



IL RICICLO DELLE BATTERIE DEI VEICOLI ELETTRICI @2050: SCENARI EVOLUTIVI E TECNOLOGIE ABILITANTI

Obiettivi del report

Il report presenta uno scenario al 2050 del riciclo di batterie dei veicoli elettrici in Europa e Italia



Presentare uno scenario al 2050 del mercato del riciclo delle batterie dei veicoli elettrici in Europa e in Italia in termini di dimensionamento, investimenti necessari, valore di mercato, modelli di business e tecnologie disponibili, offrendo un contesto di riferimento comune per tutti gli operatori del settore e i policy maker

Sezioni e ambiti di analisi del report

1

Stima del mercato del riciclo e degli investimenti necessari (Europa e Italia)

- Evoluzione delle vendite di veicoli elettrici e delle caratteristiche delle loro batterie
- Volumi di batterie destinati al riciclo e ad applicazioni di seconda vita
- Investimenti necessari per intercettare i volumi destinati al riciclo attesi
- Materiali recuperati come output dei processi di riciclo
- Valore di mercato del riciclo di batterie in termini di ricavi e marginalità associati alla vendita della materia prima seconda

2

Considerazioni sui modelli di business

- Flussi operativi ed economici lungo la catena del valore delle batterie dei veicoli elettrici
- Ruolo attuale e scenari evolutivi dei diversi attori coinvolti lungo la catena del valore
- Fattori critici per il successo dei modelli di business per la gestione delle batterie dei veicoli elettrici a fine vita, possibili strategie e principali evidenze di mercato

3

View tecnologica

- Processi e tecnologie di riciclo consolidate e in corso di sviluppo
- Difficoltà tecniche lungo la catena del valore e potenziali soluzioni
- Principali driver industriali e trend tecnologici attesi per le future generazioni di batterie e potenziale impatto sui processi di riciclo

Executive Summary (1/3)

Stima del mercato del riciclo e degli investimenti necessari

1

Stima del
mercato del
riciclo e degli
investimenti
necessari

- L'immesso sul mercato di batterie a ioni di litio è trainato dalla **vendita di veicoli elettrici**, prevista in **forte crescita nei prossimi anni** (CAGR 2020-2030 +23% in Europa e +32% in Italia), incentivata anche dall'evoluzione normativa a livello Europeo
- Alla fine del primo ciclo di vita di una batteria, è possibile sviluppare soluzioni di “**seconda vita**” tramite strategie di **riutilizzo e ricondizionamento** che consentono di **prolungarne l'utilizzo di ~10 anni**
 - Ad oggi, in Europa, car maker e altri operatori della filiera stanno sperimentando **applicazioni stazionarie** con batterie a fine prima vita
 - L'**offerta di capacità** da batterie di “seconda vita” è prevista in aumento e raggiungerà **~647 GWh in Europa** al 2050, di cui **~77 GWh in Italia**, supportata anche dall'aumento di dispositivi per la corretta diagnosi dello stato di salute delle batterie esauste nonché della crescente densità energetica delle batterie immatricolate
- I **volumi destinati al riciclo**, costituiti da batterie a fine prima vita danneggiate, batterie a fine «seconda vita» e scarti di produzione, al 2050 raggiungeranno **~3,4 Mton in Europa**, di cui **~0,4 Mton in Italia**
- Ad oggi, in Europa, le prime generazioni di batterie esauste vengono trattate in impianti progettati per batterie diverse (es. al piombo), con una capacità complessiva di ~80 kton/anno, mentre in Italia non esistono impianti adeguati al riciclo di batterie di veicoli elettrici; per intercettare tutti i volumi generati sul territorio Europeo, saranno necessari **investimenti pari a ~2,6 Mld €, di cui ~0,3 M€ destinati al mercato italiano**
- Un **processo di riciclo idrometallurgico** tipico consente di **recuperare il ~60% dei materiali in ingresso** attraverso le fasi di disassemblaggio, pre-trattamento e trattamento, per cui al 2050 sarà possibile recuperare fino a **~2,1 Mton di materiali in Europa, di cui ~0,2 Mton in Italia**
- **Nichel, cobalto e litio**, contenuti nel catodo all'interno della cella, rappresentano il **~13% dei volumi riciclati** e potranno consentire di generare **marginalità** tramite la vendita finalizzata a nuovi processi produttivi; con riferimento agli *economics* della conduzione di un impianto di riciclo:
 - I **costi operativi** e di **ammortamento** per il trattamento di nichel, cobalto e litio al 2050 saranno pari a **~2,9 Mld€ in Europa, di cui ~0,3 Mld€ in Italia**
 - Il raggiungimento dei **nuovi target Europei sul contenuto minimo di riciclato** nelle batterie per veicoli elettrici a partire dal 2030 impatta fortemente il **prezzo di vendita** del materiale riciclato, che è stato stimato applicando uno sconto sui prezzi del vergine in base ad un'analisi di domanda-offerta funzionale al rispetto dei target; gli investimenti ipotizzati consentiranno di raggiungere tutti gli ambiziosi target al 2040
 - I **ricavi generati dalla vendita** di nichel, cobalto e litio riciclati saranno pari a **4,1 – 6,1 Mld€ in Europa, di cui 0,4 – 0,6 Mld€ in Italia**, con una **marginalità di 1,2 – 3,2 Mld€ in Europa, di cui 0,1 – 0,3 Mld€ in Italia**

Executive Summary (2/3)

Considerazioni sui modelli di business

2

Considerazioni
sui modelli di
business

- La **catena del valore** delle batterie per veicoli elettrici è strutturata in **due macro-fasi**: i) **produzione e utilizzo** e ii) **gestione del fine vita**, che include le fasi di raccolta, trasporto, eventuale applicazione di seconda vita e riciclo della batteria e termina con la vendita di materiale riciclato
- I **flussi operativi ed economici** per la gestione del fine vita sono **organizzati dai Sistemi di Responsabilità Estesa del Produttore** (EPR):
 - **Oggi**, i Sistemi EPR **sostengono un costo per ciascuna fase del fine vita**, incluso l'avvio a riciclo, per cui erogano un pagamento a favore delle aziende di riciclo
 - In **futuro**, il raggiungimento della scala adeguata e dell'ottimizzazione dei costi potrebbe consentire un'**inversione del flusso economico**, ovvero il riconoscimento di un pagamento a favore dei Sistemi EPR, come già avviene in altre filiere più sviluppate (es. batterie al piombo)
- Le opportunità derivabili dalla gestione delle batterie a fine vita stanno già cominciando ad incentivare gli **attori tradizionali** della catena del valore ad **estendere le proprie competenze** in ruoli adiacenti ed in particolare:
 - I **produttori di batterie** integrano l'**attività di riciclo**, sviluppando capacità impiantistica per trattare anche i propri scarti di produzione
 - I **produttori di veicoli elettrici** investigano **opportunità di «seconda vita»** delle batterie, per sfruttarne la capacità residua
 - L'**accesso alle batterie a fine vita** da parte dei produttori è supportato anche dall'**innovazione dei modelli di vendita** dei veicoli elettrici, per cui la **proprietà** della batteria rimane in capo ai produttori stessi e i **punti di raccolta** sono più concentrati sul territorio
- Il **successo dei modelli di business** per gestire il fine vita delle batterie dipende da **6 fattori critici** che interessano l'intera catena del valore:
 - 1 **Evoluzione e adeguamento normativo**, in corso di definizione a livello Europeo, per fornire incentivi all'adeguata gestione del fine vita
 - 2 **Scala adeguata per la sostenibilità economica**, per giustificare l'investimento nell'infrastruttura di riciclo
 - 3 **Ottimizzazione della logistica**, i cui costi sono influenzati dalla classificazione delle batterie esauste, distribuzione dei punti di raccolta e capacità infrastrutturale sul territorio
 - 4 **Efficacia tecnologica di riciclo**, valutata in base al livello di maturità tecnologica, capacità di recupero di materiale e costi operativi associati
 - 5 **Domanda di materiale riciclato**, supportata dai nuovi target Europei, il cui rischio può essere ridotto diversificandone i mercati di sbocco
 - 6 **Stabilità dell'offerta di materie prime**, tramite lo sviluppo di una filiera locale di materiale riciclato per mitigare le fonti di instabilità che interessano la catena di fornitura dei materiali vergini per le batterie per EV, caratterizzata da scarsa disponibilità e accessibilità

Executive Summary (3/3)

View tecnologica

3

View
tecnologica

- Il **processo di riciclo** per le batterie dei veicoli elettrici è strutturato in **4 principali fasi**:
 - 1 **Preselezione e scarica**, funzionale all'isolamento della batteria dal veicolo e alla sua messa in sicurezza tramite rimozione dell'energia residua
 - 2 **Disassemblaggio**, che libera i moduli e le celle che compongono la batteria dalla sovrastruttura che le ingloba e permette di destinare a catene di recupero dedicate gli altri componenti del sistema batteria
 - 3 **Pre-trattamento** (meccanico / termico / chimico o una combinazione di questi), con lo scopo di liberare e pre-concentrare i metalli target in un mix di polveri anodiche e catodiche denominato «*black mass*»
 - 4 **Trattamento**, che permette il recupero dei composti chimici contenenti i metalli target, tramite:
 - **Processi pirometallurgici per l'estrazione di metalli**, che stimolano reazioni chimiche e fisiche attraverso alte temperature e consentono di recuperare cobalto, rame e nichel
 - **Processi idrometallurgici per l'estrazione di metalli**, che utilizzano acidi organici, acidi inorganici, ammoniaca o microorganismi per recuperare, con elevati tassi, litio, cobalto e nichel
 - **Processi per la rigenerazione di anodo e catodo** («*direct recycling*»), che consentono di evitare il passaggio da precursori chimici
- **4 trend tecnologici** potrebbero interessare le nuove generazioni di batterie con potenziali impatti sulla configurazione dei processi di riciclo:
 - 1 **La diffusione di celle prismatiche** e il **design della batteria** caratterizzato da soluzioni modulari e giunzioni standardizzate faciliteranno l'automazione dei processi di disassemblaggio
 - 2 **L'evoluzione del catodo** verso una **progressiva riduzione di cobalto** a favore del nichel o di materiali poveri quali zolfo e ossigeno supporterà l'impiego di trattamenti idrometallurgici o di *direct recycling* rispetto a quelli pirometallurgici, basati prevalentemente sul recupero del cobalto
 - 3 **La sostituzione della grafite all'interno dell'anodo** con materiali quali composito **grafite-silicio, silicio o litio metallo** non avrà particolari impatti sui processi di riciclo al netto dell'adattamento in fase di pre-trattamento per garantire inertizzazione del materiale attivo nel caso di impiego di litio metallo
 - 4 **La transizione dell'elettrolita da stato liquido a solido** (ceramico o polimerico) non avrà impatti significativi sui processi di riciclo ma l'impiego di materiale ceramico potrebbe contaminare la *black mass* riducendo la concentrazione dei metalli target

Agenda

Stima del mercato del riciclo e degli investimenti necessari

Europa

Italia

Considerazioni sui modelli di business

View tecnologica

Agenda

Stima del mercato del riciclo e degli investimenti necessari

Europa

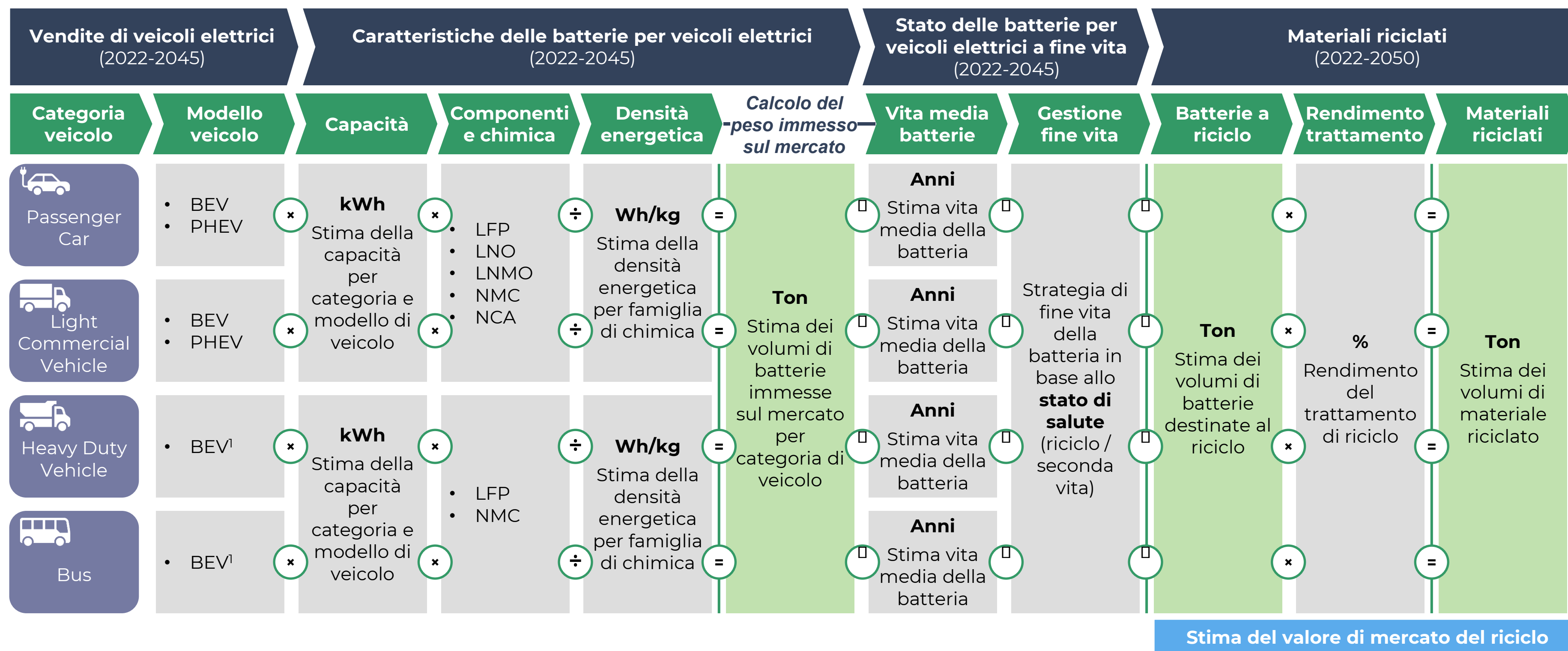
Italia

Considerazioni sui modelli di business

View tecnologica

Modello per la stima dei volumi di materiale riciclato

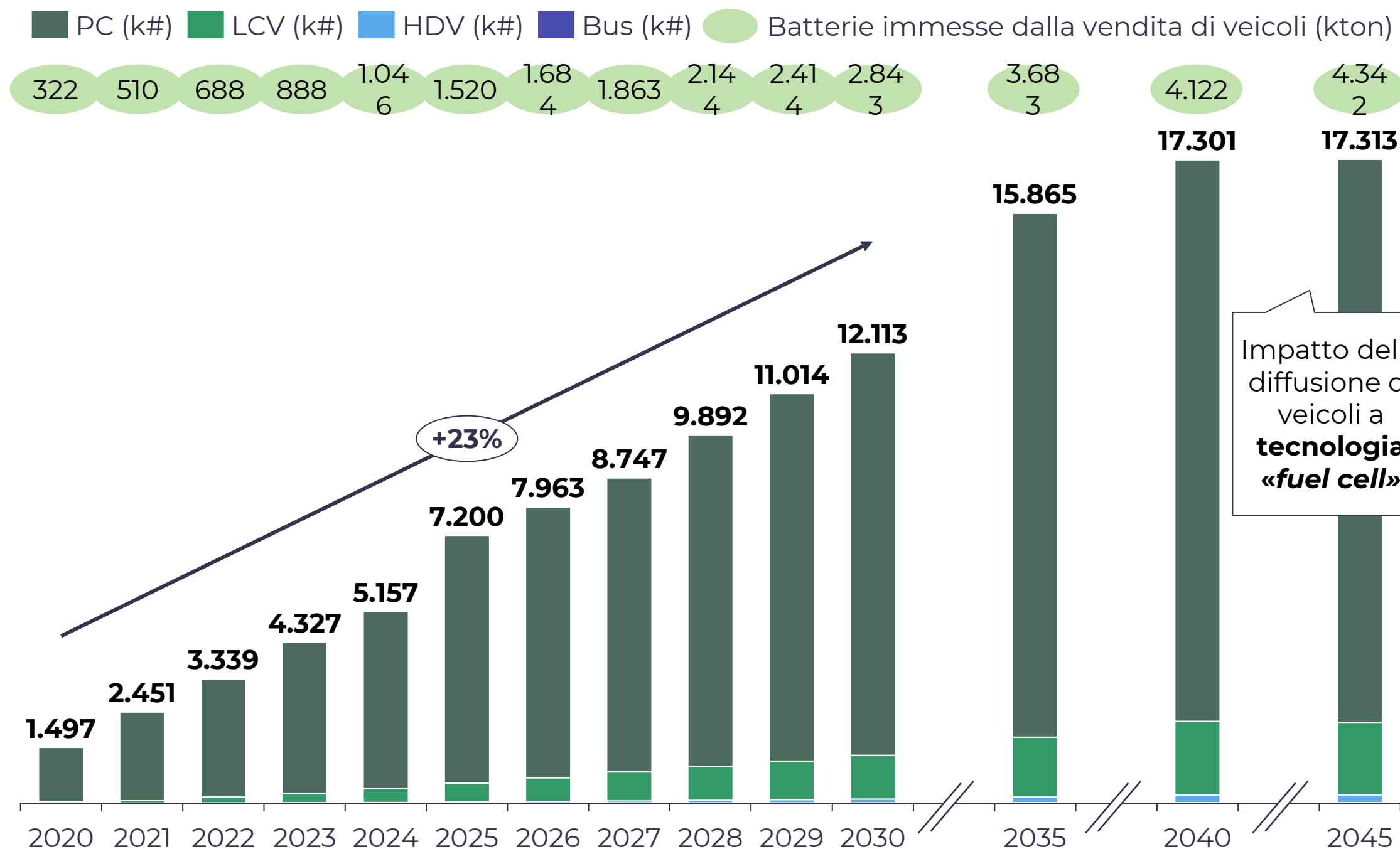
Il modello stima i volumi di materiale riciclato ricavato da batterie per veicoli elettrici a fine vita



Evoluzione delle vendite di veicoli elettrici in Europa

Le vendite di veicoli elettrici in Europa sono previste in rapida crescita (CAGR 2020-2030 +23%)

Vendite annuali di veicoli elettrici in Europa (k#, kton)



Ipotesi e considerazioni



L'immissione sul mercato di **batterie** a ioni di litio è trainata dalla vendita di **veicoli elettrici**, prevista in forte crescita nei prossimi anni



La diffusione di veicoli elettrici è **incentivata** dall'**evoluzione normativa** a livello Europeo. In particolare, il nuovo pacchetto climatico «**Fit for 55**» prevede la riduzione delle emissioni di gas serra del 55% entro il 2030, e pone l'obiettivo di produrre autovetture e veicoli commerciali leggeri unicamente a **zero emissioni** a partire dal **2035**



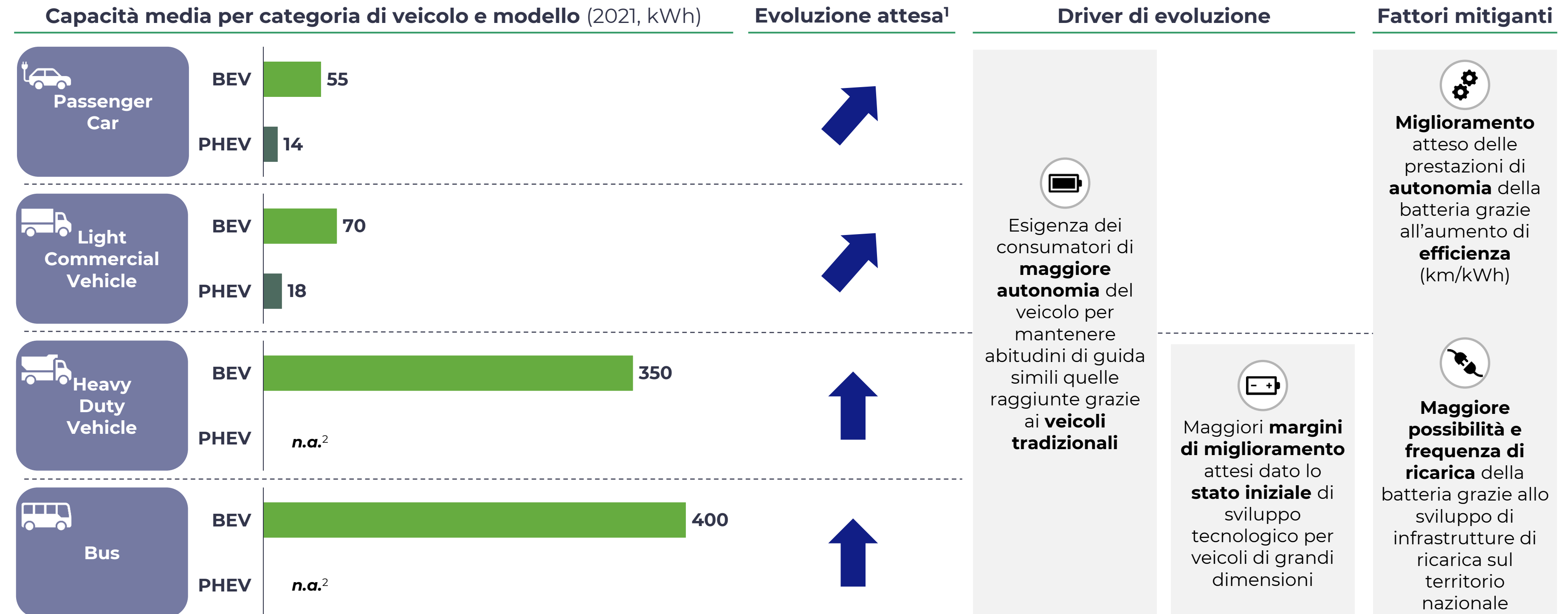
La **crescita dei volumi** di batterie immesse sul mercato in termini di **peso** (tonnellate) è determinata dalla progressiva diffusione di categorie di **veicoli elettrici di grandi dimensioni**, la cui alta capacità ne impatta il peso



Post 2040, lo sviluppo della tecnologia di **celle a combustione a idrogeno** («**fuel cell technology**») **stabilizzerà i livelli di vendita** di veicoli elettrici con batterie a **ioni di litio** per tutte le categorie

Capacità delle batterie dei veicoli per modello

La capacità è diversificata per categoria di veicolo e modello, con driver di evoluzione specifici



Note: 1) Periodo 2022 – 2050; 2) Lo scenario considerato include unicamente Heavy Duty Vehicle e Bus con tecnologie BEV
 Fonte: Politecnico di Milano, Cobat, Global EV Outlook, PwC Strategy&

