batterie (es: piombo-acido) che si possono trovare nei veicoli a combustione interna, le batterie a litio possiedono una grande varietà di configurazioni fisiche, nel tipo di cella o modulo e nel tipo di chimica catodica impiegata. Il principale motivo per cui non è stato ancora individuato uno standard è dato dal fatto che il mercato e i suoi player necessitano di tempo per sperimentare la struttura e soprattutto la chimica in grado di soddisfare il miglior equilibrio tra autonomia, potenza e durata. L'introduzione di uno standard uniforme nella produzione di LIB per EV porrebbe definitivamente fine alle attuali problematiche nel riutilizzo e in particolare nel riciclo. Tuttavia, la letteratura afferma che nei prossimi anni difficilmente si affermerà un disegno dominante nella progettazione delle batterie (Thompson et al., 2020).

Sono molti i problemi legati alla differente progettazione delle batterie. In primo luogo, si presentano sfide per quanto riguarda il processo di smontaggio e separazione dei pacchi, moduli e celle. In secondo luogo, le differenti configurazioni compromettono la possibilità di una maggiore automazione. Infine, le differenti chimiche del catodo, anodo ed elettrolita portano ad un processo di trattamento comune, spesso mediante pirometallurgia e triturazione, che si traduce in minore efficienza del riciclo sia in termini di quantità che di qualità di materiale recuperato. È stato recentemente dimostrato che la separazione dei materiali degli elettrodi piuttosto che la loro triturazione può portare a salvare fino al 70% di materiali in più (Harper et al., 2019).

La differente struttura delle batterie limita la possibilità di automatizzare i processi di riciclo o di riconversione e rigenerazione delle batterie. Al momento, le fasi di smontaggio delle LIB sono ancora svolte manualmente, il che, oltre ad essere molto oneroso in termini economici, è anche molto pericoloso per la sicurezza del personale. In uno studio condotto dall'Institute of the Motor Industry (2015), ad esempio, è stimato che nel Regno Unito i tecnici qualificati a fornire assistenza ai veicoli elettrici è appena il 2% rispetto al totale dei meccanici presenti. Si teme che i tecnici non qualificati possano rischiare la loro vita riparando gli EV e questa preoccupazione deve essere estesa anche agli addetti del fine vita delle LIB.

Lo smontaggio robotico della batteria avrebbe il vantaggio da un lato, di eliminare il rischio di danni a lavoratori e dall'altro ridurre i costi, rendendo il riciclaggio economicamente vantaggioso. L'automazione potrebbe migliorare inoltre anche la separazione meccanica dei materiali e componenti, incrementando la purezza dei materiali riciclati. Tuttavia, la robotica e l'automazione fanno affidamento su ambienti altamente strutturati, in cui i robot compiono azioni ripetitive programmate rispetto ad oggetti esattamente noti. Al contrario, l'attuale incertezza e la varietà di batterie presenti nel mercato incrementano la complessità delle operazioni e non favoriscono lo sviluppo di tali sistemi. Per risolvere i problemi legati alla complessità dei pacchi batteria per EV, è stata suggerita la possibilità di un co-working collaborativo tra uomo-robot utilizzando una nuova generazione di braccia robotiche "co-bot" (Wegener et al., 2015). A differenza dei robot industriali convenzionali, i co-bot possono condividere in sicurezza l'ambiente di lavoro con gli uomini e potrebbero svolgere dei compiti più semplici (es: svitare un bullone), mentre l'uomo gestirebbe compiti cognitivamente più complessi.

Standardizzare le tecnologie delle batterie è molto difficile, se non impossibile, in quanto le variazioni nel design e nella composizione dei materiali sono spesso necessari a soddisfare determinati requisiti di potenza ed autonomia dei modelli EV. Tuttavia, gli approcci di "design for recycling and remanufacturing", letteralmente progettazione per il riciclo e riutilizzo, sono sempre più presi in considerazione e adottati dai produttori di LIB. Attraverso questi approcci si prevede la creazione di pacchi batteria e moduli facili da rimuovere, da smontare e preparare per il riciclo o il riutilizzo, nonché la scelta di materiali che possono essere facilmente rimossi e riciclati. Anche se la standardizzazione non è una strada perseguibile, la progettazione delle batterie dovrebbe quanto meno soddisfare questi requisiti. A questo proposito, potrebbe essere adottato un sistema di etichettatura delle LIB, con il fine di migliorare e rendere più efficienti i processi. Mediante

delle etichette, come codici QR o Tag, possono essere facilitate alcune operazioni di smistamento e/o di stoccaggio. Di conseguenza, sarà possibile creare dei canali per batterie di una determinata tipologia e applicare metodi specifici a seconda della chimica. È stato dimostrato, ad esempio, che i processi idrometallurgici sono più efficaci a recuperare il cobalto (Kang et al., 2010). Secondo il World Economic Forum (2019), si dovrebbe adottare un “*Battery Passport*” per facilitare la condivisione di dati sulla chimica dei materiali, l’origine, lo stato di salute e la catena di custodia. Questo consentirebbe alle parti interessate di identificare e monitorare le batterie durante tutto il ciclo di vita, facilitando così i processi di economia circolare.

Implicazioni politiche e normative

Il riciclaggio e il riutilizzo delle LIB su larga scala sono ancora in una fase iniziale, specialmente nei paesi al di fuori della Cina. Uno dei motivi di questo basso tasso di riciclo e riutilizzo è che l’attuale volume di LIB raccolte non è sufficientemente alto da consentire il raggiungimento di economie di scala, e più in generale, ottenere vantaggi economici tali da incentivare gli investimenti in questo settore. Inoltre, il flusso di LIB raccolte finora è costituito in larga parte da batterie di piccole dimensioni provenienti da dispositivi elettronici portatili, il che rende più difficile il loro recupero. La carenza normativa sulle pratiche di economia circolare non aiuta. In Europa, per esempio, l’attuale direttiva sul riciclo delle batterie (2006/66/CE) non è appropriata per gestire le sfide relative alle batterie e alla transizione verso la mobilità elettrica.

Nel paragrafo precedente abbiamo discusso di quanto sia importante la sfida verso una progettazione delle batterie che possa essere allineata ai processi di riciclo o di riutilizzo o addirittura dei benefici che si potrebbero ottenere attraverso una standardizzazione delle batterie. Tuttavia, l’economia circolare potrà emergere solo se vi sarà un concreto intervento normativo che dovrà prevedere e promuovere economicamente una serie di sostegni e incentivi rivolti all’intera filiera. Per questi motivi la letteratura identifica una serie di priorità destinate ai *policy maker* che mirano ad accelerare e rendere più efficienti ed efficaci gli strumenti di economia circolare. Queste priorità possono essere identificate in: sviluppo della catena del valore, sostegno alla R&S, maggiori incentivi nel mercato e adozione di un modello di servitizzazione.

Sviluppo della catena del valore: Nell'attuale contesto economico e tecnologico, una regolamentazione a favore di una maggiore efficienza e sviluppo della catena del valore dell'economia circolare è fondamentale. I processi di riciclo e riutilizzo devono essere tali da poter competere con le catene di approvvigionamento dei materiali vergini in termini di qualità, costi, affidabilità e garantire vantaggi anche in termini di sicurezza, ambiente ed efficienza energetica.