↑ Crescita ↓ Decrescita → Stabile

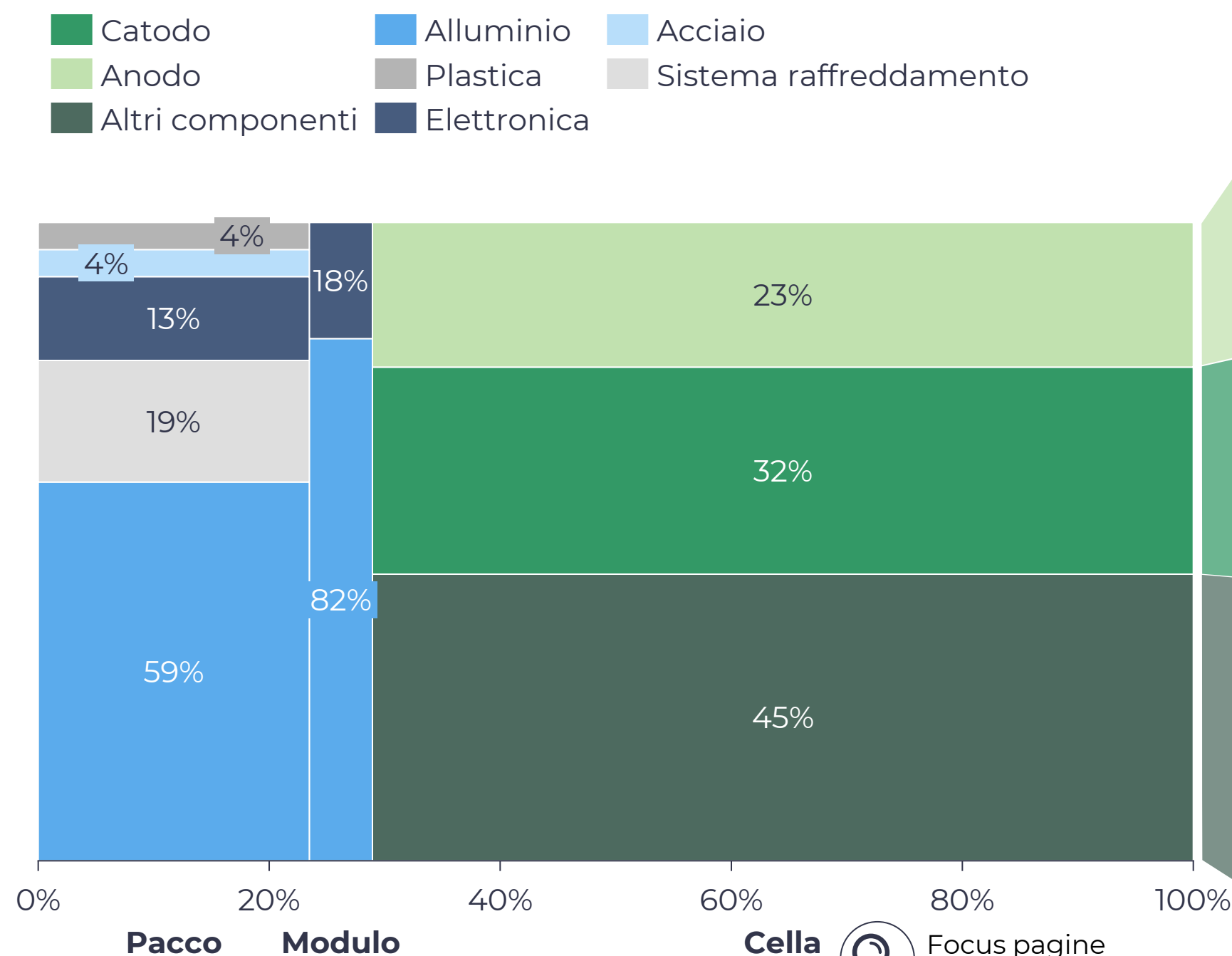
Componenti e materiali delle batterie

Il catodo, all'interno della cella, contiene i materiali di maggior valore della batteria

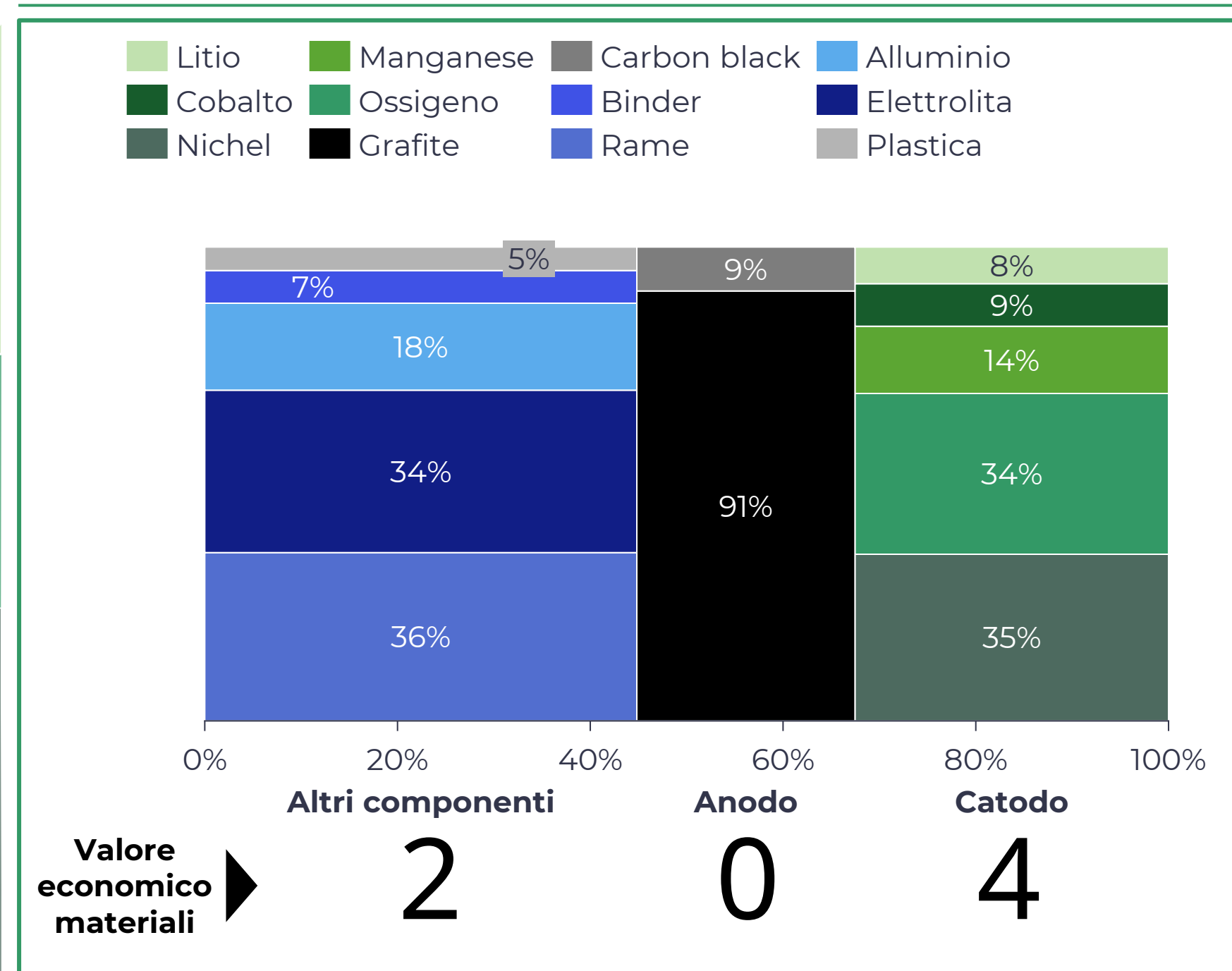
Illustrativo¹

Il peso di materiali e componenti varia in base a categoria di veicolo, modello e composizione chimica

Componenti della batteria (% su peso batteria)



Focus: materiali della cella (% su peso cella)



Valore economico materiali

2

0

4

Composizione chimica delle celle

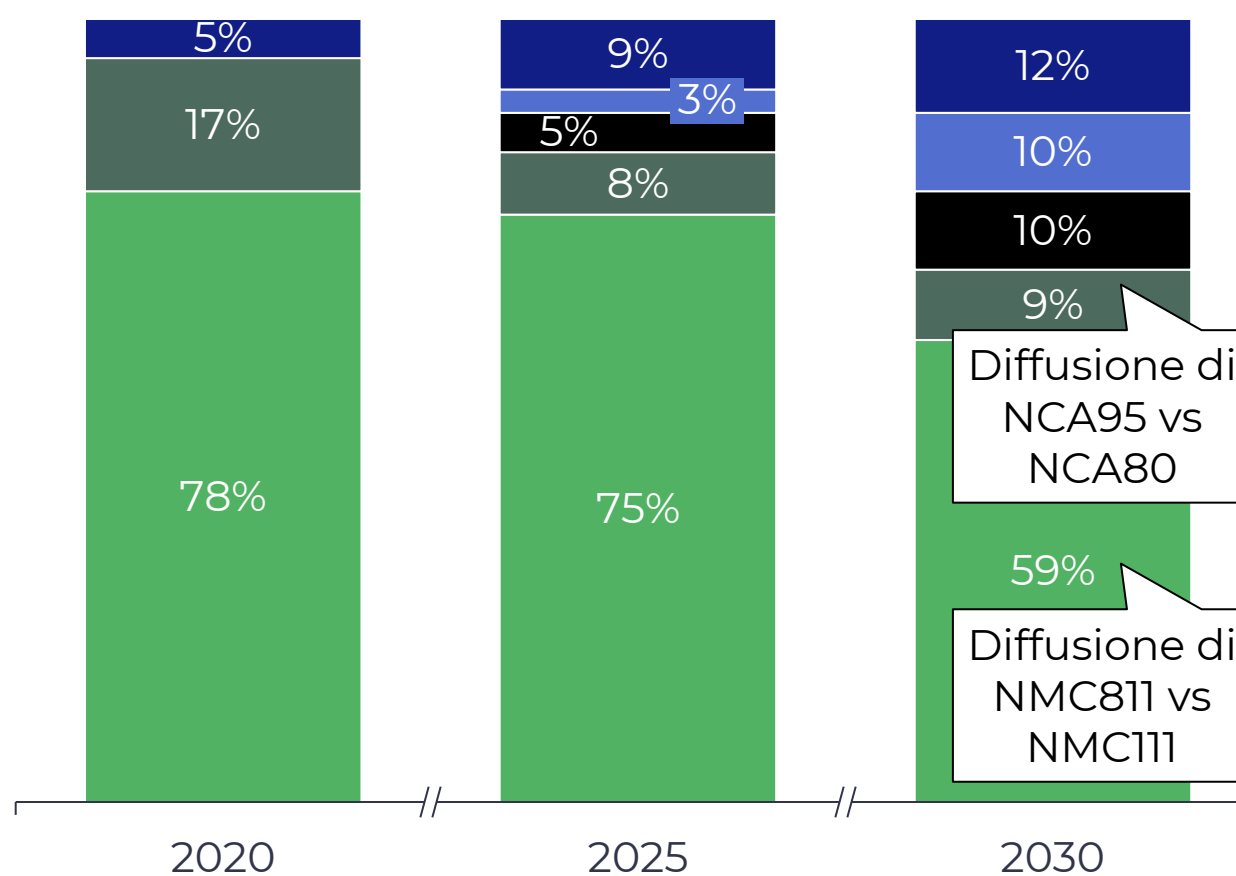
Le 5 famiglie di composizioni chimiche trovano applicazioni diverse per categoria di veicolo

Famiglie di composizioni chimiche

- 1 **LFP**
(Fosfato di ferro e litio)
- 2 **LNMO**
(Ossido di litio, nichel e manganese)
- 3 **LNO**
(Ossido di litio e nichel)
- 4 **NCA**
(Ossido di litio, nichel, cobalto e alluminio)
- 5 **NMC**
(Ossido di litio, nichel, manganese e cobalto)

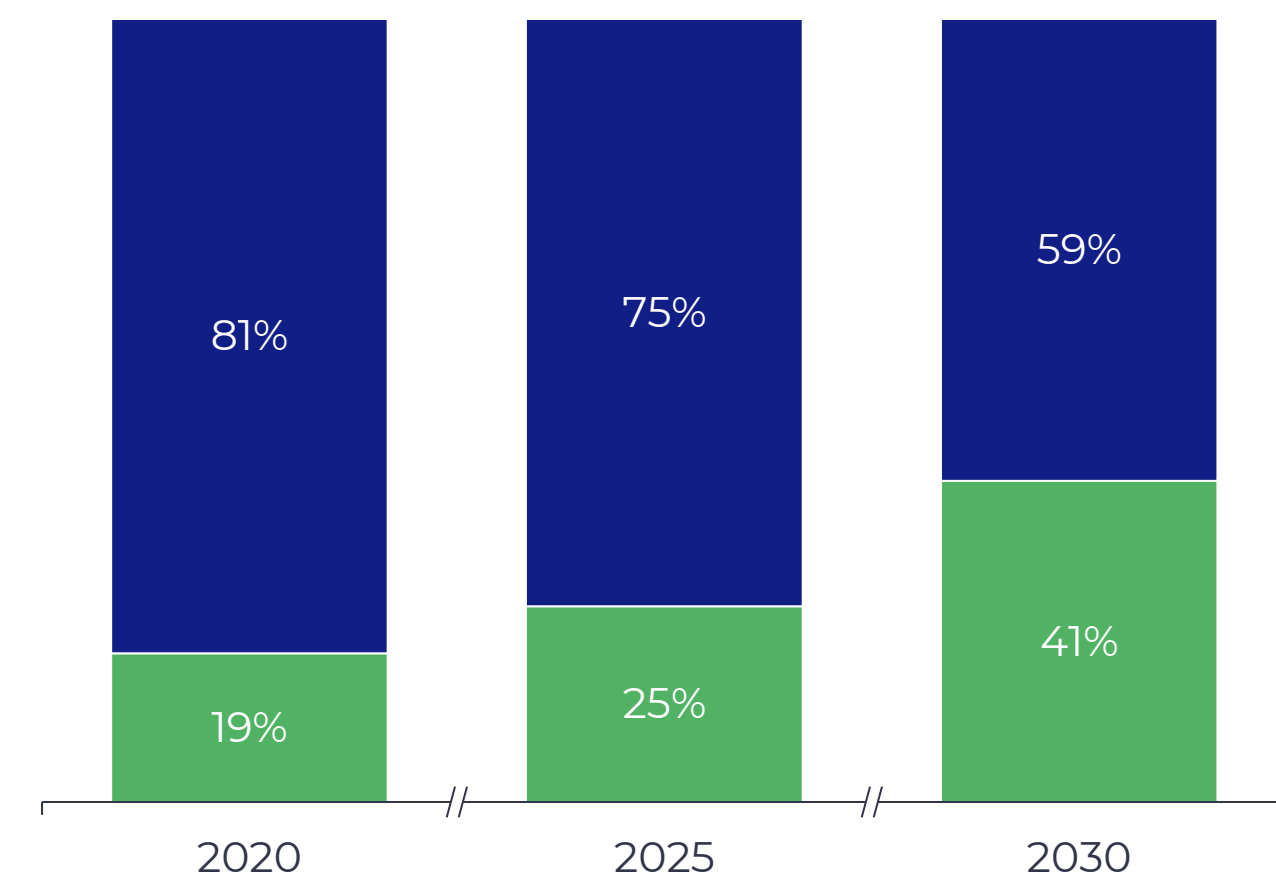
Passenger Car e Light Commercial Vehicle

- Le categorie PC e LCV sono soggette ad **alta varietà di famiglie** di chimiche utilizzate
- Il trend al 2030 è caratterizzato da una graduale **riduzione di cobalto**, materiale ad **alto costo** e caratterizzato da **criticità di approvvigionamento**, che si manifesta sia tra famiglie diverse che all'interno delle stesse (NCA e NMC)



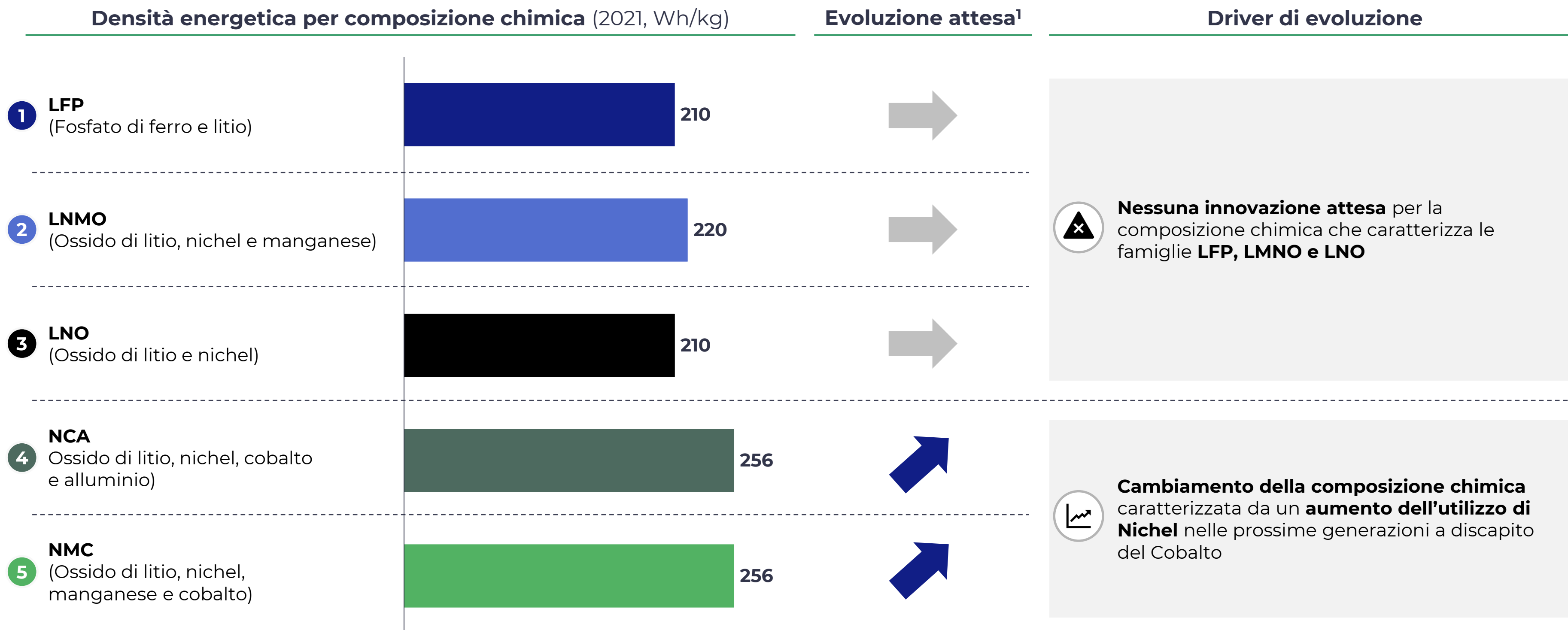
Heavy Duty Vehicle e Bus

- Le categorie HDV e Bus utilizzano **due principali famiglie** di chimiche (LFP e NMC)
- L'adozione di **LFP rimarrà preponderante** grazie a:
 - Stabilità termica e chimica** mantenuta in caso di cortocircuito / sovraccarica
 - Limitata necessità** di ricorrere a chimiche ad **alta densità energetica** per i veicoli di grandi dimensioni



Densità energetica delle celle

La densità energetica delle celle e la sua evoluzione dipendono dalla composizione chimica



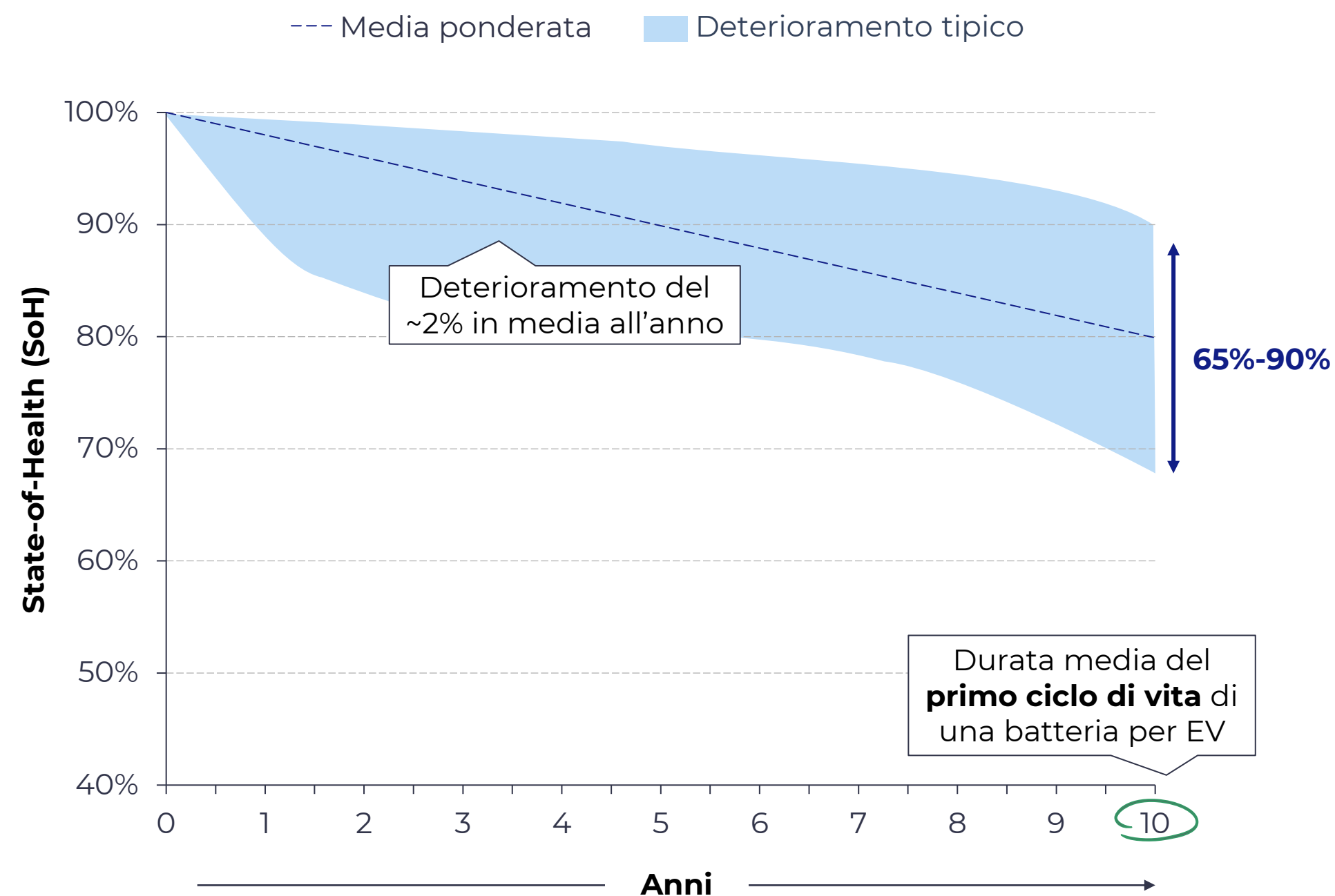
Note: 1) Periodo 2022 - 2050
Fonte: Argonne National laboratory, Politecnico di Milano, Cobat, PwC Strategy&

↑ Crescita ↓ Decrescita → Stabile

Lo *State-of-Health (SoH)* associato alle batterie

Il livello di prestazioni garantito dalle batterie si deteriora nel tempo e viene misurato dallo SoH¹

Evoluzione dello SoH¹ nel primo ciclo di vita della batteria



Principali fattori che impattano lo SoH¹

- Abitudini di carica**
La ricarica regolare della batteria **sopra l'80% di carica** causa un'usura anticipata della batteria
- Ricarica veloce**
L'uso prolungato di ricarica veloce causa uno stato di stress che può portare ad un guasto prematuro delle celle
- Profondità di scarica**
Il raggiungimento di un **livello di carica inferiore al 20%** danneggia le celle
- Chilometraggio**
Un elevato **numero di cicli di ricarica** accelera i meccanismi di degradazione della batteria
- Temperature estreme**
L'esposizione **a temperature estreme**, alte o basse, influenza le reazioni chimiche che si sviluppano nella batteria e le sue prestazioni