Lo sviluppo di una catena del valore sostenibile deve essere promossa considerando tutte le fasi del processo: logistica, trasporto, raccolta, smistamento e stoccaggio delle LIB a fine vita. Come già detto in precedenza, uno dei grandi ostacoli dei processi di trattamento di fine vita delle batterie concerne proprio nelle difficoltà nel raccogliere adeguatamente le LIB esauste e nelle barriere economiche dovute agli elevati costi del trasporto e per garantire la completa sicurezza. Il costo legato al trasporto è causato dalla classificazione delle batterie come merce pericolosa. Vi sono leggi severe che prevedono il modo in cui la batteria debba essere trasportata e lo stato di carica che deve possedere. Questi fattori incidono pesantemente sull'economicità dell'intero processo. È stato stimato che il costo del trasporto e della sicurezza potrebbero influire sul 40-50% del costo complessivo del riciclaggio, mentre lo smantellamento del veicolo e lo smontaggio del pacco batterie sono costosi a causa dei rischi per la sicurezza associati a questa operazione che come abbiamo già detto avviene in maniera manuale. Le soluzioni normative dunque dovrebbero mirare a ridurre i costi del trasporto legato alle LIB, senza però compromettere la loro sicurezza. Inoltre, ciò tende a suggerire che i processi di riciclo e pretrattamento dovrebbero essere più localizzati, riducendo al minimo il trasporto. L'ottimizzazione dell'ubicazione degli impianti potrebbe aiutare a migliorare sia gli impatti sul ciclo di vita che gli aspetti tecnico-economici di questo sistema. L'intervento politico dovrebbe quindi favorire forme di co-localizzazione della produzione e del riciclo, e queste dovrebbero essere a loro volta vicine alla produzione automobilistica.

Mediante una regolamentazione di questi aspetti, sarà possibile da un lato aumentare l'efficienza di raccolta delle batterie, evitando che percorrano canali illegali, favorendo così un flusso maggiore di batterie e di conseguenza incrementare i volumi di riciclo o di riutilizzo delle batterie. È vero che i volumi nei prossimi anni aumenteranno significativamente grazie al pensionamento di molte batterie, ma è anche vero che al giorno d'oggi vi è un volume insufficiente di batterie anche per motivi legati alle inefficienze di raccolta. Un aumento dei volumi e dei flussi permetterebbe da un lato di rendere economicamente vantaggioso il riciclo e il riutilizzo grazie a maggiori economie

di scala e dall'altro permetterebbe di espandere l'infrastruttura di riciclo. Nei prossimi anni sarà necessario pianificare la creazione di strutture adeguate prima che si raggiungano livelli ingestibili.

Sostegno alla R&S: Gli interventi politici devono includere anche il sostegno nei confronti di progetti pilota e di ricerca. Questi progetti possono contribuire alla creazione di catene del valore integrate attorno al riciclaggio e alla produzione di LIB, generando dati per la pianificazione degli investimenti ed aiutare ad identificare quali possano essere le lacune e le priorità per ulteriori attività di ricerca e sviluppo.

I progetti pilota dovrebbero interagire con tutti gli attori e stakeholders che svolgono funzioni chiave nella realizzazione del riciclo e del riutilizzo di LIB su larga scala, compresi i grandi gruppi automobilistici, le aziende produttrici di batterie, i trasporti, nonché le autorità di regolamentazione e la comunità scientifica. Queste sfide potrebbero essere mitigate da una maggiore cooperazione lungo la supply chain.

Maggiori incentivi nel mercato: Le misure di spinta e transizione tecnologica da sole non bastano, infatti, devono essere integrate anche da politiche che possano attrarre il mercato e fornire incentivi per l'ottimizzazione delle catene del valore, in particolar modo in questa fase emergente del settore.

Al momento, il numero esiguo di LIB di EV a fine vita e le scarse potenzialità redditizie del riciclaggio e del riutilizzo, scoraggiano le aziende ad investire nell'infrastruttura, il che di conseguenza porta a pochi investimenti nel loro trasporto o nelle attività di ricerca e sviluppo.

Maggiori finanziamenti ed incentivi nel settore favorirebbero sicuramente la crescita del settore con effetto moltiplicatore su tutte le fasi del ciclo del valore.

Un altro tema fondamentale che occorre essere rivisto dalla normativa riguarda la cosiddetta *Extended Producer Responsibility* (EPR), di cui abbiamo già parlato in precedenza. Questa responsabilità prevede l'obbligo per il produttore di occuparsi di tutto ciò che concerne il fine vita delle LIB esauste, dalla loro raccolta, trasporto fino al loro smaltimento. Estendere la responsabilità anche alle case automobilistiche implica che diventerebbero responsabili della copertura dei costi di raccolta e poi del riciclo delle batterie, questo porterebbe le aziende automobilistiche a fornire incentivi per stabilire o sostenere la creazione di catene del valore di economia circolare, nonché incorporare considerazioni di "*design for recycling*" nello sviluppo dei loro prodotti. In Cina, ad

esempio, vi sono già delle linee guida rigorose per l'intero ciclo di vita delle batterie, rendendo i produttori di auto e gli importatori responsabili della raccolta, riutilizzo e riciclo delle batterie esauste.

Infine, vi sono alcune misure proposte in letteratura che incentiverebbero i processi di riciclo e riutilizzo (Beaudet et al., 2020):

- 1) Stabilire degli obiettivi sia in termini di costi che di prestazioni a cui legare una serie di ricompense nel caso di raggiungimento e delle sanzioni nel caso di non conformità.
- 2) Applicare imposte o tasse per il conferimento in discarica delle LIB esauste
- 3) Stabilire un sistema di deposito al momento dell'acquisto del veicolo. Questo deposito dovrebbe essere pagato dal consumatore o dal produttore di auto sulla base del programma EPR e infine rimborsato una volta che la batteria viene raccolta per essere riciclata o riutilizzata.
- 4) Applicare una tassa sui materiali vergini per rendere più competitivo il prezzo dei materiali riciclati. Questa tassa dovrebbe essere collegata alle quantità di emissioni di GHG. In Europa, ad esempio, l'assenza di una "*carbon tax*" agevola i produttori esteri di batterie con basso costo del lavoro e un'infrastruttura energetica basata sul carbone.

Adozione del modello di servitizzazione: si tratta di un modello di business in cui i produttori mantengono la proprietà dei beni per tutto il loro ciclo di vita. Questo modello cerca di sostituire il tradizionale concetto di proprietà e possesso di un bene con un modello basato sulla fruizione di un servizio.

Nel caso dei veicoli elettrici si prevede che tra produttore e consumatore emerga una relazione fondata su un contratto di noleggio, dove il produttore mantiene la proprietà e il controllo della batteria, mentre il cliente ne usufruisce per tutto il periodo necessario.

Attraverso l'adozione di un modello simile si possono ottenere diversi vantaggi, come per esempio, un miglioramento dei tassi di raccolta e ritiro delle LIB, riducendo lo smaltimento non sicuro e illegale delle batterie esauste. Di conseguenza, aumentando i tassi di raccolta aumenteranno anche i flussi di batterie disponibile al riciclo e al riutilizzo, incrementando la scala produttiva e migliorando l'efficienza economica.

Un altro vantaggio della servitizzazione è quella di promuovere la progettazione ecologica delle batterie, poiché i produttori avrebbero il vantaggio di produrre batterie facilmente riciclabili o riutilizzabili. Inoltre, verrebbero eliminati i problemi legati alla identificazione

dello stato di salute delle batterie dopo il primo ciclo di vita. Le batterie verrebbero raccolte in uno stato relativamente buono, rendendo più facile per i produttori decidere se la batteria debba essere riutilizzata oppure riciclata.

Un ultimo vantaggio di questo modello è legato alla diffusione dei veicoli elettrici. Come abbiamo ripetuto più volte, la componente principale che pesa maggiormente sul costo complessivo di un EV è la batteria. Attraverso il suo noleggio, il costo totale dell'automobile si ridurrebbe notevolmente, aumentando il tasso di adozione dei veicoli elettrici. In questo momento ci sono alcuni casi concreti di questo modello, come ad esempio, Renault. La società automobilistica francese offre un programma di noleggio batterie per i propri modelli ZOE ad alcune categorie di clienti (Hill et al., 2019). In base a questo accordo, i clienti acquistano il veicolo, ma noleggianno la batteria pagando un prezzo mensile legato al chilometraggio. In questo modo i produttori possono mantenere un controllo diretto sulla catena del valore delle batterie, comprese le decisioni su quando e se riparare o sostituire le batterie (Tytgat et al., 2017).