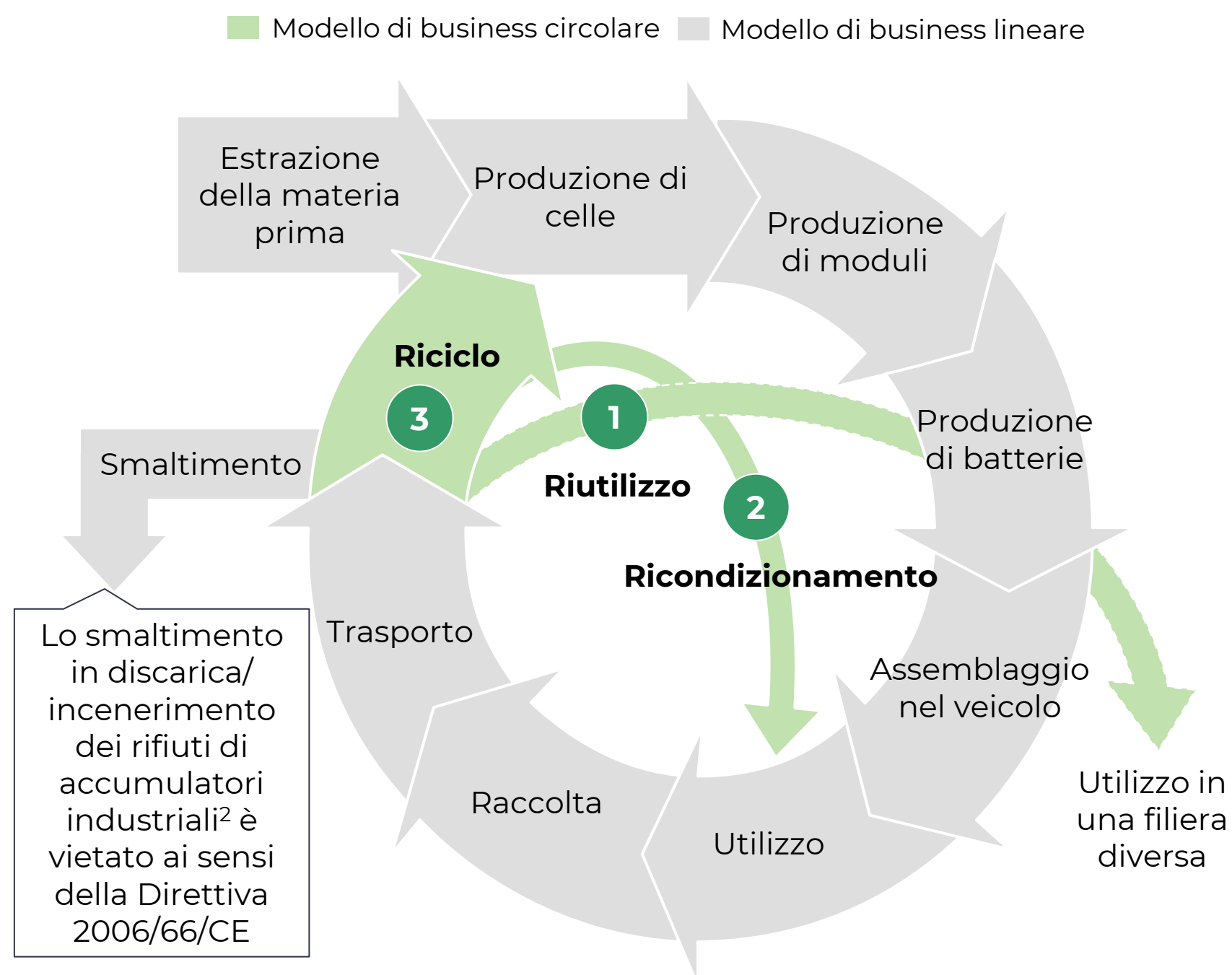
Strategie per la gestione delle batterie a fine vita

In base allo SoH¹, le batterie a fine vita possono essere gestite con 3 principali strategie

Strategie per la gestione delle batterie a fine vita

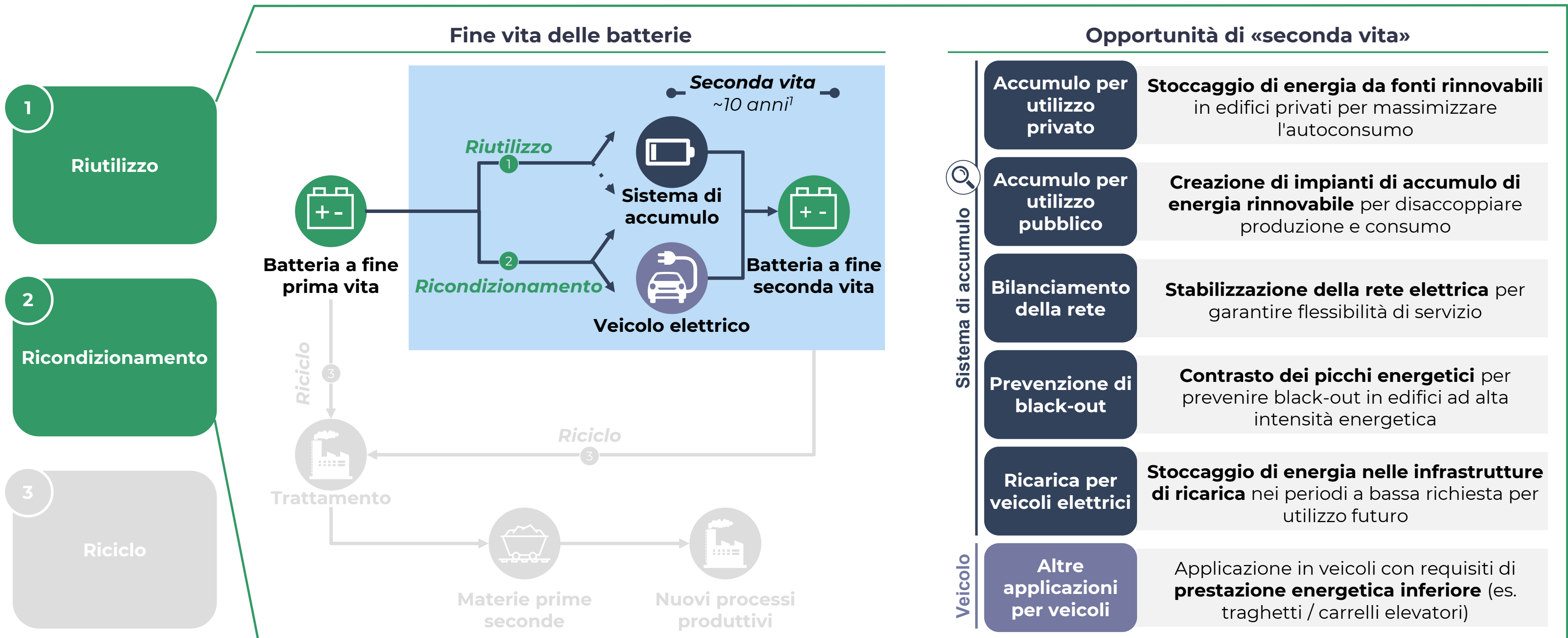


Impatto delle strategie sulla filiera



La «seconda vita» delle batterie

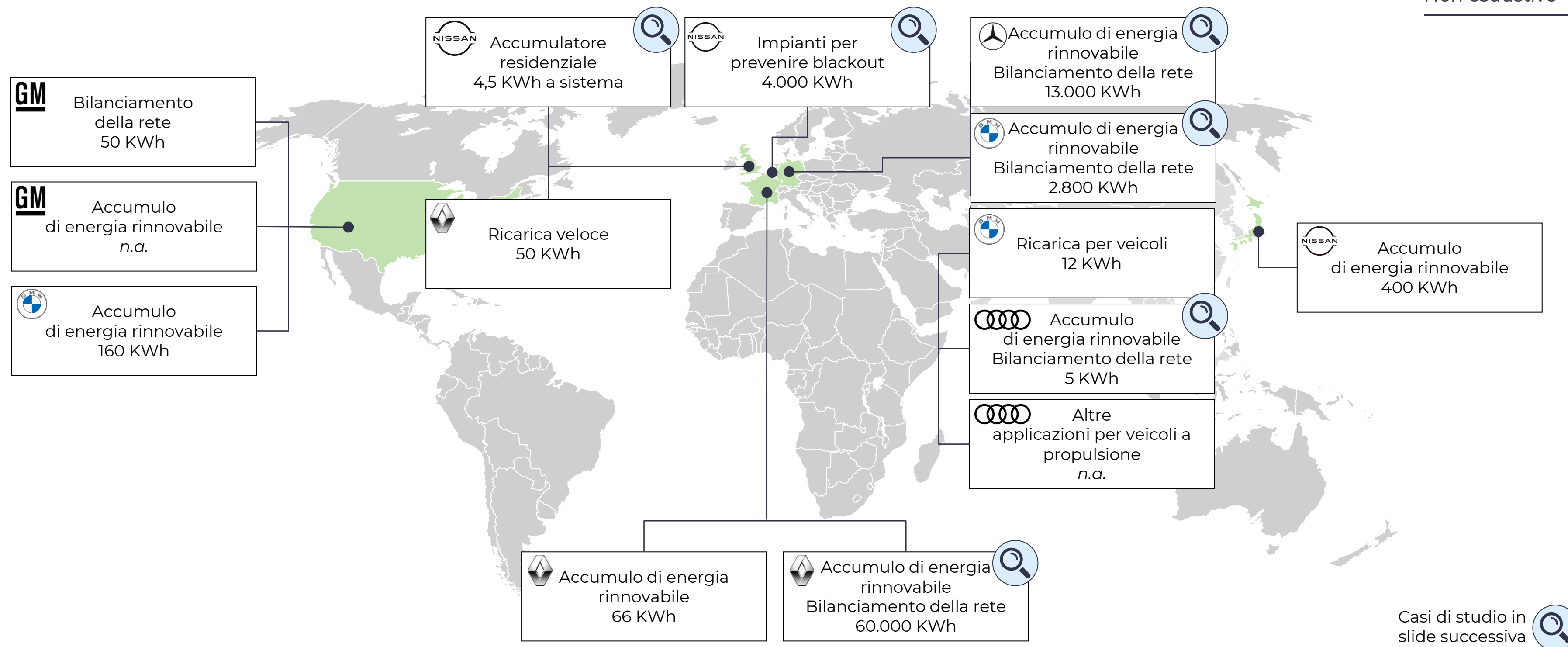
L'utilizzo di batterie può essere prolungato di ~10 anni grazie ad opportunità di «seconda vita»



Principali applicazioni di «seconda vita» esistenti..

I car maker stanno sperimentando applicazioni stazionarie con batterie a fine prima vita

Non esaustivo



Casi di studio in slide successiva

...sviluppate tramite partnership industriali

I progetti fanno leva su competenze diversificate abilitate da partnership industriali

Non esaustivo

Prevenzione blackout

Sistema realizzato con batterie esauste del modello Nissan Leaf, fornisce **alimentazione di emergenza** in caso di **blackout**, **servizi di peak shaving** e **accumula** parte dell'energia prodotta da pannelli solari

Partner:  THE MOBILITY HOUSE 

Capacità (MWh): 4

Stoccaggio per l'energia

Sistema realizzato con 700 pacchi di batterie di BMWi3, in accoppiamento con **turbine eoliche** e collegato alla rete, accumula energia per la **stabilità della rete di distribuzione** e il **bilanciamento della domanda**

Partner:  **BOSCH**  VATTENFALL 

Capacità (MWh): 3

Stoccaggio per l'energia

Sistema realizzato con 1024 batterie Daimler, accumula **energia** proveniente da **fonti eoliche e fotovoltaiche**

Partner: THE MOBILITY HOUSE   REMONDIS®
GETEC ENERGIE 

Capacità (MWh): 13

Stoccaggio per l'energia

Sistema realizzato con batterie dismesse di Audi e-tron per lo **stoccaggio stazionario dell'energia**, permette di compensare le fluttuazioni nella disponibilità di energia rinnovabile e di **stabilizzare la rete**

Partner: 

Capacità (MWh): 5

Stoccaggio per l'energia

Sistema realizzato con batterie esauste di Renault Zoe, consente di generare o assorbire grandi quantità di energia per **reagire** alle **principali sollecitazioni della rete**

Partner: THE MOBILITY HOUSE 

Capacità (MWh): 60

Accumulatore residenziale

Sistema (xStorage) realizzato con batterie della Nissan Leaf, **accumula energia residenziale** per **fornire potenza di back-up** e ridurre il costo dell'energia

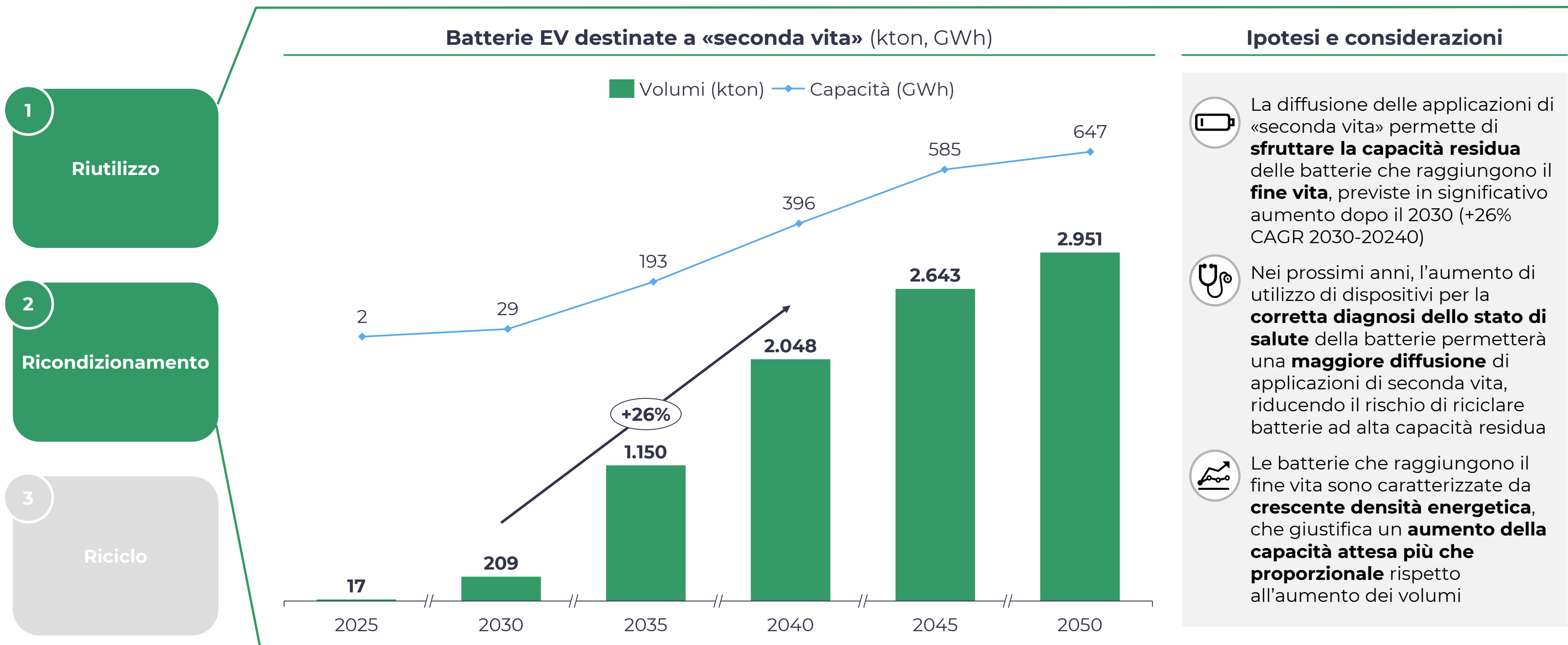
Partner: 

Capacità (MWh): n.a. (4,5 KWh per ogni Sistema)

L'offerta delle batterie di «seconda vita» in Europa

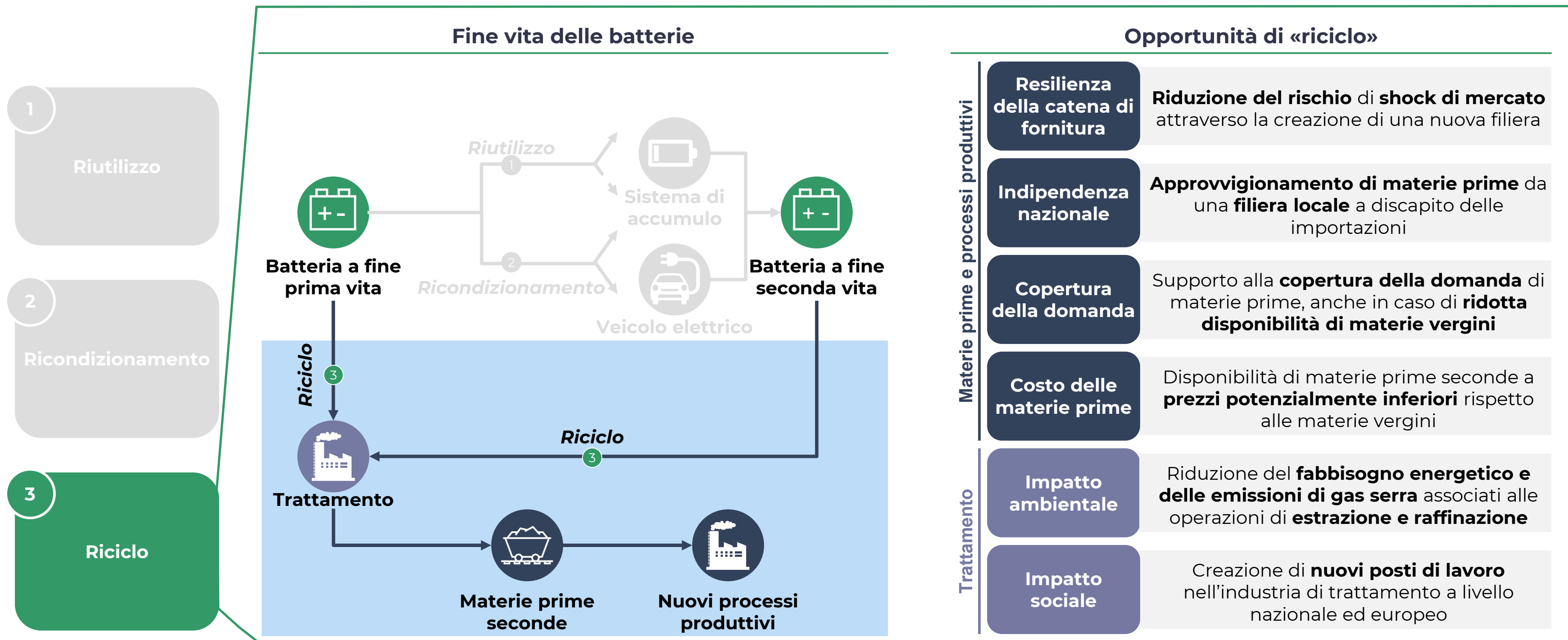


La capacità per applicazioni di «seconda vita» è in crescita e raggiungerà 647 GWh al 2050



Opportunità di riciclo delle batterie a fine vita

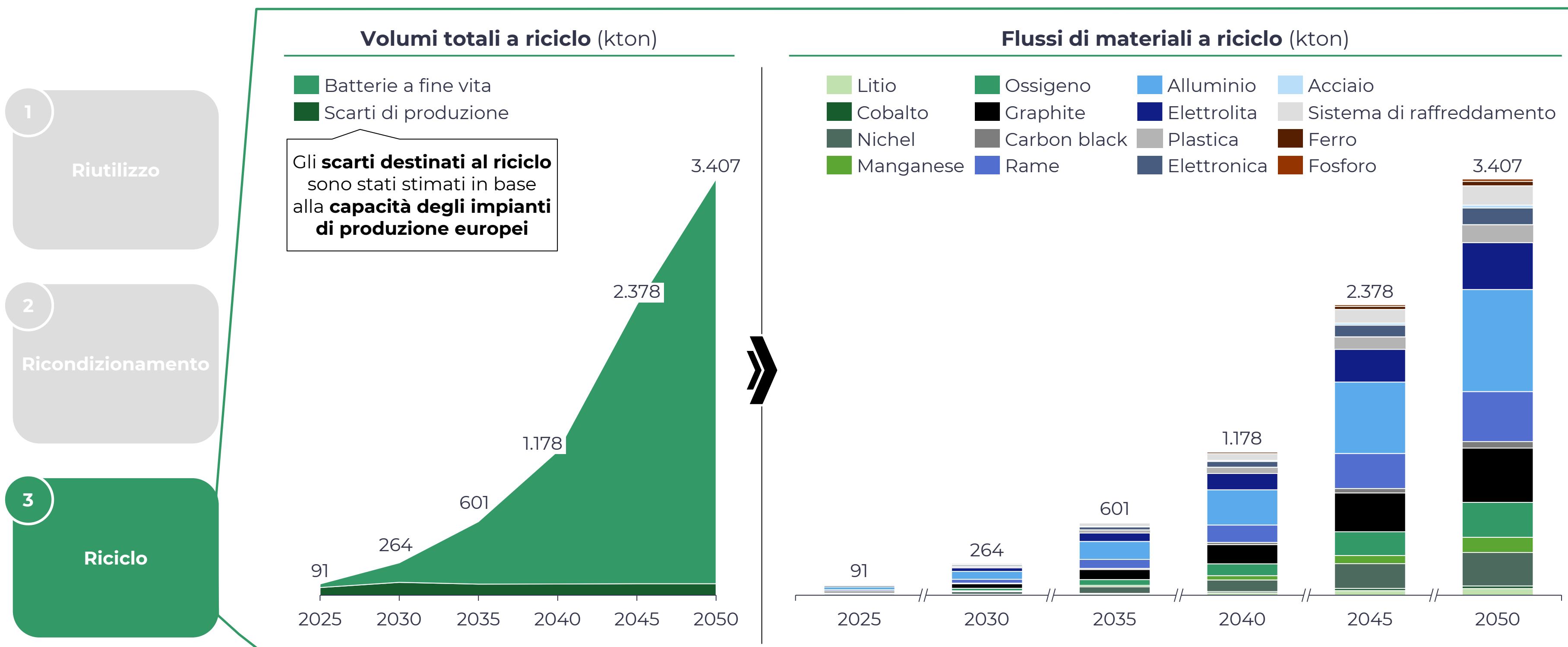
Il riciclo abilita la generazione di materie prime seconde per nuovi processi produttivi



I volumi di batterie destinati a riciclo in Europa



I volumi di batterie destinati a riciclo in Europa raggiungeranno ~ 3,4 Mton al 2050



Ipotesi per la stima del valore di mercato del riciclo

Il valore di mercato del riciclo è stimato in base ad ipotesi chiave su Capex, Opex e ricavi

	Parametro		Ipotesi	Limiti delle ipotesi e potenziali scenari evolutivi
1 Riutilizzo	Capex	Capacità di investimento	= Investimenti annui aggiuntivi per intercettare tutti i volumi di batterie a fine vita generati nell'anno di riferimento	Lo sviluppo dell'infrastruttura di riciclo sarà un processo graduale e meno puntuale per cui, almeno in una prima fase, i volumi continueranno ad essere trasferiti all'estero
		Tipologia di trattamento	= Idrometallurgico	L'infrastruttura di riciclo sarà caratterizzata dalla combinazione di più tipologie di trattamento diverse
		Costo di investimento	= ~770 € / ton per un impianto di medie dimensioni (5-10 kton all'anno)	Il costo può variare in base alla dimensione dell'impianto e della tipologia di trattamento
		Vita utile impianti	= 10 anni	La vita utile può variare in base al tasso di utilizzo
2 Ricondizionamento	Opex	Pre-trattamento e trattamento	= ~7.850 € / ton per un impianto di medie dimensioni (5-10 kton all'anno)	Il costo può variare in base alla dimensione dell'impianto e della tipologia di trattamento
3 Riciclo	Ricavi	Domanda di materiale riciclato	= Allocazione di tutto il materiale riciclato , attraverso la domanda per batterie per EV e per altre filiere industriali	Ad oggi , il mercato del riciclato per i materiali delle batterie per EV non è sviluppato ; tuttavia, si ipotizzano crescenti applicazioni supportate anche dai target normativi europei
		Prezzo di vendita del materiale riciclato	Nichel Cobalto Litio = Sconto vs. vergine del 20%; 0% in caso di indisponibilità di materiale per rispettare i target UE di contenuto riciclato minimo	I prezzi dei materiali vergini sono caratterizzati da elevata volatilità con forti impatti sul mercato del riciclato, potenzialmente influenzato da ulteriori fattori esogeni
		Altro	= = Opex	L' efficientamento dei processi di trattamento potrebbe generare marginalità per tutti i materiali riciclati
		Pagamento sistemi EPR («gate fee»)	= = 0 durante tutto l'arco temporale considerato	Oggi i Sistemi EPR riconoscono un pagamento ai riciclatori per sostenerne l'economicità; in futuro lo sviluppo del mercato potrebbe far invertire il flusso economico

Investimenti necessari in Europa

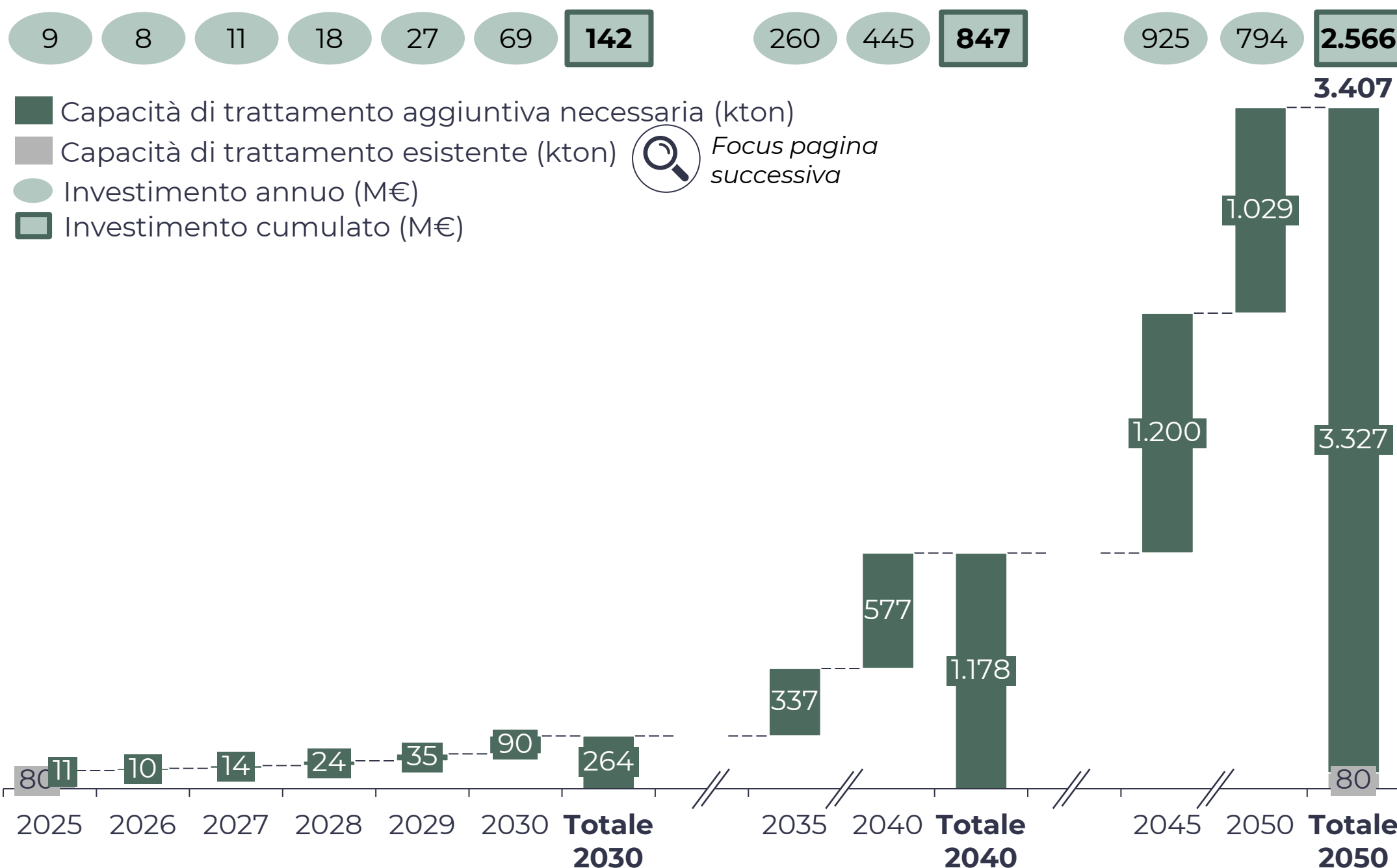


1
Riutilizzo

2
Ricondizionamento

3
Riciclo

Capacità ed investimenti necessari (kton, M€)



Capex

Trattamento idrometallurgico

Ipotesi e considerazioni



In Europa sono presenti impianti adibiti al riciclo di batterie con una capacità totale di **~80 kton/ anno**; tuttavia, oggi tali impianti trattano principalmente **batterie diverse** da quelle per veicoli elettrici



La **capacità di trattamento** è stata dimensionata per **intercettare annualmente tutti i volumi** di batterie EV a fine vita generati sul territorio europeo

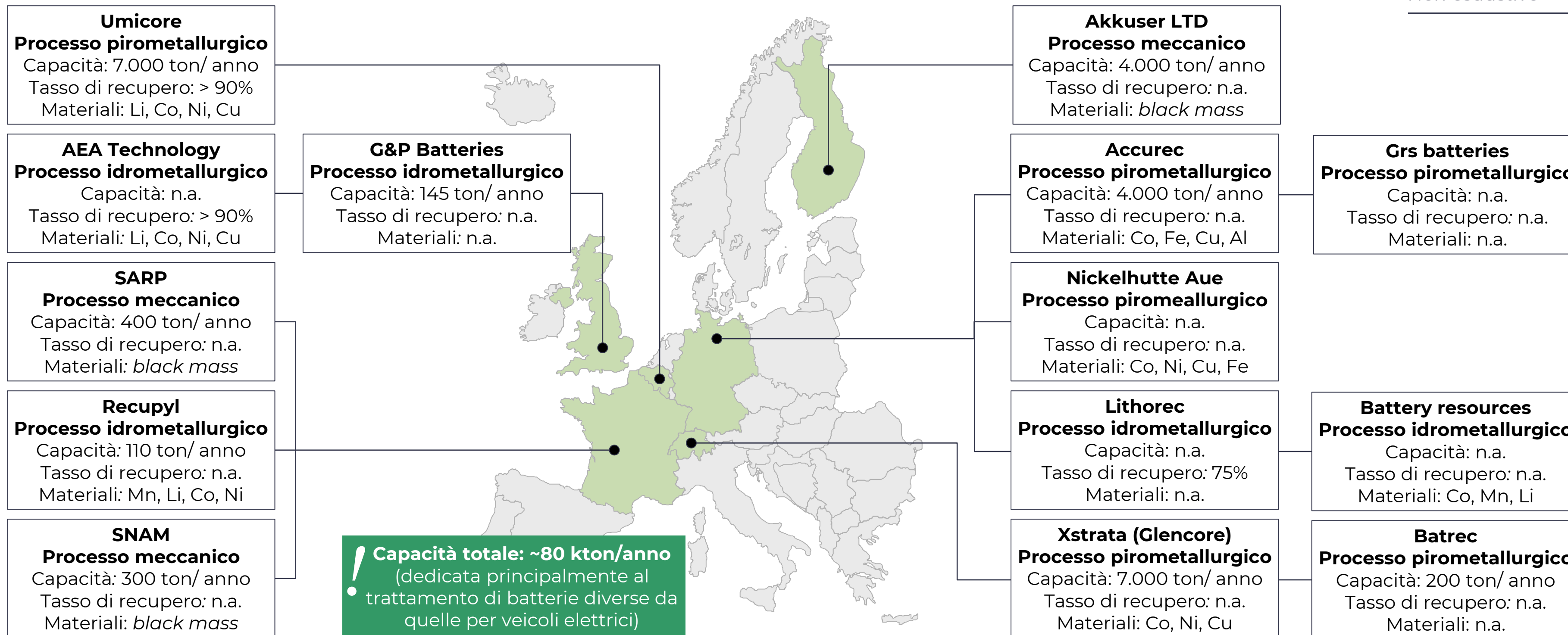


I costi di investimento (Capex) sono stimati per un impianto **idrometallurgico di medie dimensioni** (~ 5-10 kton/ anno); il costo può **variare** significativamente a seconda della **dimensione dell'impianto** e della **tipologia di trattamento**

Impianti per il riciclo di batterie in Europa



Non esaustivo

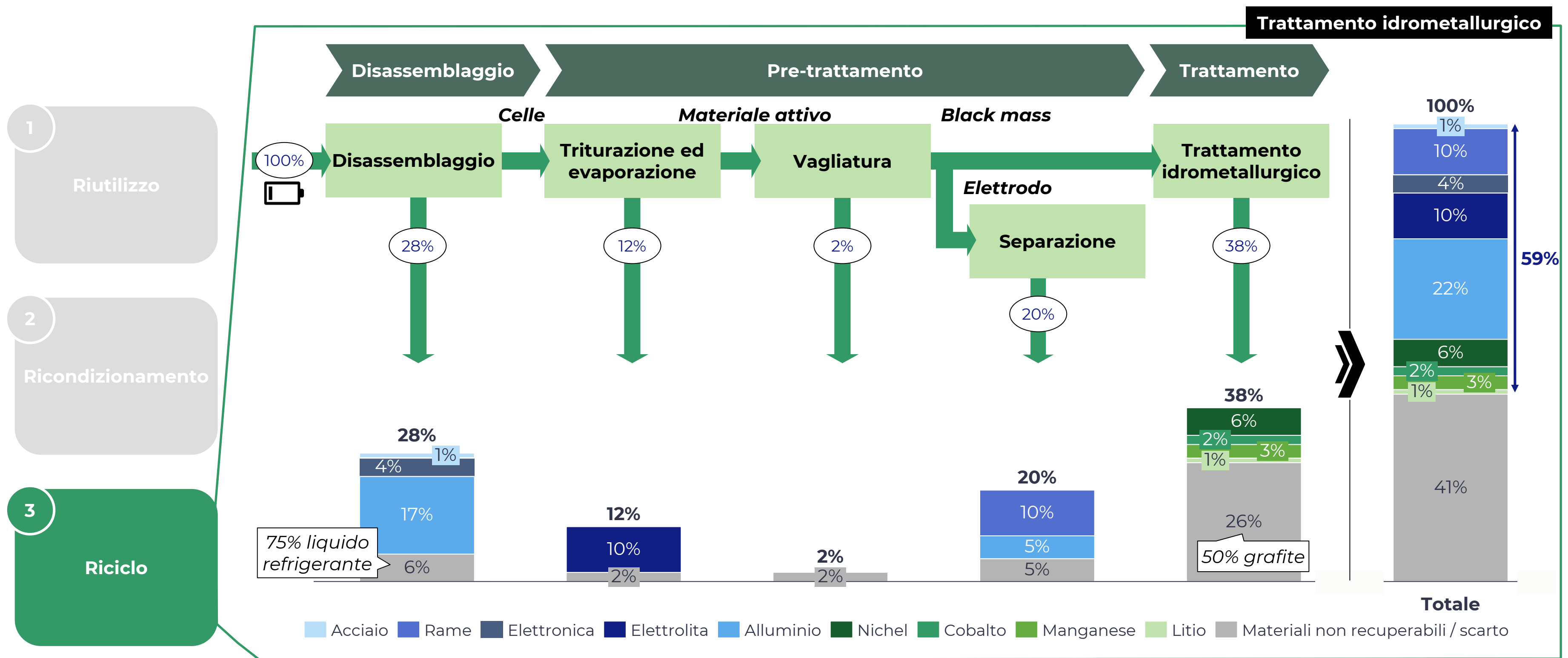


Rendimento di un processo di riciclo tipico

Un processo di riciclo tipico consente di recuperare il ~60% dei materiali in ingresso

Illustrativo¹

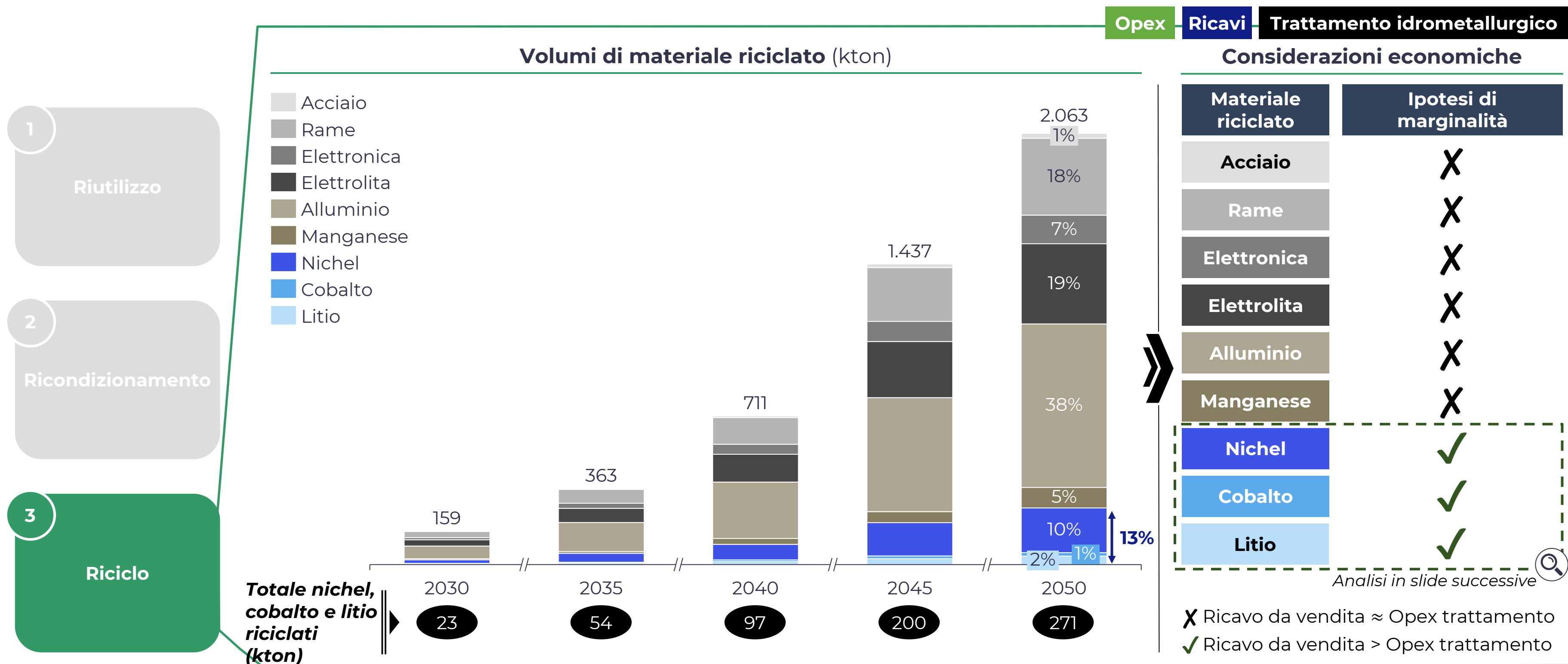
La quota di materiali recuperati varia in base a categoria di veicolo e composizione chimica



Volumi di materiale riciclato in Europa



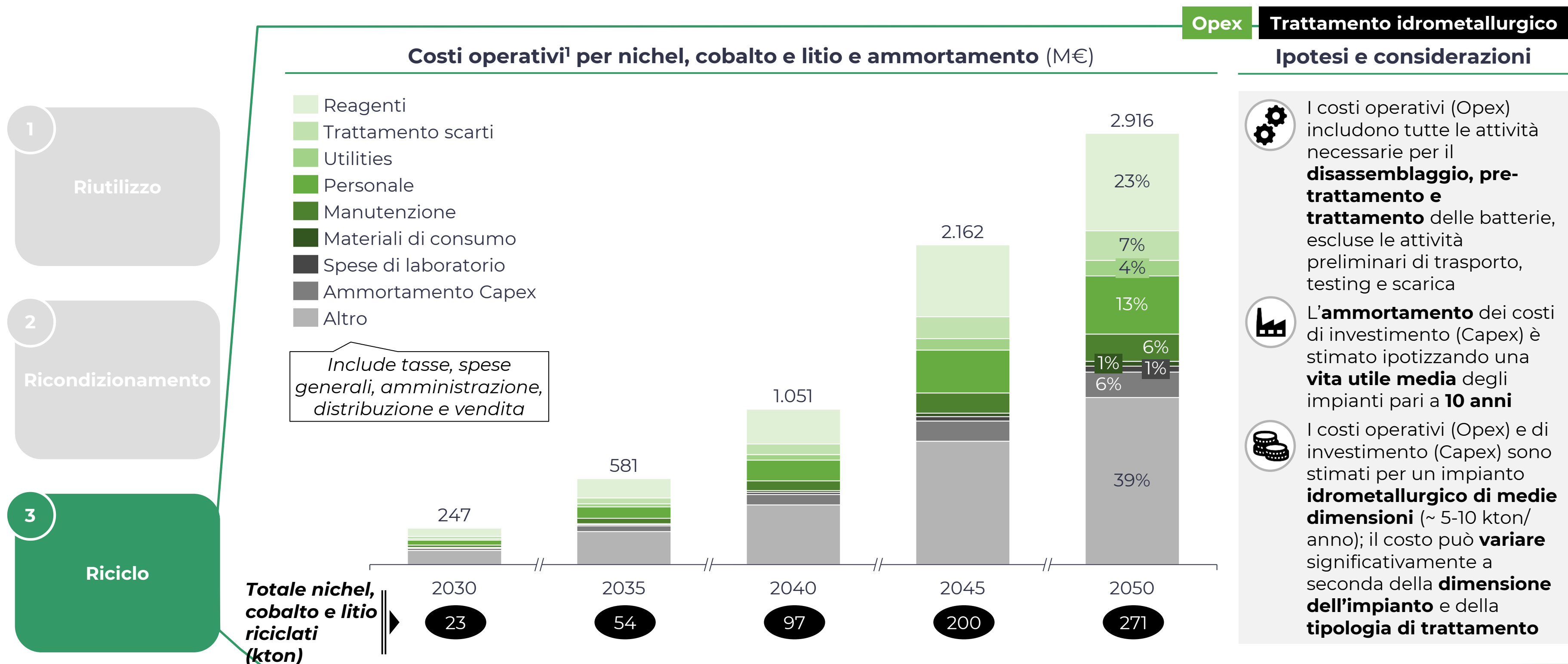
Nichel, cobalto e litio coprono il ~13% dei volumi riciclati e offrono opportunità di marginalità



Costi operativi e ammortamento



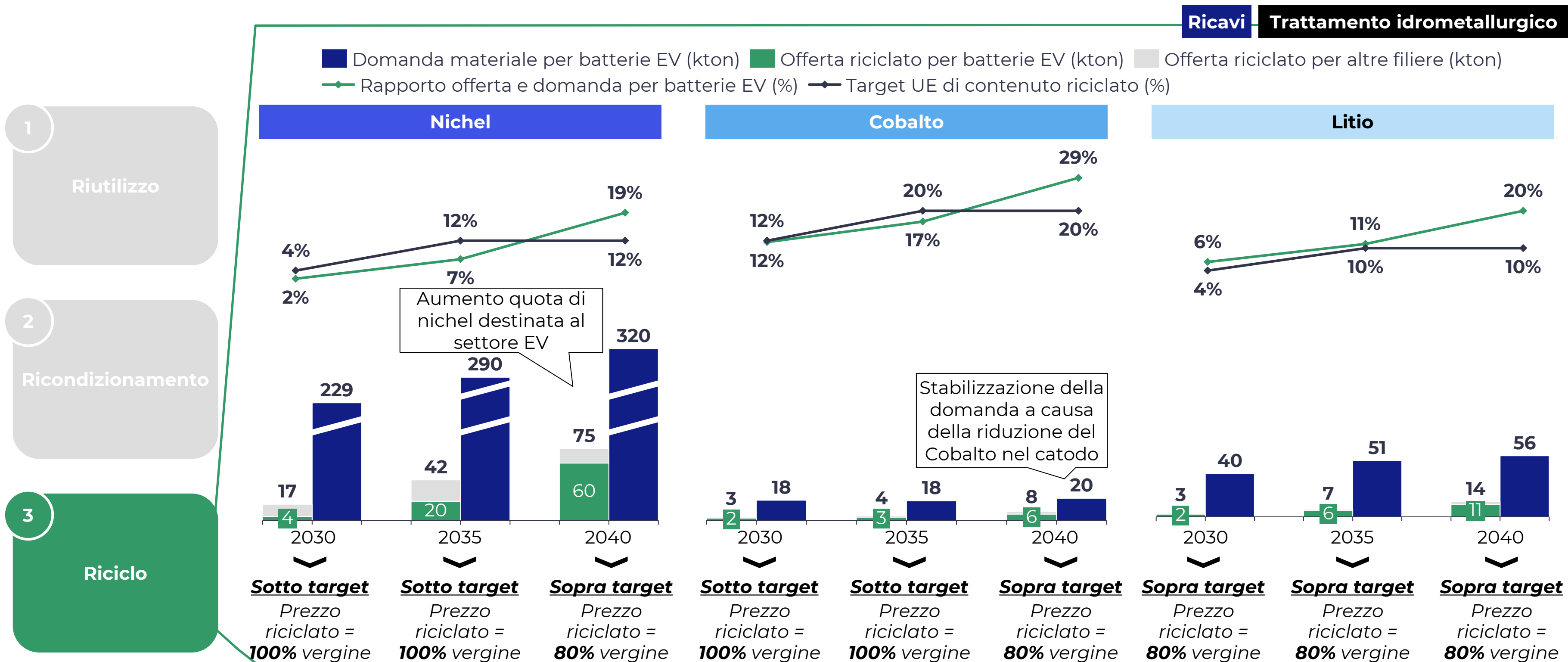
I costi operativi per il trattamento di nichel, cobalto e litio al 2050 saranno pari a ~ 2,9 Mld€



Impatto dei target UE sui prezzi del riciclato



Il prezzo del materiale riciclato rispetto al vergine dipende dalla capacità di rispettare i target UE



Il valore di mercato del riciclo in Europa



Al 2050, i ricavi generati dal riciclo saranno pari a 4,1-6,1 Mld€ con una marginalità di 1,2-3,2 Mld€