CAPITOLO 5 - Discussione della domanda di ricerca e conclusione

5.1 Discussione della domanda di ricerca e conclusione

Nei precedenti capitoli sono state evidenziate le dinamiche e gli sviluppi della transizione verso la mobilità elettrica del settore automobilistico e abbiamo presentato un quadro generale dei principali benefici ed ostacoli dell'economia circolare delle batterie a litio. In questo capitolo si cercherà di mettere in relazione questi aspetti per tentare di rispondere alla domanda di ricerca che è stata presentata nell'introduzione di questa tesi.

Attraverso il presente lavoro, l'autore dell'elaborato cerca di comprendere se gli attuali mezzi, strumenti e pratiche di economia circolare nel campo delle batterie a litio, quali riciclo e riutilizzo, siano in grado di accelerare e incrementare il tasso di adozione e diffusione dei veicoli elettrici e se l'approccio circolare sia centrale nella transizione verso la mobilità elettrica.

Per rispondere a tale quesito è stato seguito un percorso logico che ha previsto un'analisi e una revisione della letteratura scientifica. In particolare, nel primo capitolo è stata revisionata la letteratura in materia di innovazioni e transizioni, la quale risulta di fondamentale importanza in quanto permette di comprendere le dinamiche sociali ed economiche che si formano quando un sistema si trasforma e si evolve da un punto di vista socio-tecnico. In questo contesto è stato evidenziato che i cambiamenti possono nascere su tre livelli aggregati (micro, meso e macro) e che gli attori e le strutture agiscono in maniera significativa nel cosiddetto livello di regime, il quale è definito dall'insieme di regole, assunzioni e pratiche dominanti all'interno di un contesto di riferimento. Abbiamo poi sottolineato che nel caso specifico del settore automobilistico, il livello di regime assume un ruolo cruciale nel cambiamento del sistema verso nuove tecnologie e soluzioni di mobilità. La letteratura in materia di transizioni afferma come sia essenziale che nel livello di regime ci sia un sostanziale grado di stabilità, il quale permette al suddetto livello di sopravvivere a lungo e con continuità. Per poter comprendere in che modo avviene un cambiamento in un determinato contesto è importante analizzare le caratteristiche di stabilità di quell'ambiente, per poter comprendere il grado di durezza della stabilità di regime. Nel caso dell'industria automobilistica è emerso che le principali fonti di stabilità sono rappresentate: da modelli di business consolidati, da continui miglioramenti

incrementali, da un certo grado di isomorfismo istituzionale e inerzia organizzativa, da una internalizzazione delle minacce e infine, da uno status culturale e privilegiato dell'auto. Sono queste le fonti che rafforzano il livello di regime e che rallentano il decollo di una transizione.

Nel secondo capitolo è stata illustrata una panoramica generale dei veicoli elettrici, dalle loro caratteristiche e dal loro mercato fino ad arrivare ai benefici e le criticità della loro adozione. Nella parte finale del capitolo è stato presentato un LCA (*Life Cycle Assessment*) tra le auto elettriche e le auto tradizionali per verificare la sostenibilità ambientale dei veicoli elettrici.

Per rispondere al quesito di ricerca era fondamentale individuare nella letteratura tutte le possibili criticità e le barriere che si manifestano nell'adozione degli EV. In particolare, le barriere individuate sono state raggruppate in tre gruppi: barriere finanziarie, barriere funzionali e barriere infrastrutturali. Dall'analisi della letteratura, le barriere finanziarie sono evidenziate come le principali cause della limitata diffusione degli EV. I motivi sono legati all'elevato costo delle batterie e dalla scarsa capacità di raggiungere economie di scala, il che comporta un aumento dei prezzi degli EV nel mercato automobilistico. In questo momento, i vantaggi legati ad un minore costo della manutenzione e del carburante non sono tali da rendere l'investimento in un veicolo elettrico conveniente. Di conseguenza, questi problemi generano incertezza e scoraggiano i consumatori ad acquistare veicoli elettrici. Occorre sottolineare inoltre che a parità di costo i consumatori preferiscono mediamente auto tradizionali, il che porta a riflettere di come la componente economica prevalga rispetto alla componente ambientale. Tuttavia, l'aspetto finanziario non è il solo a generare perplessità nei confronti degli EV, infatti, anche le barriere funzionali sono di rilevante importanza. Le attuali tecnologie delle auto elettriche non sono in grado di eguagliare in termini di affidabilità, autonomia e sicurezza le auto tradizionali. Abbiamo citato spesso il problema legato alla *range anxiety*, il quale risulta un problema quasi infondato, in quanto la percorrenza media delle persone è al di sotto delle attuali autonomie dei veicoli elettrici. In aggiunta, la limitata durata della batteria, che viene identificata in letteratura dopo che ha raggiunto l'80-75% della capacità nominale, pone un grosso problema legato alla limitata capacità di rientrare nell'investimento iniziale in tempi congrui. Infine, anche le barriere legate all'infrastruttura hanno il loro peso, ma in misura minore rispetto alle altre due.

Il terzo capitolo aveva lo scopo di introdurre in maniera dettagliata il mondo delle batterie a ioni di litio (LIB), mentre nel quarto capitolo abbiamo identificato quali sono gli strumenti e le pratiche di economia circolare che vengono impiegate nelle LIB dei veicoli elettrici. In particolare, abbiamo identificato le due attuali soluzioni più importanti: il riciclo e il riutilizzo. Dallo studio della letteratura sono emersi diversi aspetti al riguardo.

Per quanto riguarda il riciclo, è significativo l'impatto positivo che si ha nella sfera ambientale. Il riciclo delle LIB permette, in condizioni ottimali e di efficienza, di recuperare materiali che altrimenti andrebbero persi e di reimpiegarli nella produzione di batterie. Il riciclo, oltre a ridurre l'impatto ambientale legato all'estrazione e alla lavorazione di materiali, permette di re-introdurre nel mercato di produzione delle LIB, materiali che possiedono le stesse caratteristiche e funzionalità dei materiali vergini. La re-immissione di materiali ha un duplice vantaggio: 1) una minore dipendenza dai paesi produttori; 2) un maggiore equilibrio di mercato. Per quanto concerne il primo aspetto, abbiamo già sottolineato che le materie prime impiegate nella produzione di batterie a litio, come il cobalto e il litio, sono risorse scarse e concentrate in pochi luoghi nel mondo. La maggiore estrazione di queste risorse legate all'aumento dei volumi di produzione delle batterie non è sostenibile e potrebbe ulteriormente complicare situazioni già di conflitto nei principali luoghi di produzione e raffinazione, come ad esempio la Repubblica Democratica del Congo per il cobalto. Il secondo aspetto attiene ad un maggiore equilibrio di mercato per quanto riguarda le oscillazioni di prezzo dei materiali rari e scarsi. La volatilità dei prezzi ha un impatto significativo sul riciclo, poiché l'incertezza dovuta all'instabilità dei prezzi delle materie prime non permette di pianificare investimenti a lungo termine e di conseguenza il mancato sviluppo del settore.

Una minore dipendenza dai paesi produttori e un maggiore equilibrio di mercato permettono ai produttori di batterie e di EV di essere da un lato più autosufficienti nell'approvvigionamento di materie prime e dall'altro di avere una maggiore sicurezza sull'andamento di mercato dei prezzi. Questi effetti si traducono in un impatto non trascurabile sul prezzo finale delle batterie, in quanto - come già sostenuto in precedenza - il costo di una LIB dipende dal prezzo dei materiali in misura pari al 40% (ICESP 2020). In tal modo, si potranno ottenere batterie più economiche e che incidono in misura minore sul costo finale di un veicolo elettrico.