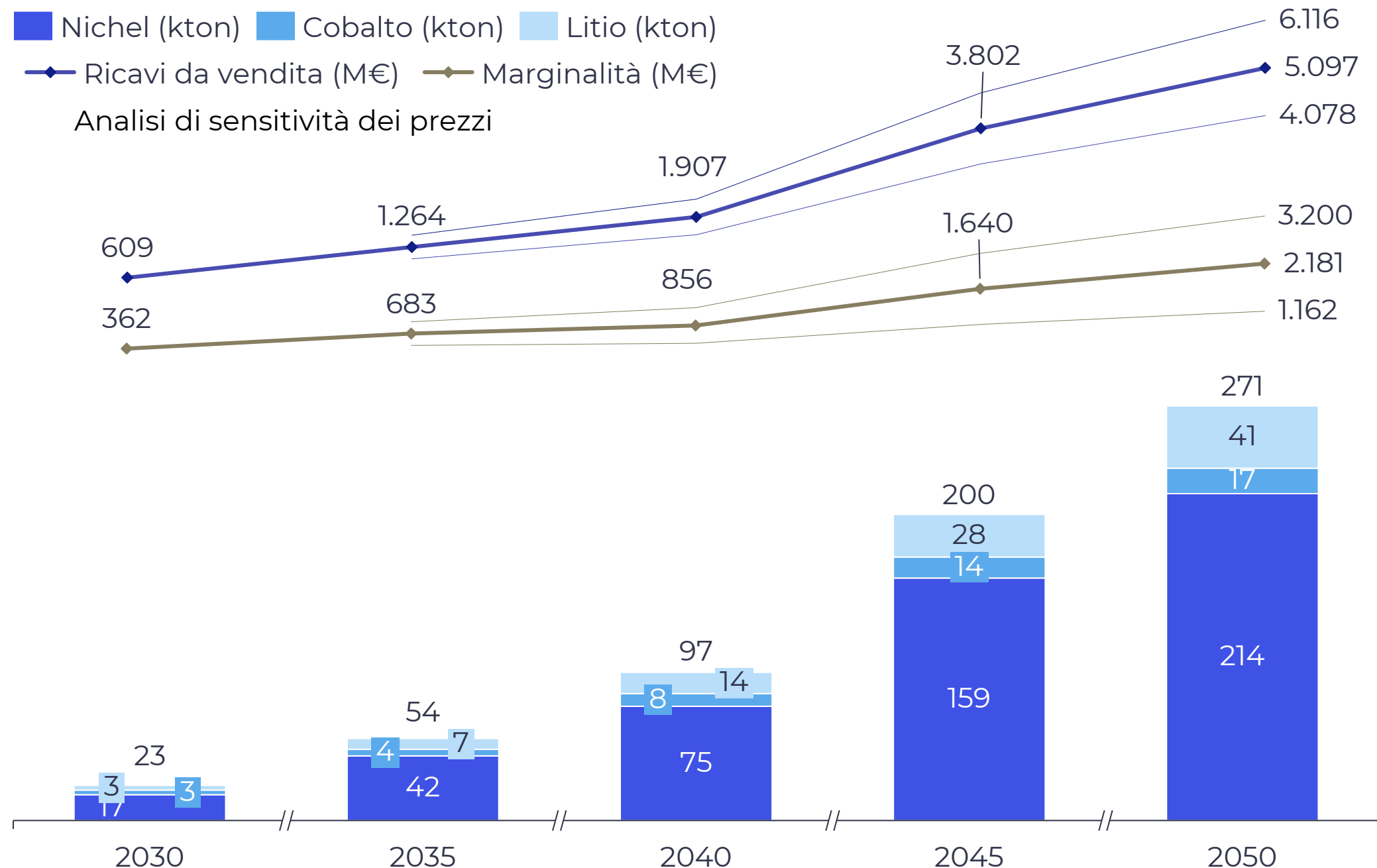
Capex

Opex

Ricavi

Trattamento idrometallurgico

Volumi e valore di mercato di nichel, cobalto e litio (kton, M€)



Ipotesi e considerazioni



I **prezzi del materiale riciclato** sono stimati applicando uno **sconto** sui prezzi del vergine in base all'**offerta di materiale riciclato** in uscita dai processi di trattamento rispetto alla **domanda per adempiere ai target UE** di contenuto minimo:

- 0% in caso di domanda superiore all'offerta
- 20% in caso di domanda inferiore all'offerta



I **prezzi del materiale vergine** sono stimati in base allo **storico** degli ultimi 10 anni e alle **previsioni al 2030**, con un'analisi di **sensibilità** a partire dal 2035



La **marginalità** calcolata considera, per la sola fase di riciclo: **ricavi da vendita, costi operativi e ammortamento**

1

Riutilizzo

2

Ricondizionamento

3

Riciclo

Agenda

Stima del mercato del riciclo e degli investimenti necessari

Europa

Italia

Considerazioni sui modelli di business

View tecnologica

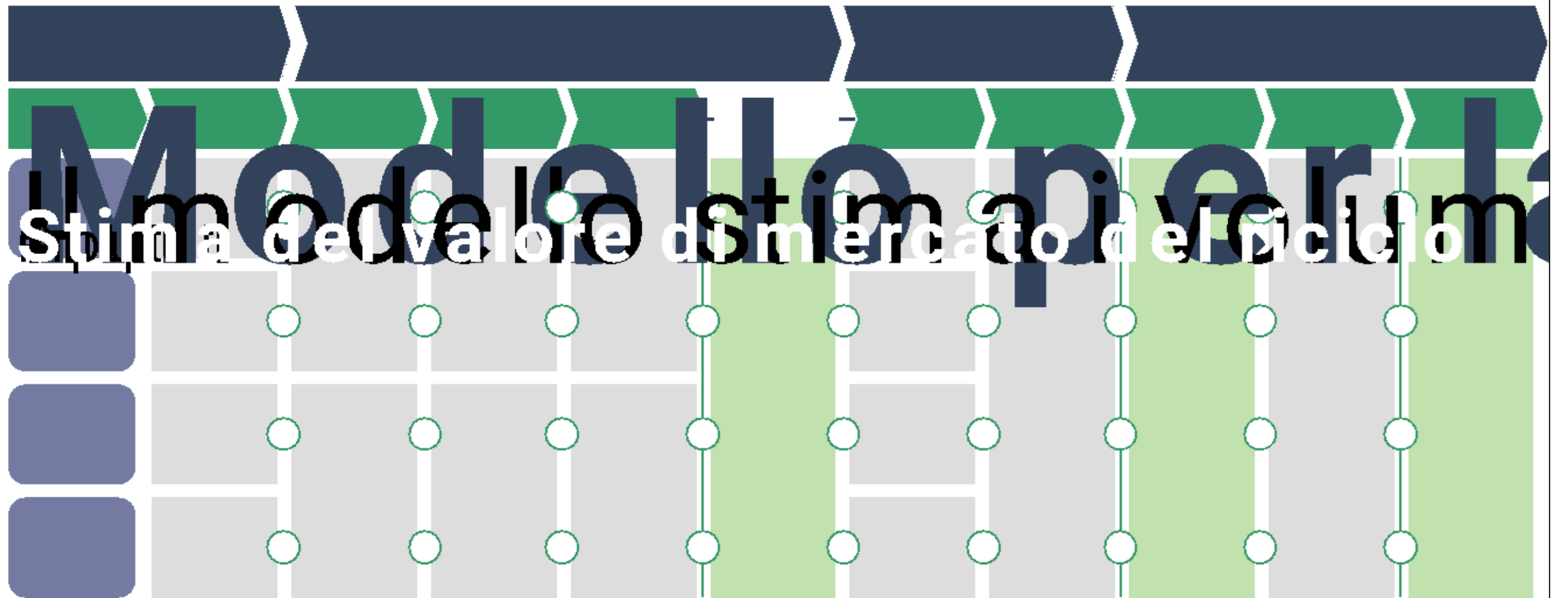
Approccio metodologico

Approccio metodologico per la stima del mercato e degli investimenti necessari in Italia

- Il **modello per la stima dei volumi** di materiale riciclato sviluppato per l'analisi a livello europeo è stato **replicato per l'analisi in Italia**, tenendo in considerazione delle **differenze chiave** a livello di **vendite** di veicoli elettrici, **capacità produttiva e di trattamento**
- Le pagine successive illustrano i **risultati principali** della stima ed in particolare:
 - Vendite annue di veicoli elettrici e volumi di batterie immesse
 - Volumi di batterie e capacità a «seconda vita»
 - Volumi di batterie destinati a riciclo
 - Investimenti necessari
 - Volumi di materiale riciclato
 - Valore di mercato del riciclo (ricavi e marginalità)



Modello per la stima del valore di mercato del riciclo

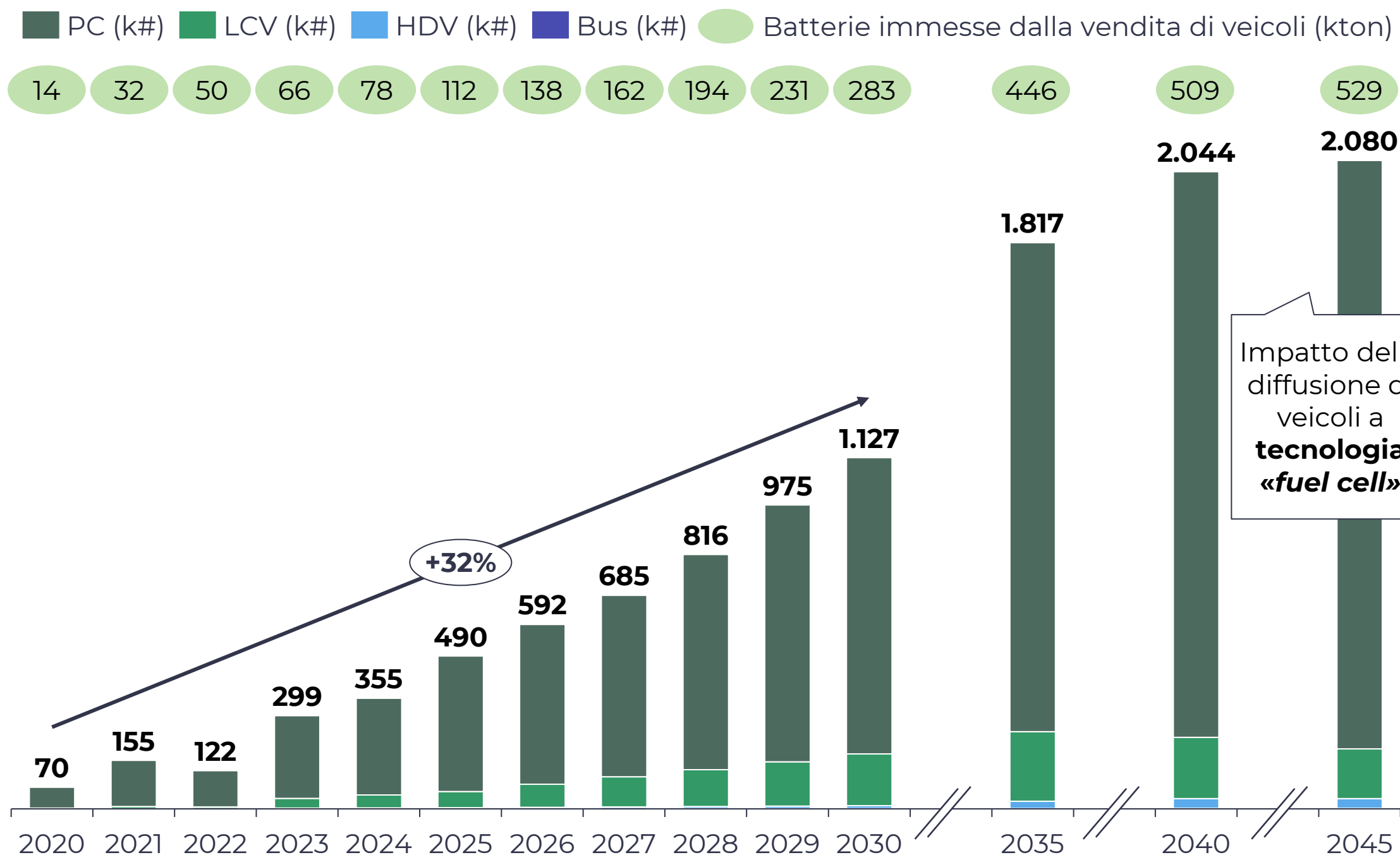


Evoluzione delle vendite di veicoli elettrici in Italia



Le vendite di veicoli elettrici in Italia sono previste in rapida crescita (CAGR 2020-2030 +32%)

Vendite annuali di veicoli elettrici in Italia (k#, kton)



Ipotesi e considerazioni



L'immissione sul mercato di **batterie** a ioni di litio è trainata dalla vendita di **veicoli elettrici**, prevista in crescita nei prossimi anni, dopo un lieve calo al 2022



La diffusione di veicoli elettrici è **incentivata** dall'**evoluzione normativa** a livello Europeo. In particolare, il nuovo pacchetto climatico **«Fit for 55»** prevede la riduzione delle emissioni di gas serra del 55% entro il 2030, e pone l'obiettivo di produrre autovetture e veicoli commerciali leggeri unicamente a **zero emissioni** a partire dal **2035**



La **crescita dei volumi** di batterie immesse sul mercato in termini di **peso** (tonnellate) è determinata dalla progressiva diffusione di categorie di **veicoli elettrici di grandi dimensioni**, la cui alta capacità ne impatta il peso

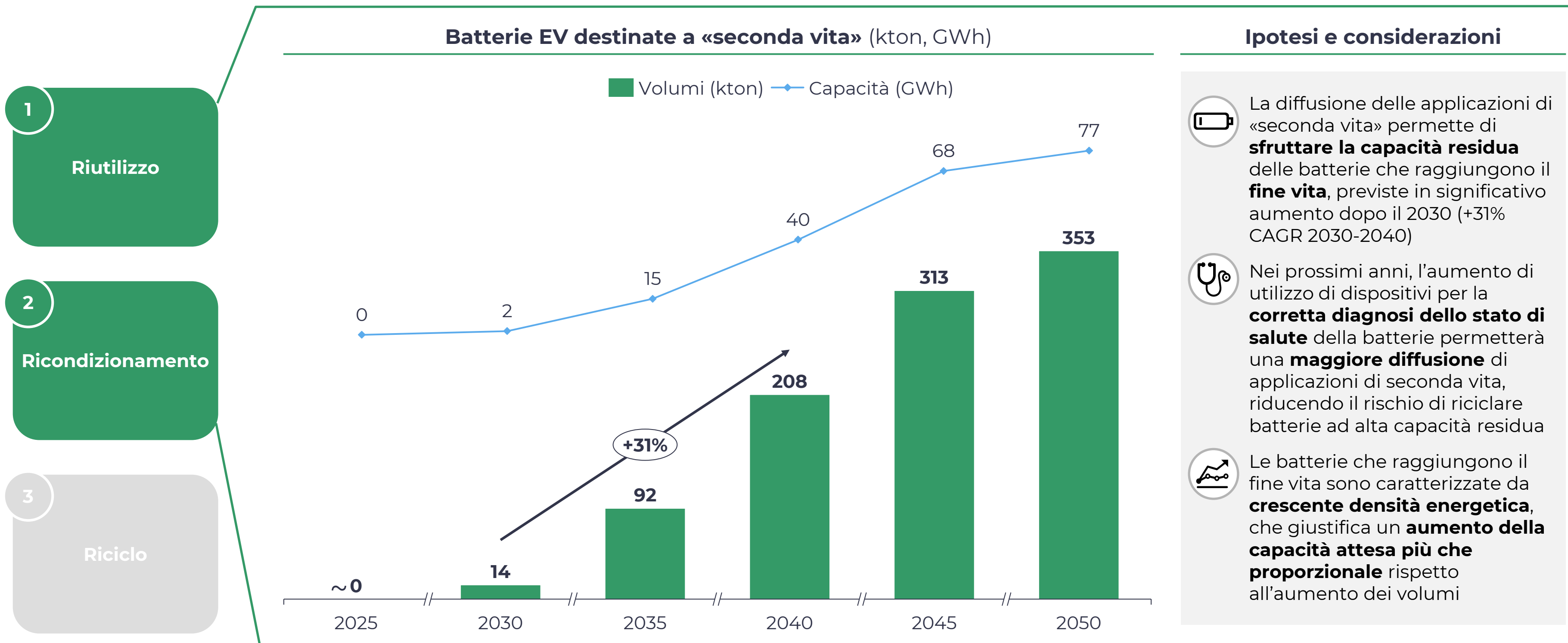


Post 2040, lo sviluppo della tecnologia di **celle a combustione a idrogeno** («fuel cell technology») **stabilizzerà i livelli di vendita** di veicoli elettrici con batterie a **ioni di litio** per tutte le categorie

L'offerta delle batterie di «seconda vita» in Italia



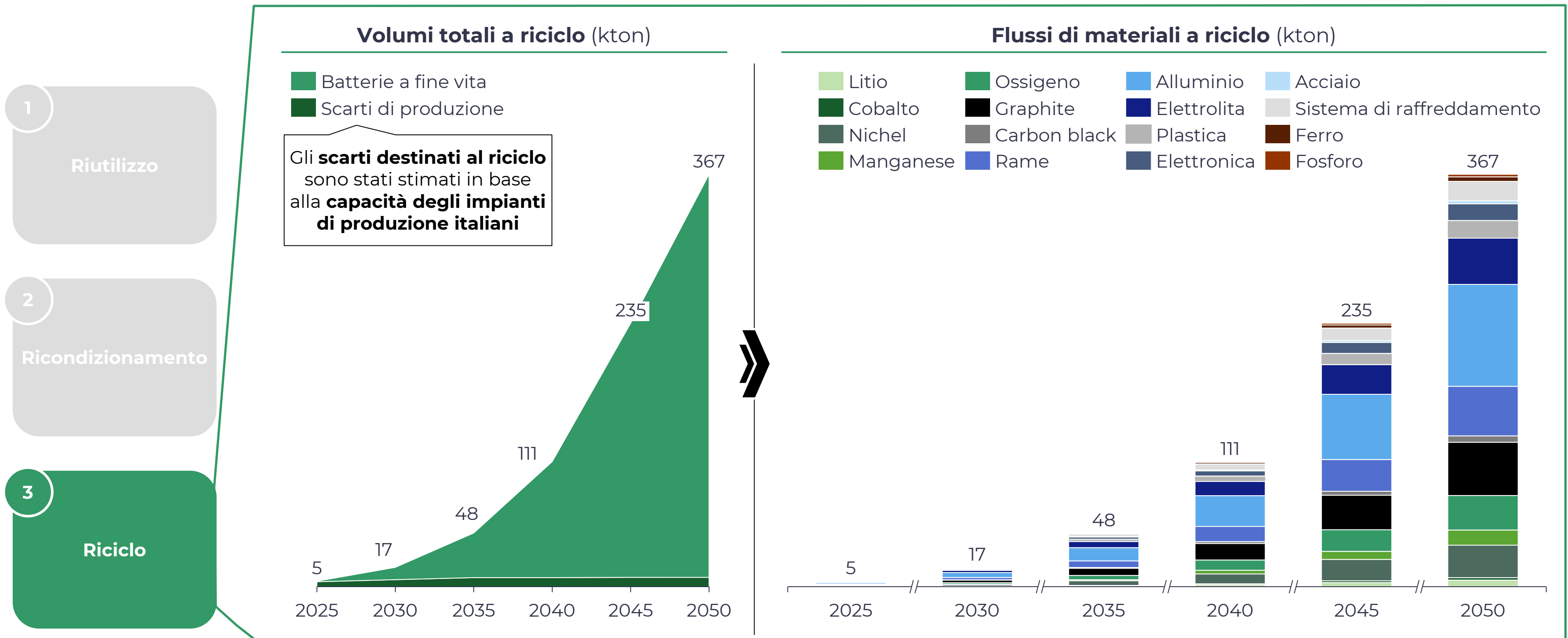
La capacità per applicazioni di «seconda vita» è in crescita e raggiungerà 77 GWh al 2050



I volumi di batterie destinati a riciclo in Italia



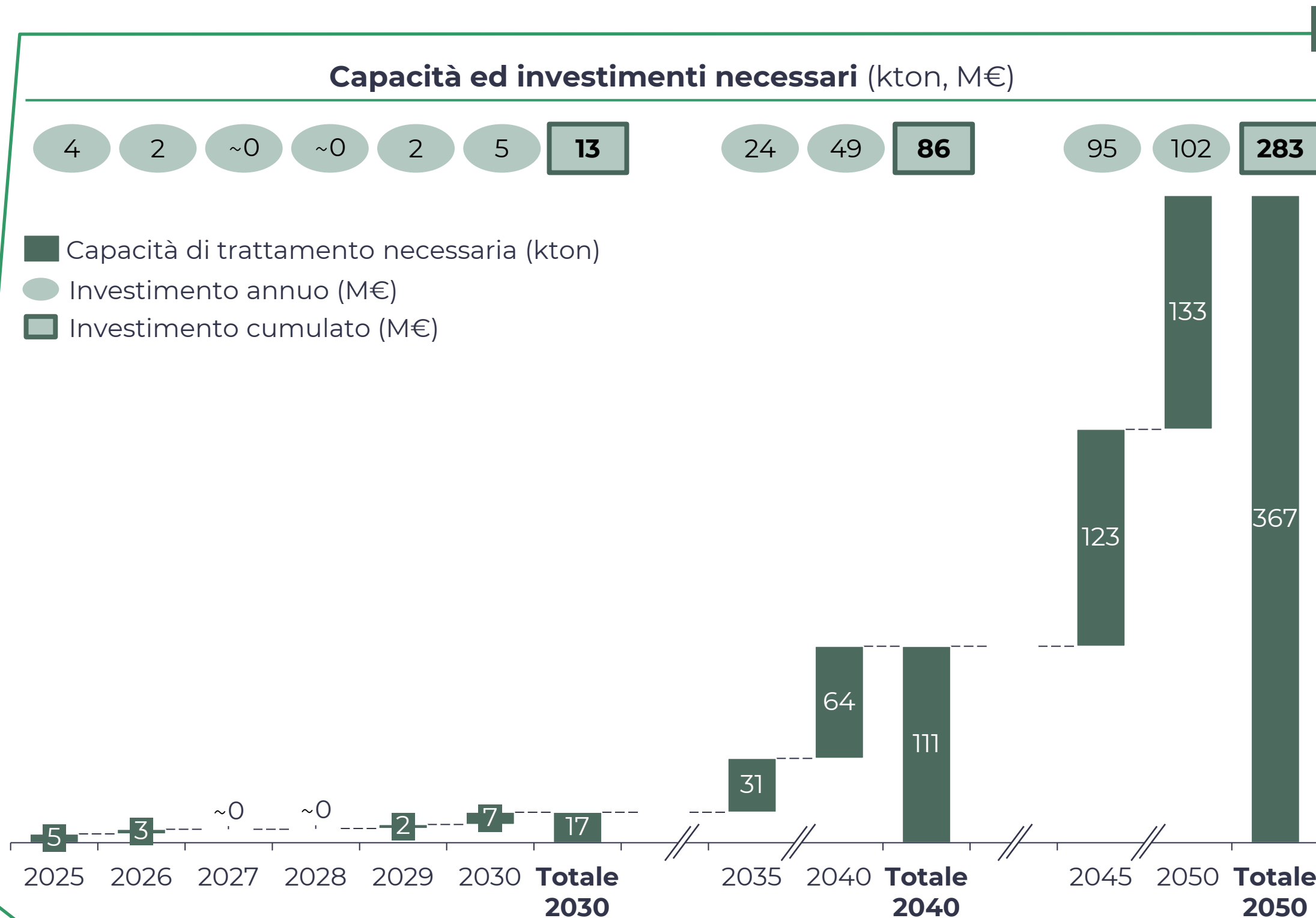
I volumi di batterie destinati a riciclo in Italia raggiungeranno ~ 367 kton al 2050



Investimenti necessari in Italia e costi associati



- 1 Riutilizzo
- 2 Ricondizionamento
- 3 Riciclo



Ad oggi, **in Italia non sono presenti** impianti per il riciclo di batterie agli ioni di litio, per cui a fine vita vengono tipicamente **trasferite all'estero**



La **capacità di trattamento** è stata dimensionata per **intercettare annualmente tutti i volumi** di batterie EV a fine vita generati sul territorio nazionale

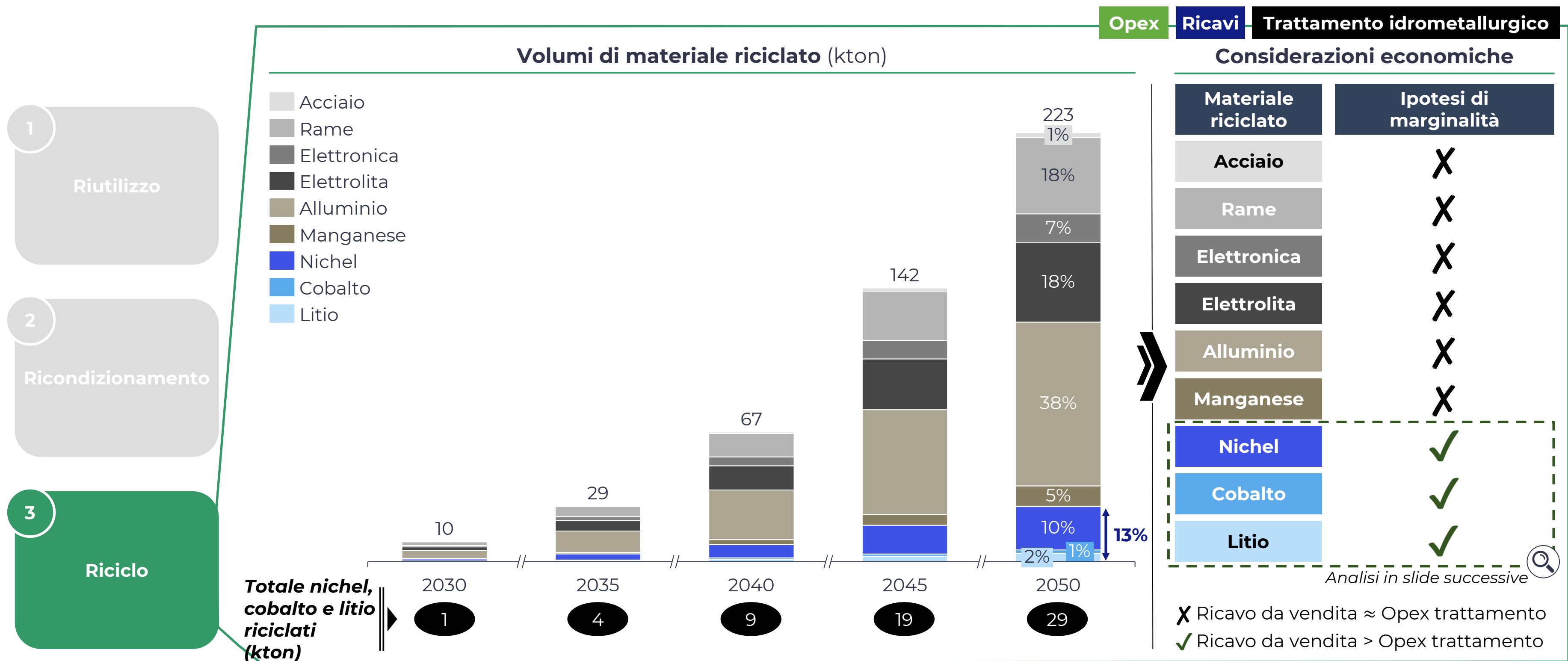


I costi di investimento (Capex) sono stimati per un impianto **idrometallurgico di medie dimensioni** (~ 5-10 kton/ anno); il costo può **variare** significativamente a seconda della **dimensione dell'impianto** e della **tipologia di trattamento**

Volumi di materiale riciclato in Italia



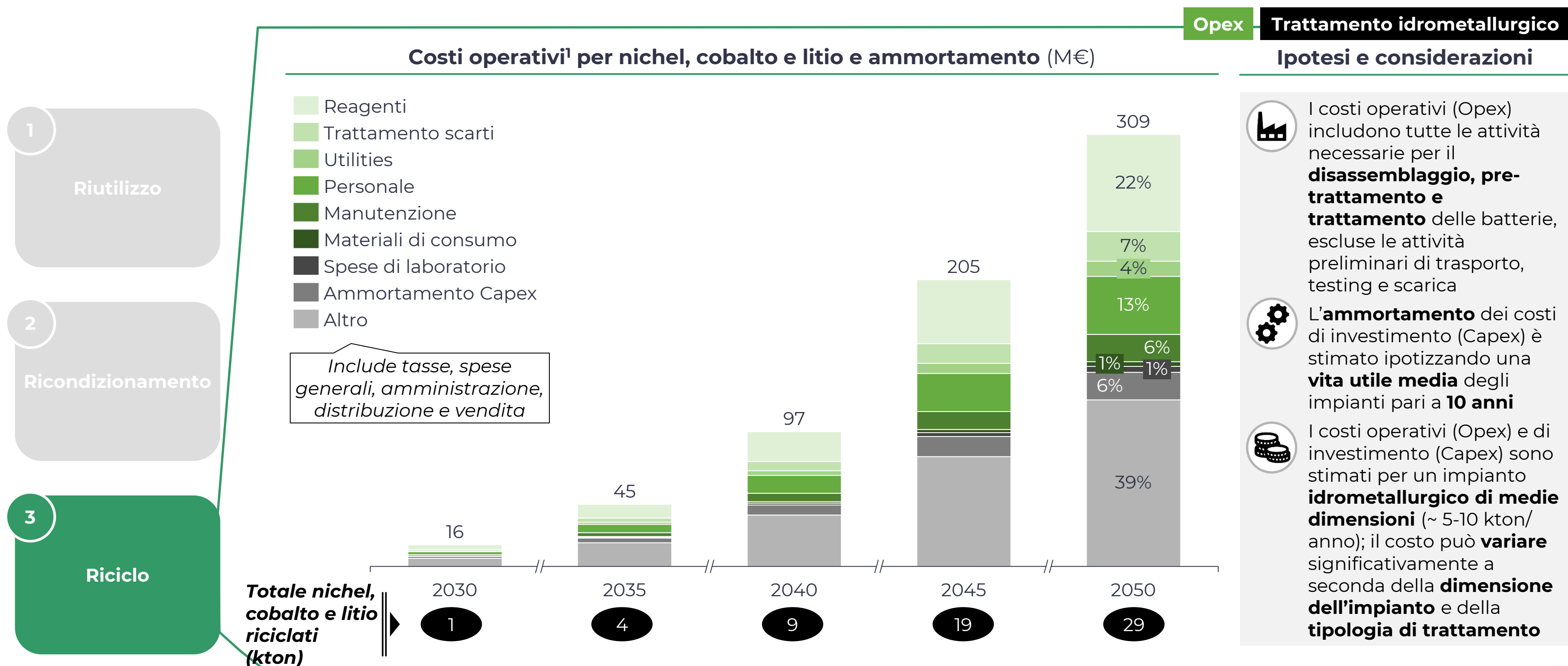
Nichel, cobalto e litio coprono il ~13% dei volumi riciclati e offrono opportunità di marginalità



Costi operativi e ammortamento



I costi operativi per il trattamento di nichel, cobalto e litio al 2050 saranno pari a ~ 309 M€



Il valore di mercato del riciclo in Italia



Al 2050, i ricavi generati dal riciclo saranno pari a 431-646 M€ con una marginalità di 121-337 M€

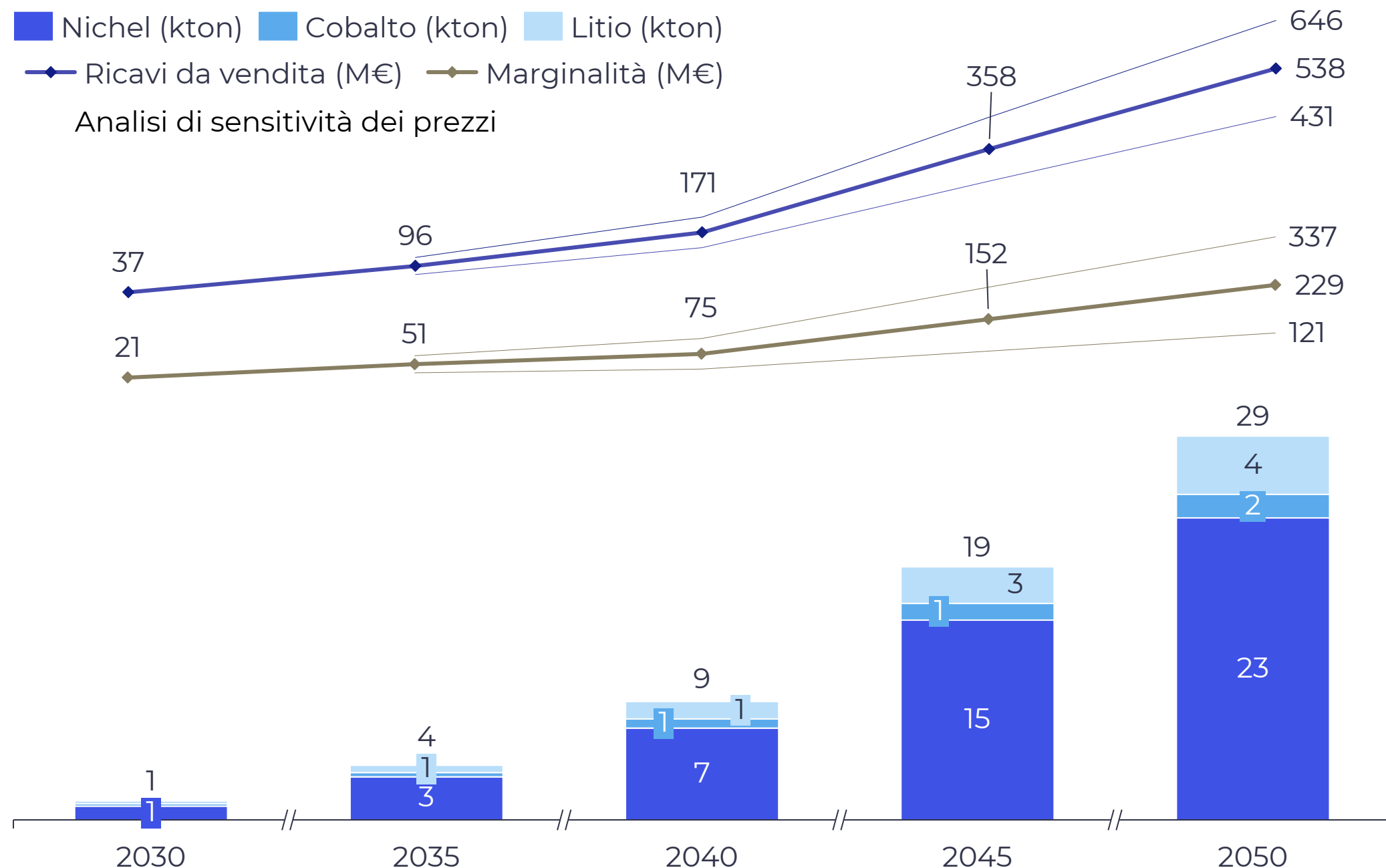
Capex

Opex

Ricavi

Trattamento idrometallurgico

Volumi e valore di mercato di nichel, cobalto e litio (kton, M€)



Ipotesi e considerazioni



I **prezzi del materiale riciclato** sono stimati applicando uno **sconto** sui prezzi del vergine in base all'**offerta di materiale riciclato** in uscita dai processi di trattamento rispetto alla **domanda per adempiere ai target UE** di contenuto minimo:

- 0% in caso di domanda superiore all'offerta
- 20% in caso di domanda inferiore all'offerta



I **prezzi del materiale vergine** sono stimati in base allo **storico** degli ultimi 10 anni e alle **previsioni al 2030**, con un'analisi di **sensitività** a partire dal 2035



La **marginalità** calcolata considera, per la sola fase di riciclo: **ricavi da vendita, costi operativi e ammortamento**

1

Riutilizzo

2

Ricondizionamento

3

Riciclo

Agenda

Stima del mercato del riciclo e degli investimenti necessari

Considerazioni sui modelli di business

Principali fasi e attori della catena del valore

Fattori di successo

View tecnologica

Agenda

Stima del mercato del riciclo e degli investimenti necessari

Considerazioni sui modelli di business

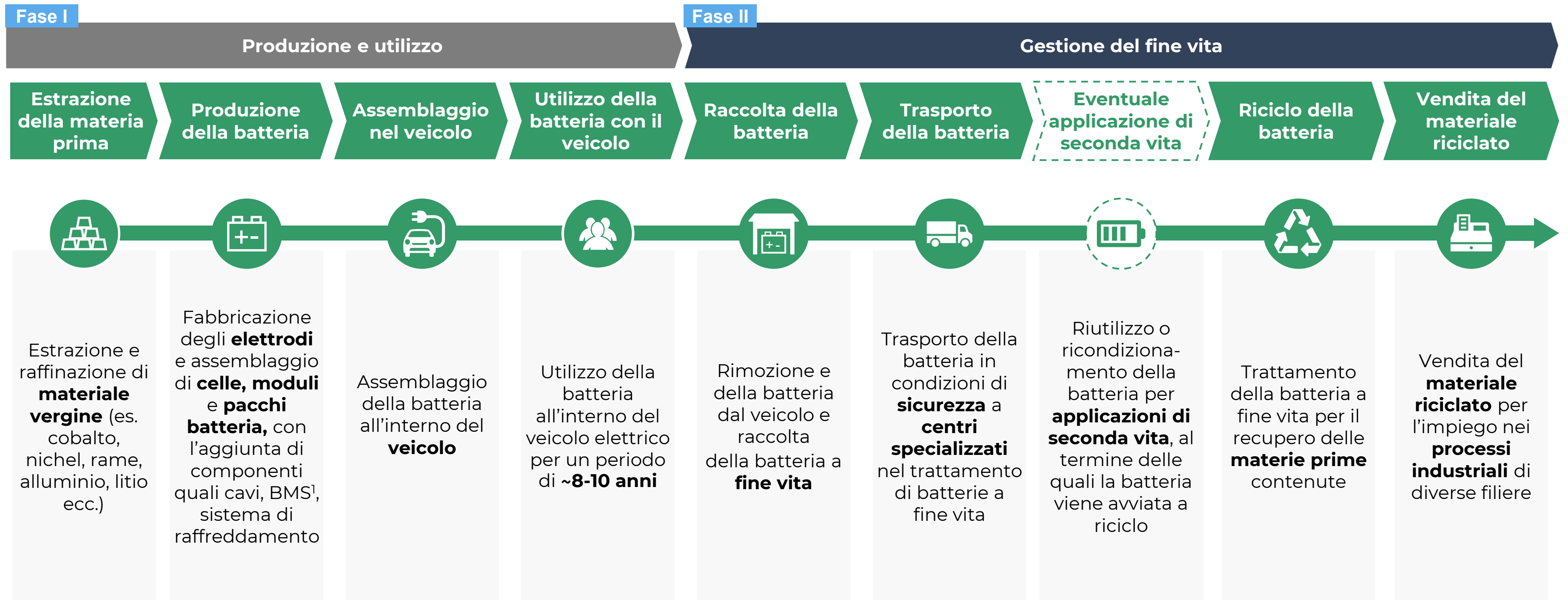
Principali fasi e attori della catena del valore

Fattori di successo

View tecnologica

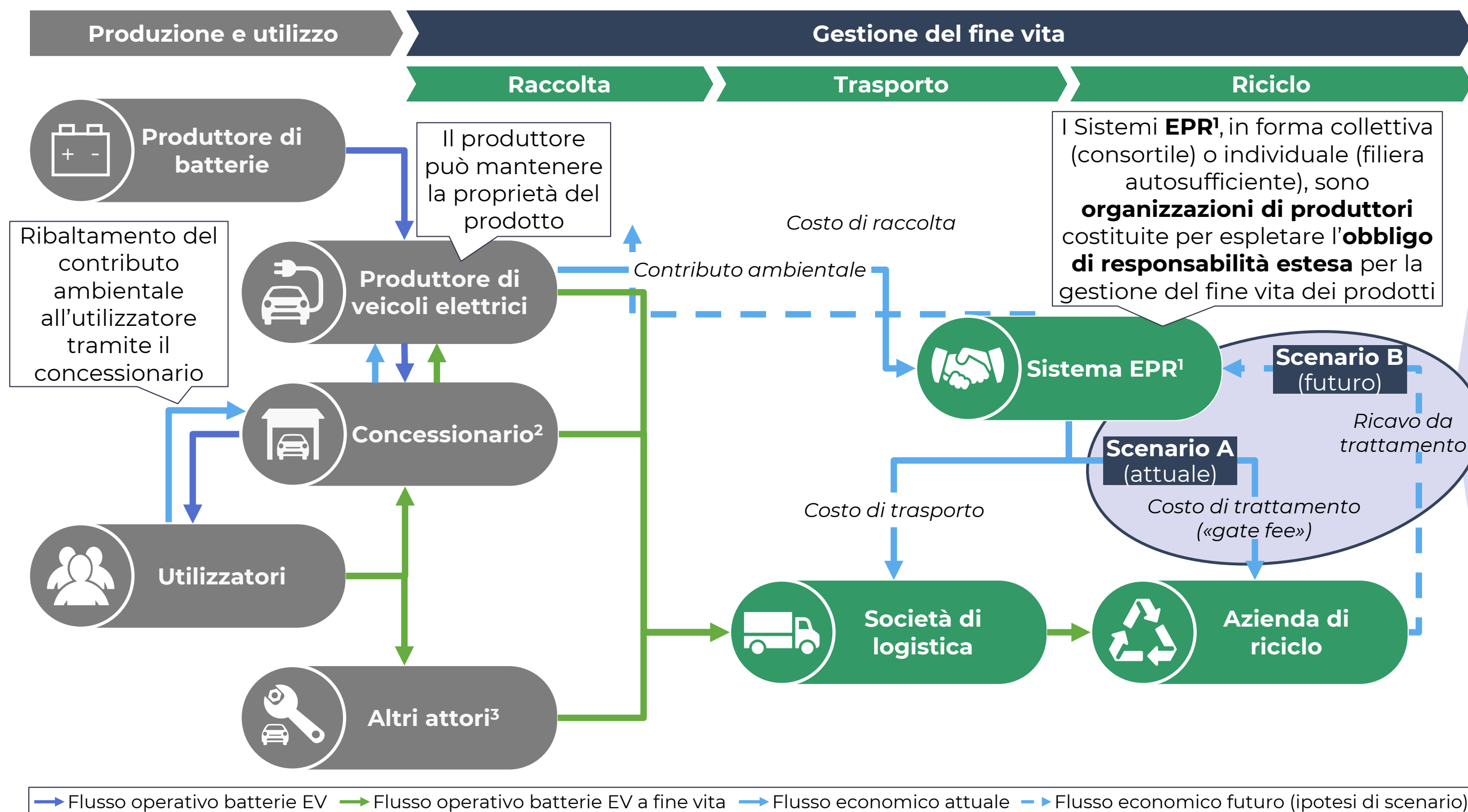
Catena del valore delle batterie per veicoli elettrici

La catena del valore delle batterie per veicoli elettrici è strutturata in 2 macro-fasi



Flussi operativi ed economici delle batterie EV

I flussi operativi ed economici per la gestione del fine vita sono organizzati dai sistemi EPR¹

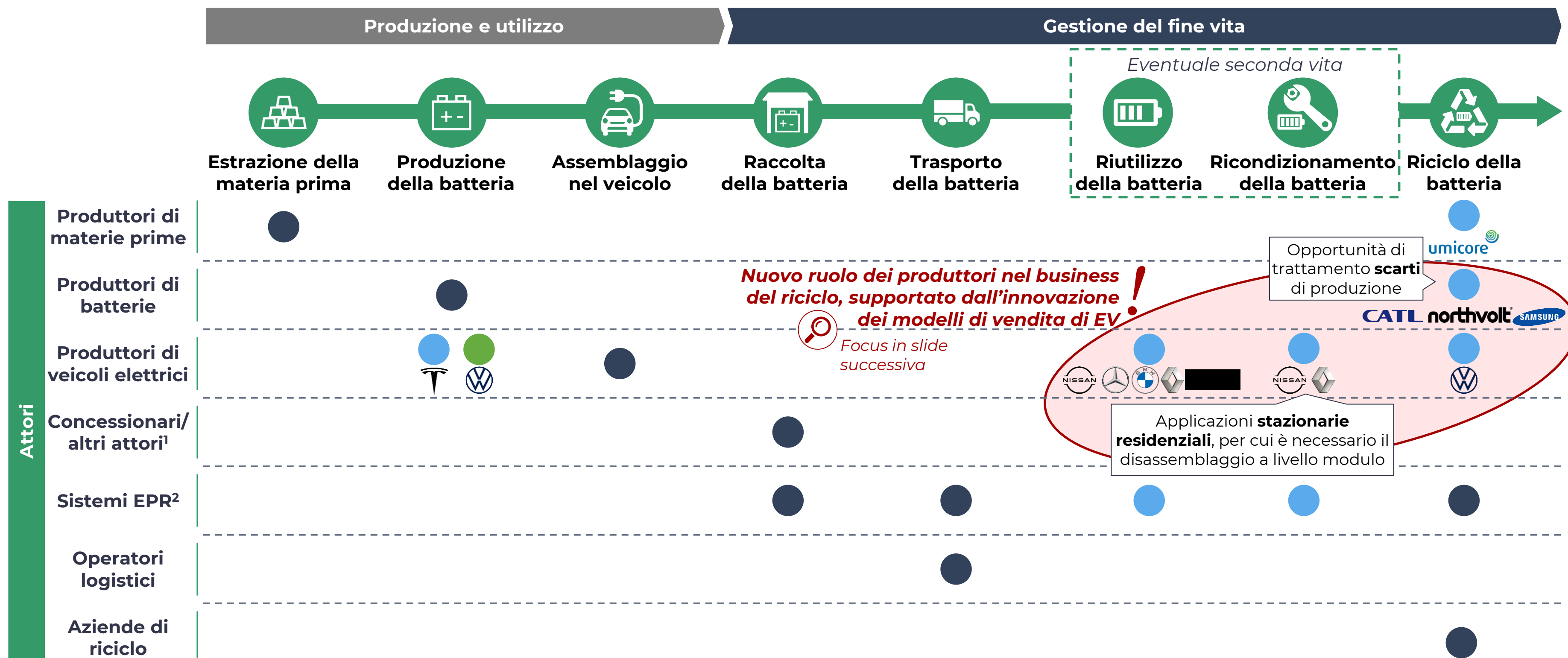


- Ad oggi, i **Sistemi EPR¹** sostengono un costo per ciascuna fase del fine vita, incluso l'avvio a riciclo, per cui **erogano un pagamento a favore delle aziende di riciclo** (Scenario A, «gate fee»)
- In futuro, si ipotizza uno **scenario migliorativo** in cui, grazie al raggiungimento della **scala adeguata** e quindi dell'**ottimizzazione dei costi** di riciclo, i Sistemi EPR¹ conferiranno i prodotti per l'avvio a riciclo dietro **riconoscimento di un pagamento da parte delle aziende di riciclo** (Scenario B). Tale scenario, dimostrando la convenienza economica della gestione del fine vita, potrebbe inoltre implicare:
 - La **risoluzione** del problema delle **«batterie orfane⁴»**, il cui costo di gestione viene attualmente redistribuito sul contributo ambientale medio
 - Il sostenimento di un **costo di raccolta** da parte dei **Sistemi EPR¹**, come già accade ad oggi in altre filiere più sviluppate (es. batterie al piombo)

Attori e ruoli lungo la catena del valore

Non esaustivo

Gli attori tradizionali della catena del valore si stanno estendendo in ruoli diversi



Innovazione dei modelli di vendita di EV

I nuovi modelli di vendita di EV supportano l'accesso dei produttori alle batterie a fine vita



Modelli di vendita dei veicoli elettrici	Vendita veicolo + Vendita batteria	Leasing veicolo + Leasing batteria	Vendita veicolo + Leasing batteria	Vendita veicolo + Battery as a Service	Vendita veicolo + Battery Swap
Proprietà della batteria	 Utilizzatore	 Produttore di veicoli elettrici	 Produttore di veicoli elettrici	 Produttore di veicoli elettrici  Produttore di batterie	 Produttore di veicoli elettrici  Produttore di batterie
Player	Tutti	Tutti	   	 NIO ¹	 NIO  CATL
Paese	Tutti	Tutti	Tutti		 
Durata media del contratto	n.a.	2-5 anni	Abbonamento mensile	Abbonamento mensile	Abbonamento mensile
Punti di raccolta della batteria a fine vita	 Altri attori ²	 Concessionario	 Concessionario	 Concessionario	 Stazione di swap
Facilità di accesso alle batterie a fine vita per i produttori	1	4	4	4	3