Per quanto concerne il riutilizzo delle batterie, abbiamo inizialmente distinto due forme diverse: il re-use e il second-use. In particolare, abbiamo spostato la nostra attenzione

sulle applicazioni di second-use o second-life, vale a dire quelle applicazioni nel quale le batterie vengono impiegate per scopi diversi da quelli di progettazione iniziale. Le applicazioni di second life possono essere suddivise in: energy storage, regolazione d'area, trasmissione differita e ricarica veloce per EV.

Sebbene il riutilizzo sia posto un gradino più in alto nelle gerarchie di economia circolare rispetto al riciclo, una parte di letteratura non è d'accordo nell'impiegare le batterie esauste in questo modo, poiché si andrebbero a togliere risorse preziose al riciclo. Altri autori affermano, al contrario, che le quantità di batterie riutilizzate non sono tali da compromettere o privare il riciclaggio di risorse. Inoltre, i volumi previsti nei prossimi anni saranno in grado di bilanciare sia il riciclo che il second life, in quanto gli attuali stabilimenti di riciclo non hanno ancora la capacità di poter riciclare il carico di batterie esauste dei prossimi anni.

Per quanto riguarda i benefici apportati dal second life, abbiamo sottolineato come l'allungamento del ciclo di vita delle batterie possa ridurre le emissioni e gli impatti che deriverebbero dal produrre nuovi pacchi batteria da impiegare nello stoccaggio di energia o per altri scopi. Tuttavia, i benefici possono essere anche di natura economica. Con la crescente richiesta di energia da fonti rinnovabili, la domanda di sistemi di stoccaggio dell'energia sarà destinata ad aumentare in maniera esponenziale e le batterie di seconda vita potrebbero rappresentare la soluzione economica ed ambientale più vantaggiosa. Questo si tradurrebbe in una grande opportunità per i produttori di batterie, i quali essendo responsabili dei processi di End-of-Life delle batterie, vedrebbero il secondo utilizzo come un'occasione per ritardare i processi di smaltimento delle batterie, ovvero, la possibilità di rinviare oneri e costi nonché l'opportunità di spremere il valore dalle risorse esistenti. Questo permetterebbe ai produttori e a tutto il comparto automobilistico di conquistare una fetta del mercato in espansione dello stoccaggio di energia, il quale secondo diversi studi (Engel et al., 2019) potrebbe superare i 30 miliardi di dollari nel 2030. Di conseguenza, si potrebbero ottenere entrate economiche che avrebbero come effetto la riduzione dei prezzi dei LIB di nuova produzione a beneficio del costo finale degli EV.

Una volta individuati tutti questi aspetti è stato possibile rispondere alla domanda di ricerca. Se consideriamo la barriera finanziaria/economica come il principale ostacolo all'adozione degli EV, i benefici economici del riciclo e del riutilizzo che abbiamo individuato dovrebbero essere in grado di influenzare in maniera positiva i costi legati

alla produzione delle batterie e di conseguenza ridurre il costo complessivo dell'automobile, migliorando e accelerando in tal senso il tasso di diffusione della mobilità elettrica. Tuttavia, questa relazione non è lineare. Sono molti gli aspetti che intervengono nel processo di adozione della tecnologia e non è possibile indicare le pratiche di economia circolare come le soluzioni del problema. Inoltre, abbiamo già visto che a loro volta, sia il riciclo che il second life presentano numerosi problemi da risolvere, come ad esempio, le difficoltà riscontrate nell'affermazione di uno standard di batteria. La mancata uniformità delle LIB pregiudica la possibilità dell'industria del riciclo e del riutilizzo di poter ottenere tutti i benefici conseguibili. Infine, anche il basso volume di LIB a fine vita, le inefficienze nei processi di raccolta e smistamento e le carenze normative sono un grande ostacolo, poiché limitano le possibilità di espansione del mercato. Per questi motivi, è possibile affermare che riciclo e riutilizzo avrebbero le potenzialità di accelerare la transizione verso la mobilità elettrica, ma nel contesto attuale sono ancora troppe le barriere che si presentano, e per tali ragioni, sono identificati parzialmente come strumenti in grado di incrementare il tasso di diffusione degli EV. Tuttavia, attraverso l'analisi della letteratura è possibile identificare due possibili soluzioni che inciderebbero maggiormente sulla componente economica: 1) maggiori incentivi ed agevolazioni economiche ai consumatori; 2) maggiori investimenti nei processi di R&S. Per quanto concerne il primo aspetto, è chiaro che una maggiore incentivazione, mediante sgravi fiscali, detrazione di prezzo, eliminazione dei pedaggi, parcheggi e via dicendo sono al momento il mezzo più efficace per poter incrementare il tasso di diffusione degli EV. L'obiettivo deve essere quello di portare il prezzo dei veicoli elettrici ad un prezzo simile o pari a quello delle auto tradizionali, o almeno che il *payback* dell'investimento possa essere ottenuto in tempi ragionevoli. Il caso più eclatante è quello della Norvegia, che grazie ad una massiccia politica di incentivi e agevolazioni è riuscita negli anni ad essere il Paese nel mondo con la più alta quota di veicoli elettrici nel parco auto. Nel 2019 si registravano in Norvegia vendite di EV pari al 56% dei veicoli totali (IEA 2020). Naturalmente, un piano di incentivi deve essere accompagnato da un'agenda politica di lungo termine e da un'infrastruttura adeguata.

Per quanto riguarda il secondo punto, è estremamente importante che si realizzino maggiori investimenti nel campo della ricerca. Un potenziamento della R&S, mediante un maggior sostegno economico, può portare a molti vantaggi. Il progresso scientifico da sempre comporta un miglioramento tecnologico da un punto di vista economico e ambientale. Di conseguenza, investire nella ricerca significa individuare alternative

tecnologiche migliori oppure incrementare le tecnologie esistenti. Tuttavia, abbiamo ripetuto più volte che le transizioni verso una nuova tecnologia assumono un percorso lento e tortuoso, poiché il cambiamento di un sistema viene influenzato da numerose variabili, come ad esempio, gli attori e le strutture che agiscono a livello di regime. Pertanto, non vi è certezza che un'innovazione rivoluzionaria possa affermarsi nel breve periodo oppure sostituire quella attuale. Sebbene vi siano diverse nuove tecnologie nel campo delle automobili, è improbabile che nei prossimi anni il mercato si sposterà verso una tecnologia diversa da quella elettrica. Inoltre, si ritiene che la tecnologia dominante dei prossimi dieci anni nell'industria dell'auto elettrica sarà quella delle batterie agli ioni di litio. Per questi motivi, è fondamentale che l'intero settore automotive e i policy maker considerino e valutino nel lungo termine gli effetti ambientali e sociali che verranno prodotti dall'impiego dei veicoli elettrici e in particolare dall'uso di batterie, sia in termini di risorse richieste per la loro produzione sia per quanto riguarda il loro trattamento di fine vita.

In conclusione, alla luce di ciò che è stato presentato, è possibile affermare che il ruolo dell'economia circolare nella transizione verso la mobilità elettrica è imprescindibile. Le ragioni di questa affermazione si collegano a due aspetti fondamentali che abbiamo discusso in precedenza. Il primo motivo si riferisce alla capacità del riciclo e del second life delle batterie di ridurre l'impatto negativo della componente economica sul tasso di adozione e diffusione degli EV. Il secondo motivo - forse quello di maggiore importanza - è collegato al fatto che gli strumenti di economia circolare sono al momento gli unici mezzi in grado di gestire e affrontare in modo efficiente e sostenibile i problemi derivanti dall'impiego degli EV e in particolar modo delle LIB. I dati ci mostrano che il mercato dei veicoli elettrici è in costante aumento e che i volumi di batterie prodotte e che termineranno la loro prima vita utile è in crescita, evidenziando un serio problema ambientale e sociale negli anni avvenire. Le agende politiche di molti Paesi nel mondo sono in ritardo e le attuali barriere nel campo del riciclo e del riutilizzo non permettono al settore di espandere il proprio mercato ed ottenere i profitti necessari per la sua crescita e la sua stabilità. È quindi indispensabile un'inversione di marcia che sia orientata verso una prospettiva circolare, l'unica chiave di volta per una transizione tecnologica sostenibile.