Note: 1) Partnership tra NIO e produttori di batterie; 2) Elettrauto, officine, autodemolitori
Fonte: PwC Strategy&

Agenda

Stima del mercato del riciclo e degli investimenti necessari

Considerazioni sui modelli di business

Principali fasi e attori della catena del valore

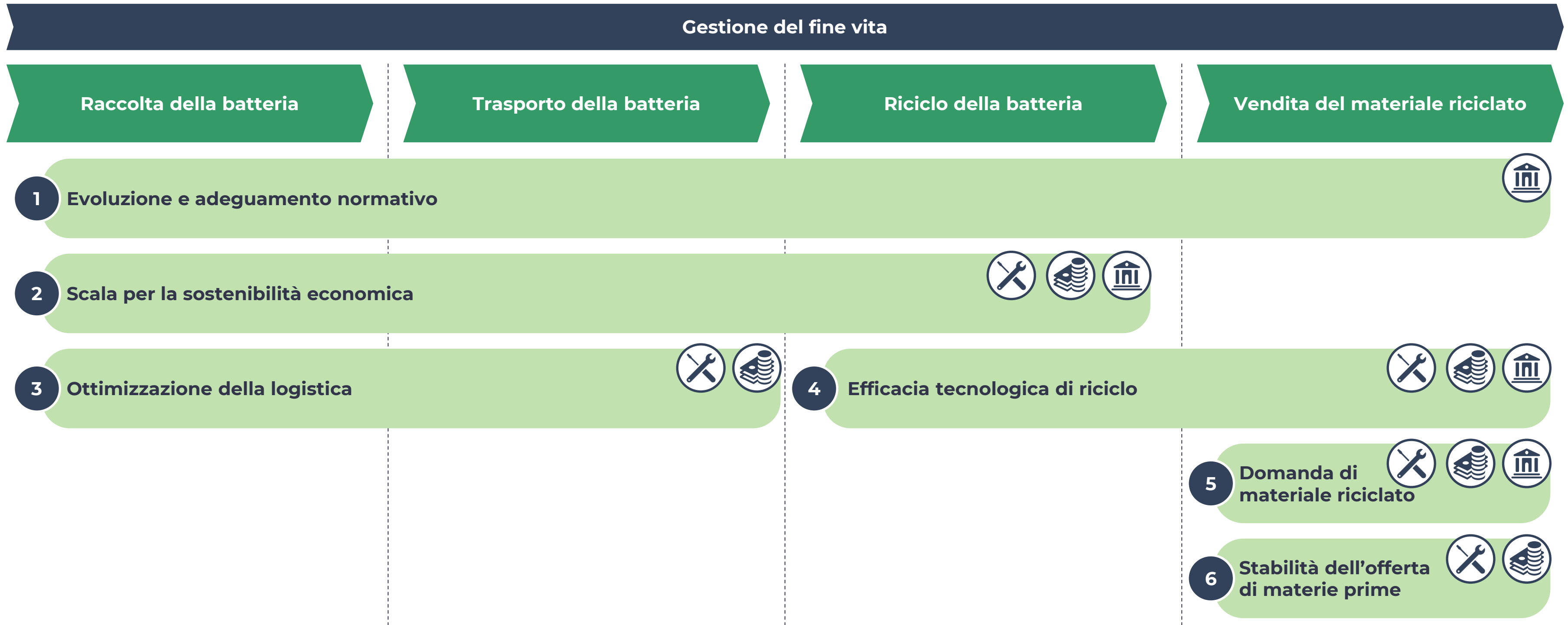
Fattori di successo

View tecnologica

Fattori di successo dei modelli di business

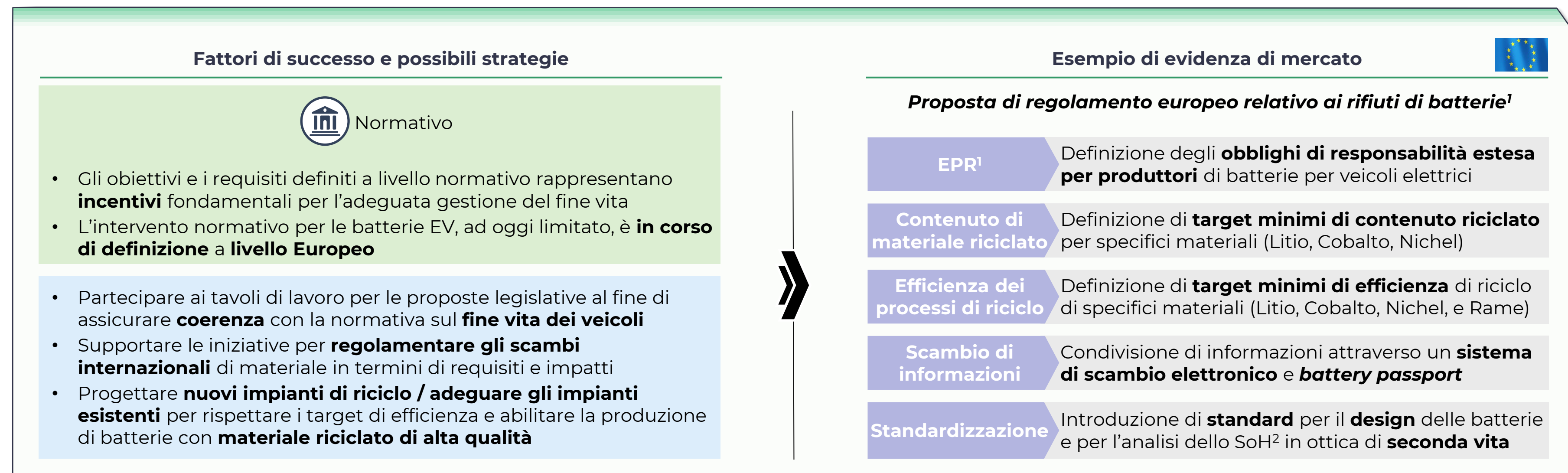
! I fattori di successo sono fortemente correlati tra loro per cui non devono essere considerati singolarmente

Sono stati identificati 6 fattori di successo per la gestione del fine vita delle batterie



1 Evoluzione e adeguamento normativo

L'evoluzione della normativa europea supporta la gestione del fine vita delle batterie



Note: 1) EPR (Extended Producer Responsibility) = Responsabilità Estesa del Produttore; 2) SoH (State of Health) = stato di salute
 Fonte: Proposta di regolamento del parlamento europeo e del consiglio relativo alle batterie e ai rifiuti di batterie, che abroga la direttiva 2006/66/CE e modifica il regolamento 2019/1020, 10/12/2020, PwC Strategy&

2 Scala per la sostenibilità economica

Gli elevati volumi attesi giustificano l'investimento in infrastruttura di riciclo



Fattori di successo e possibili strategie



Tecnologico /
Infrastrutturale



Economico



Normativo

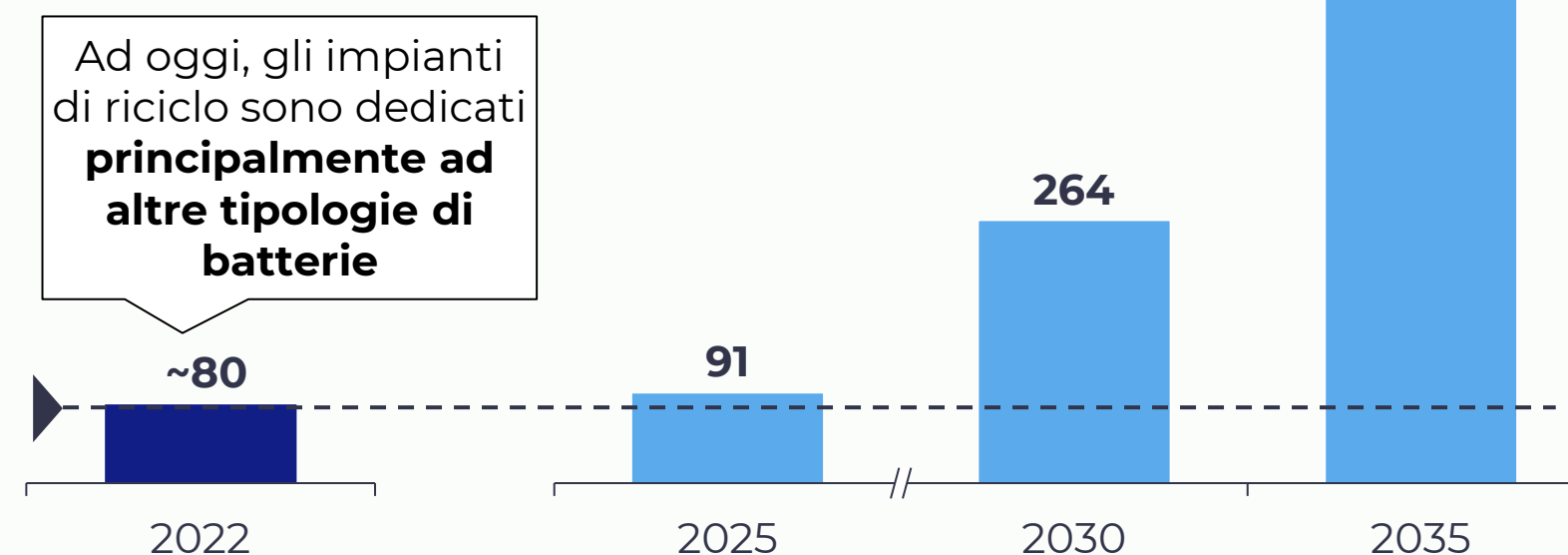
- Le attività di raccolta, trasporto e riciclo richiedono **significativi volumi in input** per garantire la sostenibilità economica del modello
- Volumi crescenti** di batterie esauste, superiori alla capacità di trattamento esistente, consentiranno di raggiungere la scala necessaria per **giustificare l'investimento** infrastrutturale
- Promuovere lo sviluppo di **partnership** coinvolgendo gli **attori lungo la filiera** (produttori di batterie, produttori di automobili, concessionari, operatori logistici e riciclatori) per **ottimizzare la raccolta e il trasporto** delle batterie a fine vita in termini di:
 - Qualità (stato di salute)
 - Omogeneità di composizione chimica
 - Luogo di raccolta

Esempio di evidenza di mercato



Evoluzione dei volumi a riciclo e capacità europea (kton)

- Capacità di trattamento esistente
- Volumi destinati a riciclo



3 Ottimizzazione della logistica

I costi logistici per il trasporto delle batterie esauste sono influenzati da molteplici fattori



Fattori di successo e possibili strategie



Tecnologico /
Infrastrutturale



Economico



Normativo

- La logistica per il trasporto rappresenta **uno dei principali costi** di gestione delle batterie a fine vita e dipende da **3 fattori**:
 - Adeguate classificazione** delle batterie esauste raccolte in base alle condizioni fisiche (critiche vs non critiche)
 - Distribuzione** dei punti di **raccolta** delle batterie esauste
 - Capacità infrastrutturale** sul territorio
- Sviluppare **procedure e programmi di formazione** indirizzati agli attori coinvolti nella **classificazione** di batterie esauste (es. *dealer*)
- Promuovere, almeno in una prima fase, **modelli di vendita** di EV che favoriscano la **concentrazione dei punti di raccolta**
- Sviluppare un'adeguata **infrastruttura** urbana e industriale sul **territorio**, riducendo la necessità di trasporto all'estero



Esempio di evidenza di mercato

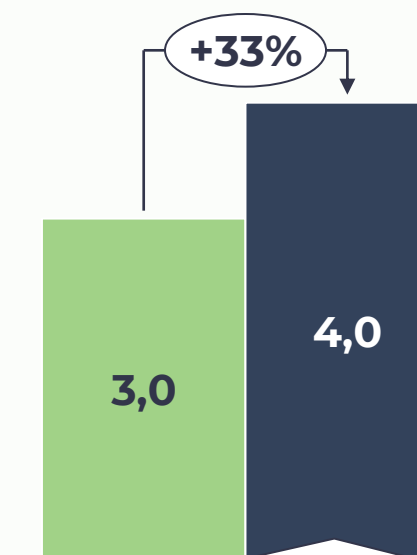


Costo del trasporto di batterie EV per classificazione (€/kg)

Le **batterie** classificate come **critiche**¹ richiedono che durante il trasporto:

- La temperatura della superficie esterna dell'imballo non superi i 100°C
- Nessuna fiamma possa svilupparsi all'esterno dell'imballo
- Nessun proiettile possa uscire dal pacco
- Venga mantenuta l'integrità strutturale dell'imballo
- L'imballo abbia un sistema di gestione del gas

■ Batterie non critiche
■ Batterie critiche



Tali requisiti comportano anche che gli imballi non possano essere sovrapposti

Note: 1) Possono degradarsi rapidamente, reagire pericolosamente, produrre fiamma, calore, emissione di gas, vapori tossici, corrosivi o infiammabili
Fonte: Cobat, PwC Strategy&

4 Efficacia tecnologica di riciclo

Processi di riciclo innovativi stanno affiancando soluzioni di trattamento consolidate



Fattori di successo e possibili strategie



Tecnologico /
Infrastrutturale



Economico

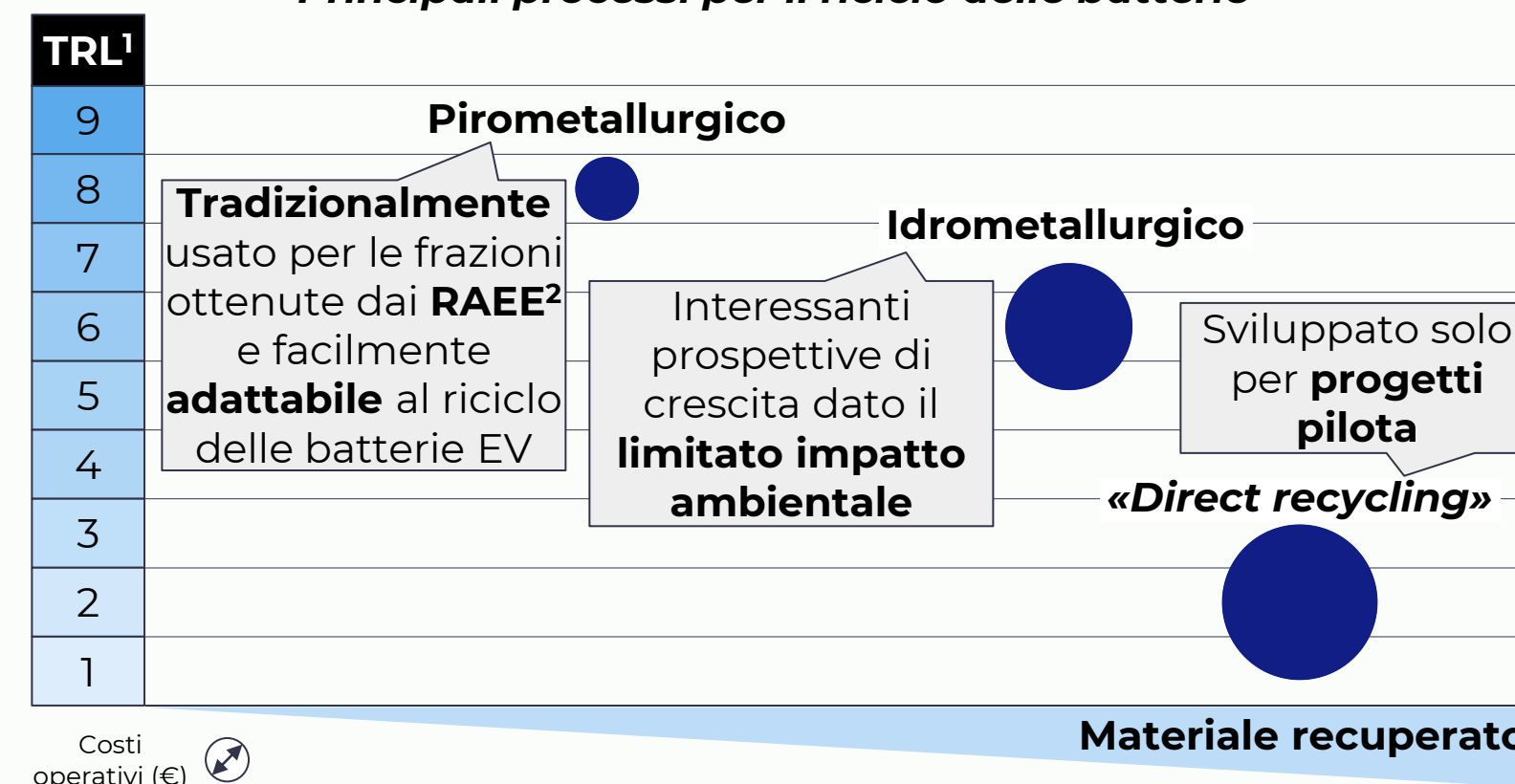
- I processi di riciclo vengono valutati in base al **livello di maturità tecnologica** (TRL¹), la **capacità di recupero di materiale** e i **costi operativi** associati

- Promuovere lo **sviluppo** e l'**adozione** di nuove tecnologie che abilitano un trattamento efficiente e sostenibile a livello economico, ambientale e sociale
- Sviluppare **progetti pilota** per processi di trattamento innovativi al fine di dimostrarne la **fattibilità tecnica** e supportare la loro **applicazione su larga scala**, ottimizzando la resa della materia
- Supportare **progetti di ricerca** con aziende, start-up e università con l'obiettivo di sviluppare **nuove soluzioni** e / o **adeguare soluzioni esistenti**

Esempio di evidenza di mercato



Principali processi per il riciclo delle batterie



Note: 1) TRL (Technology Readiness Level) = Livello di maturità tecnologica; 2) RAEE = Rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche
Fonte: Politecnico di Milano, PwC Strategy&

5 Domanda di materiale riciclato

L'allocazione di materiale riciclato è garantita dalla domanda su filiere industriali diverse



Fattori di successo e possibili strategie



Tecnologico /
Infrastrutturale



Economico



Normativo

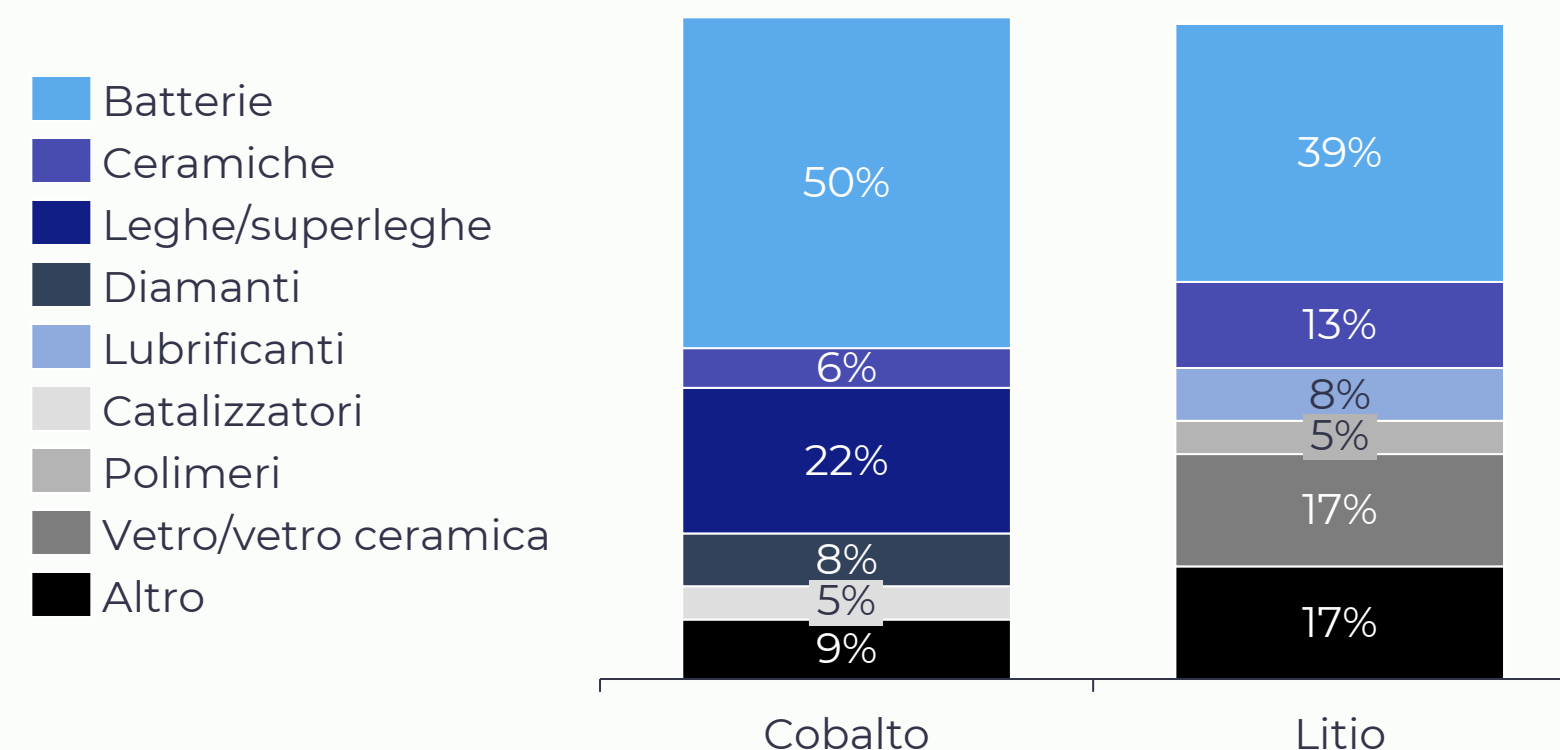
- L'efficace sviluppo e applicazione di una filiera per le batterie EV a fine vita richiede una **domanda consolidata** di **materiale riciclato** ottenuto dai processi di riciclo, supportata dai nuovi target Europei
 - Il **rischio di mercato** associato all'allocazione di materiale riciclato può essere **ridotto** con la **diversificazione** dei **mercati di sbocco**
-
- Promuovere l'utilizzo di materiale riciclato** per la produzione di **batterie per EV**, al fine di raggiungere i nuovi **target europei**
 - Supportare lo sviluppo di **certificazioni** per il materiale riciclato al fine di facilitarne l'applicazione in **filieri industriali diverse** dalle batterie per EV, per promuovere la **sostituzione** dell'attuale domanda di **materiale vergine** per i principali componenti delle batterie (es. cobalto, litio)



Esempio di evidenza di mercato



Distribuzione della domanda tra filiere (% su totale ton, 2020)



6 Stabilità dell'offerta di materie prime

Il riciclo di batterie a fine vita consente di sviluppare un'offerta locale e stabile di materie prime



Fattori di successo e possibili strategie



Tecnologico /
Infrastrutturale



Economico

- Lo sviluppo di una **filiera locale di materiale riciclato** può **mitigare** le principali **fonti di instabilità** della catena di fornitura di materiali vergini per le batterie per EV, la cui **scarsa disponibilità e accessibilità** (aumento e volatilità dei prezzi) è dovuta a:
 - Concentrazione geografica delle miniere** di estrazione in paesi terzi, con rischi ambientali e sociali legati alle pratiche lavorative
 - Competitività della domanda** su altre filiere industriali
- Supportare gli investimenti in **capacità di trattamento** a livello **nazionale** generare **materia prima seconda** per batterie per EV
- Promuovere la **produzione di batterie** per EV sul territorio europeo e nazionale favorendo l'utilizzo di **materiale riciclato**, incentivato anche dai nuovi target europei

Esempio di evidenza di mercato

Quota del valore globale di esportazioni per paese (% su totale, 2020)