Bibliografia

Accenture" *Circular Advantage, Innovative business Models and Technologies to Create Value in a World without Limits to Growth*", 2014, Pag. 24

Agora Energiewende and Sandbag "*The European Power Sector in 2019: Up-to-Date Analysis on the Electricity Transition*", 2020

Ahmadi L., Yip A., Fowler M., Young S.B., Fraser R.A., "*Environmental feasibility of re-use of electric vehicle batteries*", *Sustain. Energy Technol. Assessments* 6, 2014, 64–74

Ahuja J., Dawson L., Lee R., "*A circular economy for electric vehicle batteries: driving the change*", Department of Law, University of Birmingham, Birmingham, UK and Faraday Institution, Quad One, Science and Innovation Campus, Didcot, UK, *Journal of Property, Planning and Environmental Law* Vol. 12 No. 3, 2020 pp. 235-250 Emerald Publishing Limited 2514-9407

Ambrose H., Kendall A., "*Effects of battery chemistry and performance on the lifecycle greenhouse gas intensity of electric*", *Transportation Research Part D: Transport and Environment*. 47., 2016, 182-194

Beaudet A., Larouche F., Amouzegar K., Bouchard P., Zaghbi K., "*Key Challenges and Opportunities for Recycling Electric Vehicle Battery Materials*", *Sustainability* 2020, 12, 5837.

Bernhart W., "*The Lithium-Ion Battery Value Chain-Status, Trends and Implications. In Lithium-Ion Batteries*", Elsevier, Rome, Italy, 2014; pp. 553–565

Blomgren G.E., "*The Development and Future of Lithium-Ion Batteries*" *Journal of The Electrochemical Society* 164 (1), 2017, A5019–A5025

Bobba S., Podias A., Di Persio F., Messagie M., Tecchio P., Cusenza M.A., Eynard U., Mathieux F., Pfrang A., "*Sustainability Assessment of Second Life Application of Automotive Batteries (SASLAB)*", JRC Exploratory Research (2016-2017): Final technical report: August 2018; EUR 29321 EN, Publications Office of the European Union, Luxembourg, 2018

Boyden A., et al., "*The environmental impacts of recycling portable lithium-ion batteries*", *Procedia CIRP* 48, 2016, pp. 188-193

Burchart-Korol D., Jursova S., Folega P., Pustejovska P., "*Life cycle impact assessment of electric vehicle battery charging in European Union countries*", *Journal of Cleaner Production*, Volume 257, 2020

Campello-Vicente H., Peral-Orts R., Campillo-Davo N., Velasco-Sanchez E., "*The effect of electric vehicles on urban noise maps*", *Applied Acoustics*, Volume 116, 2017, Pages 59-64

Capellari S., "*L'auto elettrica come innovazione radicale: alcune riflessioni sulla situazione attuale*", in: Romeo Danielis (a cura di), "*L'auto elettrica come innovazione radicale: scenari di penetrazione di mercato e ricadute economiche e sociali*", Trieste, EUT Edizioni Università di Trieste, 2015, pp. 110-121.

Casals L.C., García B.A., Canal C., "Second life batteries lifespan: Rest of useful life and environmental analysis", *Journal of Environmental Management*, 232, 2019, 354-363

Casals L.C., García B.A., "Assessing Electric Vehicles Battery Second Life Remanufacture and Management", *Journal of Green Engineering*, 6, 2016, 77-98

Chen M., Ma X., Chen B., Arsenault R., Karlson P., Simon N., Wang Y., "Recycling End-of-Life Electric Vehicle Lithium-Ion Batteries", *Joule*, Volume 3, Issue 11, 2019, Pages 2622-2646

Christensen C.M., "The innovator's dilemma: when new technologies cause great firms to fail", Boston, Massachusetts, USA: Harvard Business School Press, 1997

Ciez R.E., Whitacre J.F., "Examining different recycling processes for lithium-ion batteries", *Nat. Sustain.* 2019, 2, 148-156

Comini G., "Inquinamento delle auto elettriche", CISM - Dipartimento di Energia e Ambiente, Piazza Garibaldi 18 - 33100 Udine, Marzo 2019

Danielis R., "La diffusione dell'auto elettrica: uno sguardo a livello mondiale", in: Romeo Danielis (a cura di), "L'auto elettrica come innovazione radicale: scenari di penetrazione di mercato e ricadute economiche e sociali", Trieste, EUT Edizioni Università di Trieste, 2015, pp. 8-29

De Angelis D., "Rapporto sugli aspetti ambientali rilevanti dei nuovi processi di tipo idrometallurgico per il recupero di materiali da batterie al litio a fine vita", in, Accordo di Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, Report RdS/PAR2013/198, 2014

Delogu M., Zanchi L., Dattilo C.A., Pierini M., "Innovative composites and hybrid materials for electric vehicles lightweight design in a sustainability perspective", *Materials Today Communications*, Volume 13, 2017, Pages 192-209

De Palma A., Kilani M., "Regulation in the automobile industry", *Int. J. Ind. Organ.* 26, 2008, 150-167

Duffner F., Wentker M., Greenwood M., Leker J., "Battery cost modeling: A review and directions for future research", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2020, 127, 109872

Duncan J., "Any Colour-So Long as it's Black: Designing the Model T Ford 1906-1908", Exisle Press, Auckland, 2008

Eduljee G., Harrison R.M., "Electronic Waste Management", Royal Society of Chemistry, 2020

EEA, "Air quality in Europe", European Environment Agency report, 2017

EEA, "Electric vehicles from life cycle and circular economy perspectives", European Environment Agency report, 2018

Elkind E., *“Reuse and repower. How to save money and clean the grid with second-life electric vehicle batteries”*, Climate Change and Business Research Initiative at the UCLA School of Law’s Emmett Institute on Climate Change and the Environment and UC Berkeley School of Law’s Center for Law, Energy & the Environment (CLEE). Berkeley (CA), 2014

Ellen MacArthur Foundation, *“Towards the Circular Economy: Economic and Business rationale for an accelerated transition”*, 2014

Ellingsen L., et al., *“The size and range effect: lifecycle greenhouse gas emissions of electric vehicles”*, Environmental Research Letters 11, 2016, pp. 1-8

Ellingsen L. and Hung C., *“Research for TRAN committee - resources, energy, and lifecycle greenhouse gas emission aspects of electric vehicles”*, Policy Department for Structural and Cohesion Policies, European Parliament, Brussels, 2018

Engel H., Hertzke P., Siccardo G., *“Second-life EV batteries: The newest value pool in energy storage”*, McKinsey Center for Future Mobility, 2019

Enrietti A., Patrucco P.P., *“Open Innovation and Systemic reconfiguration in the car industry: the case of electric vehicles”*, Bureau of research in innovation, 2010

European Commission, *“Directive 2000/53/EC of the European Parliament and of the Council of 18 September 2000 on End-of-Life Vehicles”*

European Commission, *“Directive 2006/66/EC of the European Parliament and of the Council of 6 September 2006 on Batteries and Accumulators and Waste Batteries and Accumulators and Repealing Directive 91/157/EEC”*

Faria R., et al., *“Impact of the electricity mix and use profile in the life-cycle assessment of electric vehicles”*, Renewable and Sustainable Energy Reviews 24, 2013 pp. 271-287

Gao W., Liu C., Cao H., Zheng X., Lin X., Wang H., Zhang Y., Sun Z., *“Comprehensive evaluation on effective leaching of critical metals from spent lithium-ion batteries”*, Waste Management 75, 2018, 477–485

Gaustad G., *“Life-cycles of lithium-ion batteries: understanding impacts from extraction to end-of-life”*, 2018

Geels F.W., *“Processes and patterns in transitions and system innovations: refining the co-evolutionary multi-level perspective”*, Technol. Forecast. Soc. Chang. 72, 6, 2005, 681–696

Georgi-Maschler T., Friedrich B., Weyhe R., Heegn H., Rutz M., *“Development of a recycling process for Li-ion batteries”*, J. Power Sources 207, 2012, 173–182

Gulley A.L., McCullough E.A., Shedd K.B., *“China’s domestic and foreign influence in the global cobalt supply chain, Resource Policy”*, 2019, 62, p. 317-323

Hao H., Mu Z., Jiang S., Liu Z., Zhao F., *“GHG Emissions from the Production of Lithium-Ion Batteries for Electric Vehicles in China”*, Sustainability, 2017, 9, 504

Harper G., Sommerville R., Kendrick E. et al., “*Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles*”, *Nature* 575, 2019, 75–86

Hawkins T., et al., “*Comparative environmental life cycle assessment of conventional and electric vehicles*”, *Journal of Industrial Ecology* 17, 2013, pp. 53-64

Heiskanen S. H., Kim J., Lucht B. L., “*Generation and Evolution of the Solid Electrolyte Interphase of Lithium-Ion Batteries*”, *Joule*, 2019, 3, p. 2322-2333

Hendrickson T., et al., “*Life-cycle implications and supply chain logistics of electric vehicle battery recycling in California*”, *Environmental Research Letters* 10, 2015, pp. 1-10

Hill N., Clarke D., Blair L. and Menadue H., “*Circular economy perspectives for the management of batteries used in electric vehicles*”, European commission draft project report, Public Office of the European Union, 2019

Huo H., et al., “*Life-cycle assessment of greenhouse gas and air emissions of electric vehicles: a comparison between China and the U.S.*”, *Atmospheric Environment* 108, 2015, pp. 107-116

ICESP, “*Sistemi di progettazione, produzione, distribuzione e consumo sostenibili e circolari*” della Piattaforma Italian Circular Economy Stakeholder Platform (ICESP), 2020

IEEFA, “*Analysts see Europe passing U.S. in battery storage installation by 2023*”, 2019

IEA (International Energy Agency), “*Global EV Outlook 2020*”, 2020

Itou Y., Ukyo Y., “*Performance of LiNiCoO₂ materials for advanced lithium-ion batteries*”, *J. Power Sources*, 2005, 146, p. 39-44

Kampker A., Heimes H.H., Ordnung M., Lienemann C., Hollah A., Sarovic N., “*Evaluation of a Remanufacturing for Lithium-Ion Batteries from Electric Cars*”, *Int. J. Mech. Aerospace, Ind. Mechatron. Manuf. Eng.* 10, 2017, 6–13

Kim H. C., et al., “*Cradle-to-gate emissions from a commercial electric vehicle Li-ion battery: a comparative analysis*”, *Environmental Science and Technology* 50, 14, 2016 pp. 7715-7722

Krumm J., “*How people use their vehicles: statistics from the 2009 national household travel survey*” Technical Report, SAE Technical Paper, 2012

Lazy P., Long J., Spindler W., “*The Circular Economy Handbook - Realizing the Circular Advantage*”, 2020

LeasePlan, “*Car Cost Index 2020*”, LeasePlan Corporation, September 2020

Lebedeva N., Di Persio F., Boon-Brett L., “*Lithium-ion battery value chain and related opportunities for Europe*”, JRC, 2016

Li M., Lu J., Chen Z., Amine K., “*30 Years of Lithium-Ion Batteries*”, *Adv. Mater.*, 2018, 30

Loorbach D., Rotmans J., *"The practice of transition management: Examples and lessons from four distinct cases"*, Futures 42, 2010, 237-246

Loorbach, D., *"Transition Management for Sustainable Development: A Prescriptive, Complexity-Based Governance Framework"*, Vol.23, No.1, 2010, pp.161-183

Majeau-Bettez G., Hawkins T.R., Strømman A.H., *"Life Cycle Environmental Assessment of Lithium-Ion and Nickel Metal Hydride Batteries for Plug-In Hybrid and Battery Electric Vehicles"*, May 2011, Environmental Science & Technology 45

Markard J., Truffer B., *"Technological innovation systems and the multi-level perspective: Towards an integrated framework"*, Cirrus - Innovation Research in Utility Sectors, Eawag, Swiss Federal Institute of Aquatic Science and Technology, 8600 Dübendorf, Switzerland, 2008

Markard J., Stadelmann M., Truffer B., *"Prospective analysis of technological innovation systems: identifying technological and organizational development options for biogas in Switzerland"*, Res. Policy 38 (4) (2009) 655–667

Mayyas A., et al., *"Vehicle's lightweight design vs. electrification from life cycle assessment perspective"*, Journal of Cleaner Production 167, 2017, pp. 687-701

Melin H.E., *"State of the art in reuse and recycling of lithium-ion batteries – a research review"*, Circular Energy Storage, Commissioned by The Swedish Energy Agency, 2019

Merli R., Preziosi M., Acampora A., *"How do scholars approach the circular economy? A systematic literature review"* J. Clean. Prod. 178, 2018, 703–722

Mohammadi F., *"Electric Vehicle Battery Market Analysis: Lithium-Ion"*, In Proceedings of the 1st International Conference on Modern Approaches in Engineering Science, Tbilisi, Georgia, 21 November 2018

Mossali I., Picone N., Gentilini L., Rodríguez O., Pérez J.M., Colledani M., *"Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments"*, Journal of Environmental Management, Volume 264, 2020

Nelson P., Gallagher K., Bloom I., Dees D., *"Modeling the performance and cost of lithium-ion batteries for electric-drive vehicles"*, ANL, 2011

Neubauer J., Smith K., Wood E., Pesaran A., *"Identifying and Overcoming Critical Barriers to Widespread Second Use of PEV Batteries"*, National Renewable Energy Laboratory (NREL), 2015

Nordelöf A., et al., *"Environmental impacts of hybrid, plug-in hybrid, and battery electric vehicles - what can we learn from life cycle assessment?"*, International Journal of Life Cycle Assessment 19, 2014, pp. 1866-1890

Nealer R., Hendrickson T., “*Review of recent lifecycle assessments of energy and greenhouse gas emissions for electric vehicles*”, Current Sustainable-Renewable Energy Reports, 2015, pp. 66-73

OECD, “*Extended Producer Responsibility: A Guidance Manual for Governments*”, OECD Publishing, 2001

Olsson L., Fallahi S., Schnurr M., Diener D. Van Loon, P., “*Circular Business Models for Extended EV Battery Life*”, Batteries 2018, 4, 57

Oltra V., Saint Jean M., “*Variety of technological trajectories in low emission vehicles (LEVs): A patent data analysis*”, Journal of Cleaner Production 17(2), 2019, 201–213

RIVM, “*Effect of electric cars on traffic noise and safety*”, National Institute for Public Health and the Environment, Netherlands, 2010

Pasquali M., Vellucci F., “*Second Life, approfondimento sullo studio dei criteri di ritiro delle celle*”, Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, Report RdS/PAR2016/164, 2017

Pasquali M., Vellucci F., “*Second Life, definizione dei criteri di ritiro delle celle dalla prima applicazione*”, Programma Ministero dello Sviluppo Economico - ENEA, Report RdS/PAR2015/195, 2016

Pillot C. “*The Rechargeable Battery Market and Main Trends 2014–2025*”, in Proceedings of the Advanced Automotive Battery Conference, Chicago, IL, USA, 21 September 2016

Pillot C. “*Current Status and Future Trends for the Lithium-ion Battery Market*”, Avicenne Energy, London, UK, 2019

Pinegar H., Smith Y.R., “*Recycling of End-of-Life Lithium-Ion Batteries, Part I: Commercial Processes*”, Journal of Sustainable Metallurgy, 2019, 402–416

Pinegar H., Smith Y.R., “*Recycling of End-of-Life Lithium-Ion Batteries, Part II: Laboratory-Scale Research Developments in Mechanical, Thermal, and Leaching Treatments*”, Journal of Sustainable Metallurgy, 2020, 142-160

Philippot M., Alvarez G., Ayerbe E., Van Mierlo J., Messagie M., “*Eco-Efficiency of a Lithium-Ion Battery for Electric Vehicles: Influence of Manufacturing Country and Commodity Prices on GHG Emissions and Costs*”, Batteries, 2019, 5, 23

Purwanto A., Yudha C.S., Ubaidillah U., Widiyandari H., Ogi T., “*NCA cathode material: synthesis methods and performance enhancement efforts*”, Materials Research Express, IOP Publishing, 5 (12), 2018, p. 122001

RECHARGE aisbl, “*Re-use and Second use of Rechargeable Batteries*” October 2014 / v.14

Reinhardt R., Domingo S.G., Garcia B.A., Christodoulou I., “*Macro environmental analysis of the electric vehicle battery second use market*”, Int. Conf. Eur. Energy Mark. EEM, 2017

Reid G., Julve J., *"Second Life-Batteries as Flexible Storage for Renewables Energies"*, Berlin, Germany, 2016

Richa K., Babbitt C.W., Gaustad G., Wang X., *"A future perspective on lithium-ion battery waste flows from electric vehicles"*, Resource, Conserv Recycle. 2014, 83, 63- 76

Rip A., Kemp R., *"Technological change"*, in S. Rayner and E.L. Malone, *"Human Choice and Climate Change ± An International Assessment"*, Vol 2, Batelle Press, Washington DC, 1998, pp 327-399

Robb J., *"Making Stadiums and Arenas More Resilient and Energy Efficient"*, Publication No. WP701001EN/CSSC-868, Eaton xStorage Buildings White paper, March 2018

Rothwell R., *"Towards the Fifth-generation Innovation Process"*, International Marketing Review, Vol. 11 No. 1, 1994, pp. 7-31

Rotmans J., Kemp R., Van Asselt M.B.A., Geels F.W., Verbong G., Molendijk K., *"Transitions & Transition Management: the case of an emission-poor energy supply"*, Maastricht: ICIS, International Centre for Integrative Studies, 2000

Rotmans J., Kemp, R., Van Asselt, M.B.A., *"More evolution than revolution: transition management in public policy"*, Foresight, Vol.3 Iss 1, 2001, pp.15-31

Rowson N., *"Processing options and future possibilities for sustainable recycling of hybrid electric vehicles and internal combustion engine vehicles at vehicle recycling sites"*, EREAN/DEMETER Policy Brief, 2017

Sakai, S.I., et al., *"An international comparative study of end-of-life vehicle (ELV) recycling systems"*, Journal of Material Cycles Waste Management 16, 2014, pp. 1-20

Santos G., Behrendt H., Maconi L., Shirvani T., Teytelboym A., *"Part I: externalities and economic policies in road transport"*, Res. Transp. Econ. 28, 1, 2010, 2-45

Schilling M. A., Izzo F., *"Strategic Management of Technological Innovation"*, McGraw-Hill, 2019, pag. 87-89

Schmookler J., *"Innovation and economic growth"*, Cambridge, Mass., 1966

Schüler D., Dolega P., Degreif S., *"Social, Economic and Environmental Challenges in Primary Lithium and Cobalt Sourcing for the Rapidly Increasing Electric Mobility Sector"*, European Policy Brief, 2018

Schumpeter, J.A., *"Business cycles: a theoretical, historical and statistical analysis of the capitalist process"*, 2 vol., London-New York 1939

Schumpeter, J.A., *"Capitalism, socialism, and democracy"*, New York 1942

Schumpeter J.A., *"Theorie der wirtschaftlichen Entwicklung"*, München-Leipzig 1912

Scorrano M., Giansoldati M., Danielis R., *“Un modello di stima del Costo Totale di Possesso per valutare la convenienza all’acquisto di un’auto elettrica”*, Dipartimento di Scienze politiche e sociali dell’Università degli Studi di Trieste, 2018

Stampatori D., Raimondi P.P., Noussan M., *“Li-Ion Batteries: A Review of a Key Technology for Transport Decarbonization”*, *Energies* 2020, 13, 2638

Start Magazine, *“Libro bianco sull’auto elettrica: facciamo l’e-mobility”*, Innovative Publishing, Effemme Grafiche, novembre 2018

Susan I. Sun, Andrew J. Chipperfield, Mahdi Kiaee, Richard G.A. Wills, *“Effects of market dynamics on the time-evolving price of second-life electric vehicle batteries”*, *Journal of Energy Storage*, Volume 19, 2018, Pages 41-51

Tytgat J., Tomboy W., *“New insights into residual value: RECHARGE perspective”*, 5th E-Mobility Stateholder Forum, 2017

Tushman L.M., O'Reilly C.A., *“Ambidextrous organizations: managing evolutionary and revolutionary change”*, *Calif. Manag. Rev.* 38, 4, 1996, 8–30

UNEP, *“Metal Recycling – Opportunities, Limits, Infrastructure”*, 2013

Unruh G.C., *“Understanding carbon lock-in”*, *Energy Policy* 28, 12, 2000, 817–830

U.S. Geological Survey, *“Mineral commodity summaries 2020”*, 2020, 200 p

Velázquez-Martínez O., Valio J., Santasalo-Aarnio A., Reuter M., Serna-Guerrero R. *“A Critical Review of Lithium-Ion Battery Recycling Processes from a Circular Economy Perspective”*, *Batteries* 2019, 5, 68.

Wang, X., Gaustad G., Babbitt C.W., Richa K., *“Economies of scale for future lithium-ion battery recycling infrastructure”*, *Resour. Conserv. Recycl.* 2014, 83, 53–62

Wangda L., Erickson E.M., Manthiram, A. *“High-nickel layered oxide cathodes for lithium-based automotive batteries”*, *Nat Energy* 5, 2020, 26–34

Wegener K., Chen W. H., Dietrich F., Dröder, K., Kara S., *“Robot assisted disassembly for the recycling of electric vehicle batteries”*, the 22nd CIRP conference on life cycle engineering. *Procedia CIRP* 29, 2015, 716–721

Wells P., Nieuwenhuis P., *“Transition failure: Understanding continuity in the automotive industry”*, *Technological Forecasting and Social Change*, Volume 79, Issue 9, 2012, Pages 1681-1692

Wentker M., Greenwood M., Leker J., *“A Bottom-Up Approach to Lithium-Ion Battery Cost Modeling with a Focus on Cathode Active Materials”*, *Energies*, 2019, 12, 504

Werner D., Peuker U.A, Mütze T., *“Recycling Chain for Spent Lithium-Ion Batteries”*, *Metals*, 10, 2020, 316

Windisch, E., *“Driving electric? A financial analysis of electric vehicle policies in France”*, Ecole des Ponts ParisTech, 2013

World Economic Forum (WEF), *“A Vision for a Sustainable Battery Value Chain in 2030 Unlocking the Full Potential to Power Sustainable Development and Climate Change Mitigation”*, 2019

Yun L., Linh D., Shui L., Peng X., Garg A., Asghari S., Sandoval J, *“Metallurgical and mechanical methods for recycling of lithium-ion battery pack for electric vehicles”*, Resources, Conservation and Recycling, Volume 136, 2018, Pages 198-208

Zhen-Yu S., Qing S., Jia-Jun M., Bai-Chen X., *“What are the barriers to widespread adoption of battery electric vehicles? A survey of public perception in Tianjin, China”*, Transport Policy, Volume 56, 2017, Pages 29-40

Sitografia

Benchmark minerals, *“Who is winning the global lithium-ion battery arms race?”*, <https://www.benchmarkminerals.com/who-is-winning-the-global-lithium-ion-battery-arms-race/>

BloombergNEF, *“A Behind the Scenes Take on Lithium-ion Battery Prices”*, Logan Goldie Scot, Head of Energy Storage, 2019, <https://about.bnef.com/blog/behind-scenes-take-lithium-ion-battery-prices/>

BloombergNEF *“Battery Pack Prices Fall As Market Ramps Up With Market Average At \$156/kWh In 2019”*, 2019, <https://about.bnef.com/blog/battery-pack-prices-fall-as-market-ramps-up-with-market-average-at-156-kwh-in-2019/>

BYD (2020), *“BYD’s New Blade Battery Set to Redefine EV Safety Standards”*, www.byd.com/en/news/2020-03-30/BYD%27s-New-Blade-Battery-Set-to-Redefine-EV-Safety-Standards

“CATL (Contemporary Amperex Technology Co. Limited) (2019), *“CATL to Drive New Wave of e-Mobility with Next-Generation Electric Vehicle Battery Technology”*, www.prnewswire.com/news-releases/catl-to-drive-new-wave-of-e-mobility-with-nextgeneration-electric-vehicle-battery-technology-300915309.html

Cobalt Institute, *“Lithium-ion”*, <https://www.cobaltinstitute.org/lithium-ion-batteries.html>

Consiglio dell’Unione Europea, *“Cambiamenti climatici: il contributo dell’UE”*, <https://www.consilium.europa.eu/it/policies/climate-change/#>

Emission Analytics, *“Pollution From Tyre Wear 1,000 Times Worse Than Exhaust Emissions”*, 2020, <https://www.emissionsanalytics.com/news/pollution-tyre-wear-worse-exhaust-emissions>

EnelX, *“Otto Paesi europei e le loro politiche in materia di veicoli elettrici”*, Charles Morris, 2018, <https://www.enelx.com/it/it/news-media/notizie/2018/11/mercato-veicoli-elettrici-europa>

E-station store, *“Guida alla ricarica dei veicoli elettrici”*, www.e-station-store.it

European Alternative Fuels Observatory, *“TOTAL NUMBER AF VEHICLES ELECTRICITY (2020)”*, <https://www.eafo.eu/countries/italy/1739/summary/compare>

European Alternative Fuels Observatory, *“NORMAL AND HIGH-POWER PUBLIC RECHARGING POINTS (2020)”*, <https://www.eafo.eu/alternative-fuels/electricity/charging-infra-stats#>

Forbes, *“Why China Is Dominating Lithium-Ion Battery Production”*, <https://www.forbes.com/sites/rpapier/2019/08/04/why-china-is-dominating-lithium-ion-battery-production/?sh=4b3015e53786>

Gazzetta Motori *“Auto elettriche: in arrivo la fabbrica per riciclare le batterie”*, Giuseppe Croce, 2020, <https://www.gazzetta.it/motori/la-mia-auto/01-06-2020/auto-elettriche-arrivo-fabbrica-riciclare-batterie-3701466624555.shtml>

Green Tech Media, *“How China Is Cornering the Lithium-Ion Cell Recycling Market”*, Jason Deign, 2019, <https://www.greentechmedia.com/articles/read/how-china-is-cornering-the-lithium-ion-cell-recycling-market>

Hardware Upgrade, *“Umicore e Northvolt, due aziende europee impegnate nel riciclaggio delle batterie per veicoli elettrici”*, Carlo Pisani, 2019, <https://auto.hwupgrade.it/news/tecnologia/umicore-e-northvolt-due-aziende-europee-impegnate-nel-riciclaggio-delle-batterie-per-veicoli-elettrici-86179.html>

Il Sole 24 ore, *“Automotive pioniere dell'economia circolare”*, Nicola Giardino, 2017, https://www.ilsole24ore.com/art/automotive-pioniere-dell-economia-circolare-AE6zfKs?refresh_ce=1

InsideEvs *“La sostenibilità passa anche dalle gomme: la seconda vita dei pneumatici”*, <https://insideevs.it/features/461131/riciclo-pneumatici-gomme-pfu-second-life/>

Institute of the Motor Industry (IMI) *“Raises Skills And Regulation Concerns As Demand For Electric And Hybrid Vehicle Surges”*, 2015, <https://www.theimi.org.uk/news/imi-raises-skillsand-regulation-concerns-demand-electric-and-hybrid-vehicle-surges>

L'automobile, *“L'auto in un'economia circolare”*, Spaziani Stefania, 2018, <https://www.lautomobile.aci.it/articoli/2018/08/20/lauto-in-uneconomia-circolare.html>

Lifegate, *“L'auto del futuro sarà in grado di rigenerarsi”*, Bompan, 2018”, <https://www.lifegate.it/auto-del-futuro-automotive-sposini>

News Auto, *“Quanto costa ricaricare un'auto elettrica”*, Salvatore Perna, 2020, <https://www.newsauto.it/guide/auto-elettrica-quanto-costa-ricaricare-e-quanto-consuma-costo-corrente-energia-elettrica-ev-2020-243194/#foto-10>

News Auto, “Durata batterie al litio auto elettriche, quanto durano, come si deteriorano”, Manuel Cerfeda, 2020, <https://www.newsauto.it/guide/durata-batterie-auto-elettriche-garanzia-degrado-quanto-durano-2020-224159/#foto-25>

News Auto, “Auto elettrica, benzina o diesel? Alimentazioni a confronto”, Redazione Web, 2020, <https://www.newsauto.it/guide/auto-elettrica-benzina-diesel-confronto-2020-269792/>

Rete Clima, “LCA – Life Cycle Assessment (Analisi del ciclo di vita)”, <https://www.reteclima.it/lca-life-cycle-assessment-analisi-del-ciclo-di-vita/>

Sicuraauto, “Batteria auto elettrica: garanzia a rischio senza tagliandi regolari”, 2019, <https://www.sicuraauto.it/ricambi-e-accessori/tecnica-e-manutenzione/batteria-auto-elettrica-garanzia-a-rischio-senza-tagliandi-regolari/>

Sicuraauto, “Auto nuove in Europa: -17% le immatricolazioni ad agosto 2020”, 2020, <https://www.sicuraauto.it/news/attualita-e-curiosita/auto-nuove-in-europa-17-le-immatricolazioni-ad-agosto-2020/>

Sicuraauto, “Total Cost Ownership 2020: costi auto elettriche e ICE a confronto in Europa”, 2020, <https://www.sicuraauto.it/news/attualita-e-curiosita/total-cost-ownership-2020-costi-auto-elettriche-e-ice-a-confronto-in-europa/>

Sicuraauto, “Quanto costa la manutenzione di un’auto elettrica o ibrida – i risultati”, D’ambrosi, 2019, <https://www.sicuraauto.it/news/auto-elettriche-ibride/quanto-costa-la-manutenzione-di-unauto-elettrica-o-ibrida-i-risultati/>

Treccani, “Innovazioni tecnologiche e organizzative”, Christopher Freeman, Enciclopedia delle scienze sociali (1994), [https://www.treccani.it/enciclopedia/innovazioni-tecnologiche-e-organizzative_\(Enciclopedia-delle-scienze-sociali\)/](https://www.treccani.it/enciclopedia/innovazioni-tecnologiche-e-organizzative_(Enciclopedia-delle-scienze-sociali)/)

Wikipedia, “Accumulatore agli ioni di litio”, https://it.wikipedia.org/wiki/Accumulatore_agli_ioni_di_litio