Cobalto



Litio

Cile
61% delle
esportazioni
globali di **litio**

Argentina
19% delle
esportazioni
globali di **litio**

**Repubblica
Democratica
del Congo**
97% delle
esportazioni
globali di
cobalto

Agenda

Stima del mercato del riciclo e degli investimenti necessari

Considerazioni sui modelli di business

View tecnologica

I processi e le tecnologie di riciclo

I trend tecnologici con impatto sui processi di riciclo

Agenda

Stima del mercato del riciclo e degli investimenti necessari

Considerazioni sui modelli di business

View tecnologica

I processi e le tecnologie di riciclo

I trend tecnologici con impatto sui processi di riciclo

Overview del processo di riciclo

Il processo di riciclo per batterie EV è progettato per trattare un prodotto complesso

Introduzione ai processi di riciclo



Il sistema batteria

- La **batteria** è il componente principale per costo, volume e peso del veicolo elettrico
- Le **celle** della batteria contengono metalli preziosi, spesso sotto forma di ossidi (es. cobalto, litio, manganese), inglobati in **una complessa struttura** a strati necessaria alle reazioni elettrochimiche che generano la carica e scarica elettrica
- Le celle sono assemblate in serie e in parallelo in una struttura modulare a formare **pacchi batteria**, completati da componenti di supporto strutturali ed elettronici



Le sfide per l'economia circolare

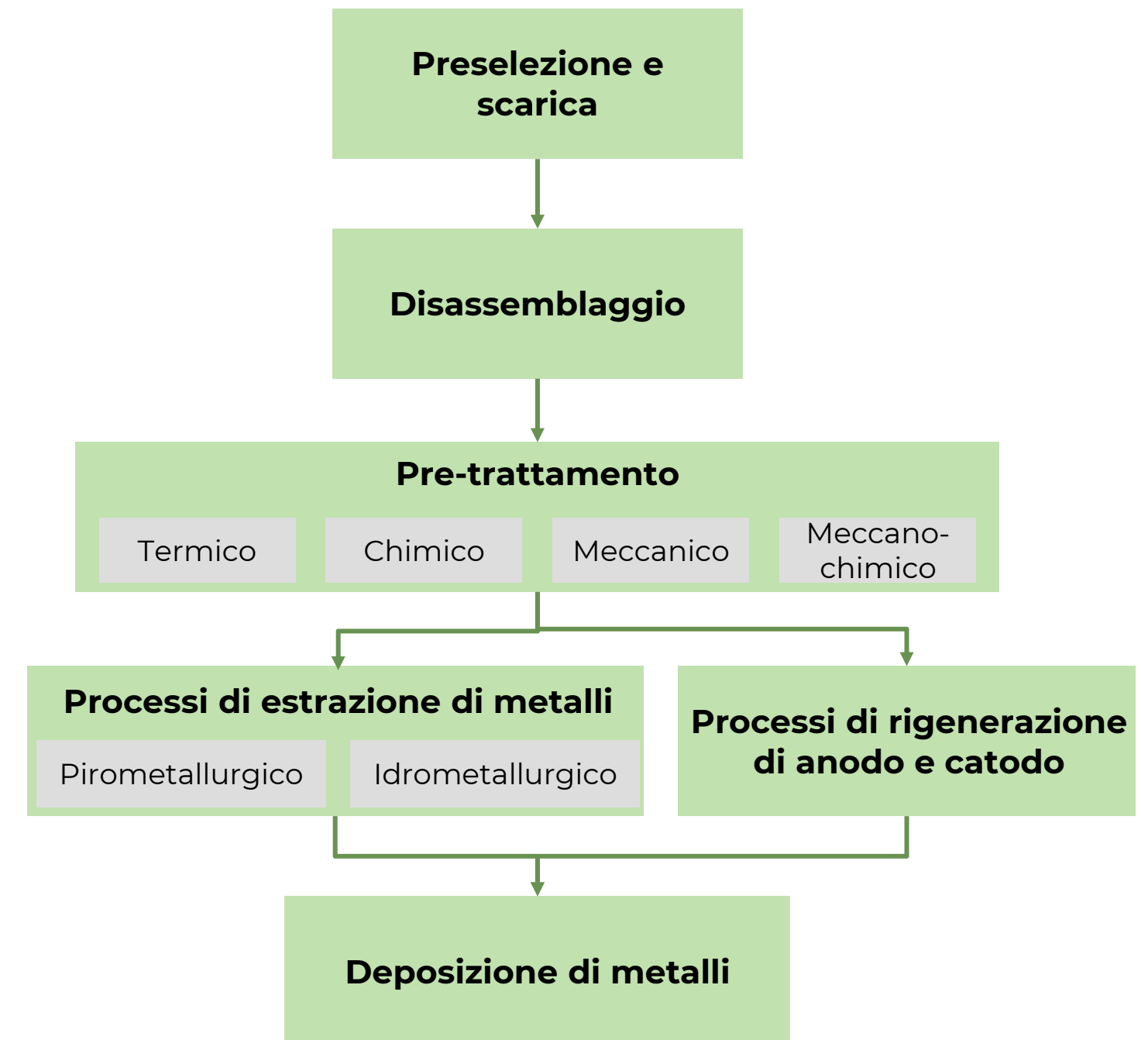
- Il **complesso sistema batteria** è difficile **da trattare** in catene del valore circolari
- I riciclatori devono assicurare la corretta **messa in sicurezza e preparazione** dei trattamenti di riciclo
- I processi di riciclo devono essere progettati per **recuperare in maniera efficiente** l'alto valore incorporato nelle batterie



I processi di riciclo

- La struttura delle catene di processi di riciclo **non è ancora consolidata**, ma è possibile delineare **4 macrofasi del trattamento**:
 - Preselezione e scarica**, per isolare la batteria e rimuovere l'energia residua
 - Il **disassemblaggio** dei moduli e delle celle
 - Il **pre-trattamento** delle celle per liberare e concentrare i metalli target
 - Il **riciclo dei metalli** sino ad ottenere materie prime seconde di qualità idonea ad un utilizzo industriale
- Attori industriali e accademici sono attivi nell'**investigare soluzioni tecnologiche innovative** e nuove condizioni operative dei processi di riciclo

Macrofasi del processo di riciclo



Le principali fasi del processo di riciclo

Il processo di riciclo è strutturato in 4 fasi principali



Preselezione e scarica

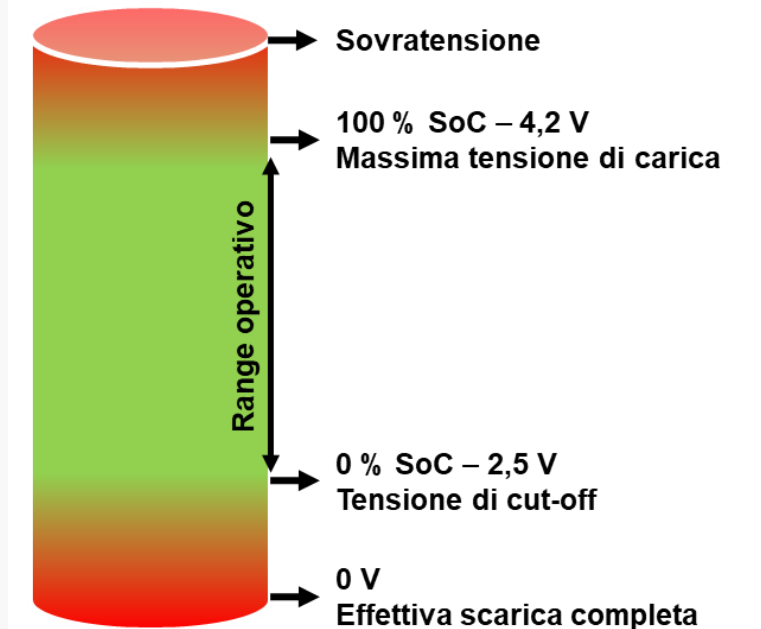
Preselezione

- La preselezione **isola la batteria dal veicolo**, disassemblandola dal complesso di componenti strutturali e funzionali del veicolo
- Esistono diversi **punti di accessibilità**:
 - Fondo auto per modello full electric
 - Vano bagagliaio per modelli ibridi
- E' necessario **rimuovere l'elettronica e circuiti di raffreddamento** a liquido per isolare la batteria



Scarica

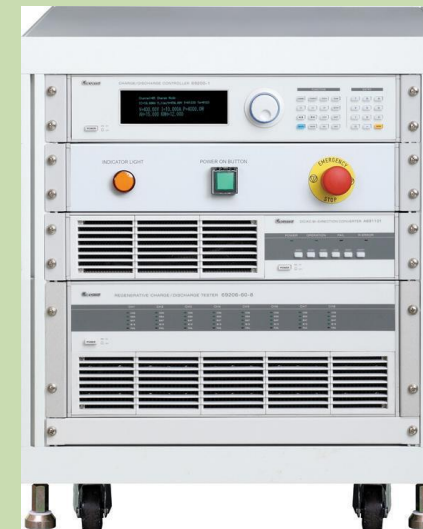
- La **scarica dissipa o recupera l'energia residua della batteria**, poiché durante la fase di utilizzo, le batterie litio-ione rimangono in uno stato di carica (SOC¹) che non raggiunge mai la scarica completa, con tensione e energia residua nulli
- Il **potenziale elettrochimico latente** nella batteria si traduce in un **rischio di shock** elettrico o eventuale deriva termica durante le fasi di disassemblaggio e trattamento



Esempi e applicazioni



- La preselezione della batteria dal veicolo è spesso **effettuata da autodemolitori esperti** e richiede accorgimenti specifici:
 - Isolare la zona di lavoro** in quanto a rischio shock elettrico
 - Utilizzare DPI²** (es. guanti, tool dielettrici e caschetti con visiera)
 - Verificare** il possibile **propagarsi di correnti** parassite nel veicolo e nella batteria stessa

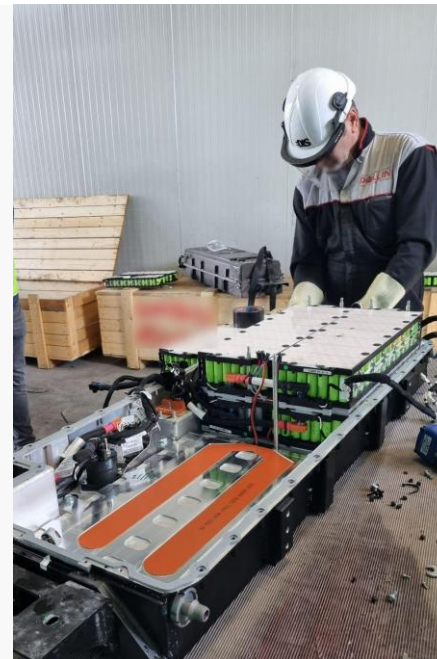


- La scarica di batterie di capacità elevate può avvenire:
 - Applicando resistenza costante**, attraverso resistori o medium ad alta resistenza
 - Generando correnti costanti** e controllate da apparecchiature elettroniche, che talvolta permettono il recupero dell'energia residua
- Sistemi di scarica rigenerativa di taglia industriale sono ad oggi in via di sviluppo e costituiscono una voce di **costo importante** della profittabilità dei processi

Disassemblaggio

Disassemblaggio a livello modulo

- Il **disassemblaggio dei moduli dal pacco** isola le celle litio-ione dalle complesse sovrastrutture della batteria
- Le attività possono essere formalizzate e condivise da batterie di architetture e componenti diversi, attraverso la rimozione di **cover esterna** in metallo, **liquido refrigerante** (se presente), **plug e dei fusibili di sicurezza, blocco di connessione elettrica di potenza, dispositivi elettronici di controllo e moduli**
- Le **giunzioni** tra i diversi componenti sono di tipo **meccanico**



Disassemblaggio a livello cella

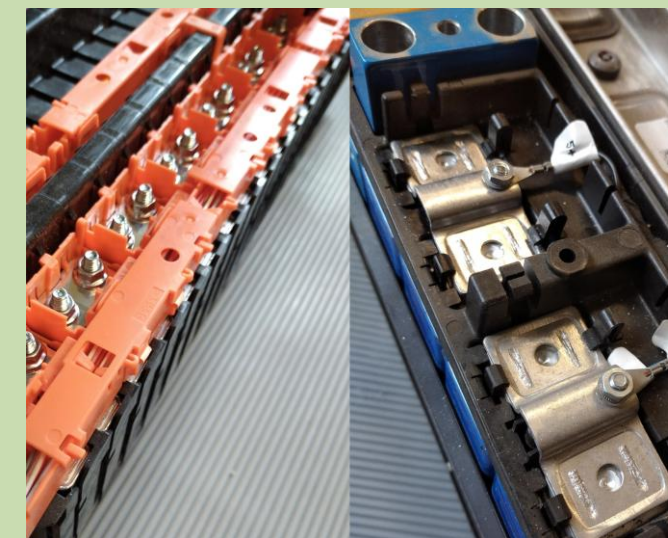
- Il **disassemblaggio delle celle dai moduli** costituisce uno step facoltativo della strategia di disassemblaggio, e garantisce la rimozione di componenti strutturali ed elettronici che inficerebbero le performance di riciclo a valle
- Le **giunzioni** tra i moduli sono diversificate:
 - Le celle sono quasi sempre **saldate**, con tecnologia spesso laser o a ultrasuoni
 - Viene fatto uso di **colle** per migliorare la stabilità del modulo
 - Il case metallico esterno può essere **rivettato**



Esempi e applicazioni



- Il disassemblaggio è spesso **effettuato manualmente**
- **L'automazione dei processi** e realizzazione di soluzioni semi-/ automatizzate è sviluppata da diversi istituti di ricerca e attori industriali:
 - **Unità robotiche** per task ripetibili
 - **Unità collaborative di supporto**
 - Intere **linee semi-automatizzate**



- **L'automazione dei processi** dipende dalla geometria della cella¹ e dalla saldatura:
 - **Cilindriche:** connesse da busbar lamellari tramite saldatura a resistenza
 - **Prismatiche:** connesse da placchette metalliche tramite saldatura laser
 - **Pouch:** saldatura a ultrasuoni per connettere i terminali senza componenti aggiuntivi

Pre-trattamento

Meccanico

- Il pre-trattamento meccanico **frantuma e vaglia** le celle o i moduli, sfruttando **la pezzatura** fine del materiale catodico e anodico per segregarli dai restanti componenti
- Il pre-trattamento meccanico processa celle o moduli litio-ione sfruttando solo **processi meccanici**



Pro

- **Sostenibilità economica ed ambientale** per il basso consumo energetico e l'assenza di reagenti
- **Basso costo di investimento** e conseguente scalabilità



Contro

- **Impossibilità di decomporre il binder**, e conseguente difficoltà di segregazione della black mass dagli altri componenti
- **Rischio di contaminazione** della black mass

Termico

- Il pre-trattamento termico **stimola termicamente** le batterie in forni tradizionali o a microonde (600 – 800 °C), sfruttando a volte l'atmosfera inerte
- La deriva termica interna porta all'**esplosione delle celle** e l'elevata temperatura **decompone il binder** (PVDF) liberando la black mass



- Possibilità di **sfruttare l'energia residua** di batterie non completamente scariche per alimentare il surriscaldamento
- Ottima **liberazione del binder**

- Processo altamente **energivoro**
- **Dissoluzione o compromissione termica** di diversi materiali organici e non organici

Chimico

- Il pre-trattamento chimico prevede la **dissoluzione del binder** tramite agenti chimici, tipicamente solventi organici, a temperature controllate (~100 °C)
- Il pre-trattamento chimico è sempre **preceduto da lavorazioni meccaniche** per liberare il materiale attivo



- Pre-trattamento **poco aggressivo** per gli altri componenti presenti
- **Liberazione del binder** a basse temperature

- **L'efficacia** del pre-trattamento influenzata da **fattori di difficile controllo**: la qualità del materiale in ingresso, la concentrazione del solvente, la tipologia di binder.

Meccano-chimico

- Il pre-trattamento meccano-chimico combina i processi meccanico e chimico in un **unico stadio**
- Il processo meccano-chimico più sfruttato è la **macinazione in umido**, che sfrutta camere di macinazione immerse in soluzioni acquose.

Soluzione più efficiente



- Pre-trattamento più **robusto e industrialmente appetibile** rispetto a quelli puramente chimici
- **Dissoluzione del litio**

- **Alto tasso di ricircolo d'acqua** durante la frantumazione, per la necessità di mantenere bassa la concentrazione del litio

Trattamento per l'estrazione di metalli

Processo di estrazione di metalli

Pirometallurgico

- **Opzione tecnologica matura** che prevede lo stimolo di reazioni chimiche e fisiche attraverso **alte temperature operative**
- La fase conclusiva è la **fusione di una lega ricca di cobalto, rame e nichel**, destinata poi ad una successiva purificazione chimica
- Possono essere incluse fasi **preliminari di tostatura e/o calcinazione**, per isolare i metalli catodici riducendo l'ossigeno e introducendo carbonio a creare CO₂, ottenendo un pre-concentrato da purificare tramite idrometallurgia e recuperando litio sotto forma di carbonato



Idrometallurgico

- **Tre fasi principali**
- 1 **Lisciviazione**: solubilizzazione degli ossidi metallici della black mass, per cui il metodo più utilizzato industrialmente è l'aggressione attraverso acidi inorganici¹; alternativamente è possibile utilizzare acidi organici², ammoniaca o microorganismi (bio-lisciviazione)
- 2 **Purificazione** delle soluzioni ottenute e dei composti metallici
- 3 **Precipitazione chimica** (tramite ossalati), estrazione dei solventi e deposizione elettrolitica



Pro

- **Affidabilità** nella gestione di input variabili e poco controllati
- **Ritmi produttivi** elevati
- **Basse emissioni** di residui organici volatili e gas nocivi



Contro

- Elevate **temperature** operative e forti **consumi energetici**
- **Tasso di recupero** dei materiali target minore rispetto ai processi idrometallurgici



Output

- La lega fusa a valle dei processi pirometallurgici permette il recupero di **cobalto, nichel e rame** con efficienze di Co > 80 %; Ni ~ 95 %; Cu ~ 95 %
- Tutti i restanti materiali vengono considerati come **scarto**
- La **tostatura** permette di ottenere quasi **tutti i metalli catodici**:
 - Per le NMC, l'efficienza di recupero arriva a Ni 98%, Mn 98%, Co 93%
 - Si può inoltre ottenere carbonato di litio con efficienza sopra il 90%

- Soluzione più adatta al **recupero** dei metalli, in particolare **litio e cobalto**
- **Tassi di recupero** più elevati rispetto alla pirometallurgia
- Portfolio più ampio di **materiali rivalorizzabili**

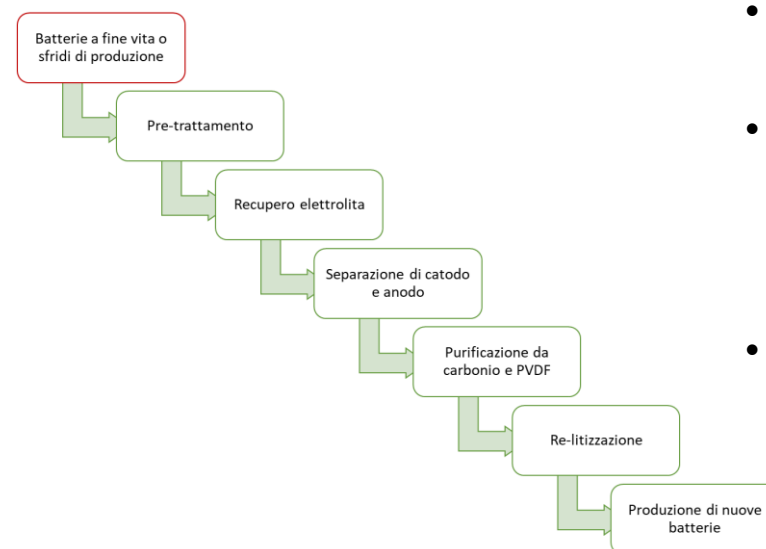
- **Processi difficilmente controllabili**, poiché molto sensibili alla black mass in input, specie se contaminata da alluminio e rame

- La tipologia di composti chimici ottenibili e la loro efficienza di recupero dipende fortemente dal tipo di reagenti e reazioni chimiche utilizzate
- Gli **acidi inorganici** permettono **efficienze oltre il 90%** anche a scala industriale e ne è stata dimostrata in laboratorio la capacità di recupero fino al 100% Li, 99% Mn, 98% Co, 96% Ni

Trattamento per la rigenerazione

Processo di rigenerazione di anodo e catodo

Direct recycling



- Il direct recycling costituisce una **nuova frontiera tecnologica**. Le batterie sono processate per **riottenere materiale anodico e catodico attivo** e riutilizzabile nella produzione di nuove batterie chiudendo il loop senza passare dai singoli precursori chimici
- I due componenti di anodo e catodo possono essere segregati dalla black mass composta da entrambi con buona efficienza tramite **processi di flottazione a schiuma**, sfruttando il diverso grado di idrofilia di catodo e anodo. Infine, i trattamenti chimici e termici riattivano il litio al catodo e completano il direct recycling. Tali processi, di cosiddetta **«re-litizzazione»** costituiscono il fulcro innovativo, spesso brevettato, degli attori che studiano tali processi
- Il direct recycling richiede il trattamento di **batterie uniformi**, sia in termini di chimica del catodo e di materiali costitutivi, **perfettamente conosciute e non contaminate** e necessita di tecnologie di pre-trattamento che garantiscano la produzione di **black mass molto poco contaminata da frazioni metalliche e polimeriche**

I processi di direct recycling sono ad oggi dimostrati in **scala di laboratorio e filiere pilota** molto controllate. I forti vincoli sopra citati fanno pensare ad una loro applicabilità a recuperare **sfridi e scarti di giga-factory «circolari»**



Pro

- **Alto valore aggiunto** ottenuto dall'output del processo
- Processo appetibile anche per le **batterie a basso contenuto di metalli preziosi** come il Cobalto (es. LFP)



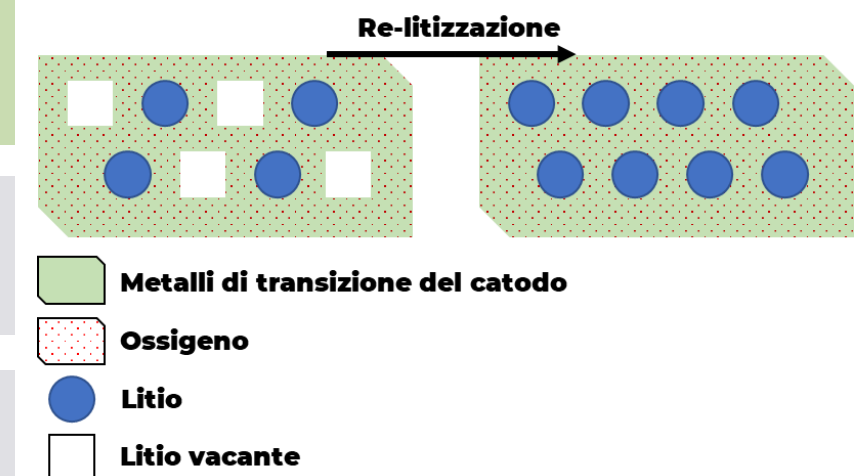
Contro

- Necessità di trattare **materiale in input molto uniforme**
- Necessità di utilizzare **pre-trattamenti specifici per ottenere la black mass**



Output

- **L'anodo**, tipicamente grafite, conserva tracce di PVDF (binder) con cui condivide il carattere idrofobico
- La composizione del **catodo** rispecchia la chimica in input



Difficoltà tecniche e potenziali soluzioni

Difficoltà tecniche

Problema sulla catena del valore

Potenziali soluzioni

1

Alta variabilità delle batterie circolanti in termini di materiali costituenti e strategie di assemblaggio

Difficoltà nella **diversificazione** di trattamento



Sviluppo di **tecnologie flessibili ed adatte**

2

Rischi intrinseci nella manipolazione delle batterie quali **shock elettrico, deriva termica, gas nocivi**

Pericolo per gli operatori in diversi stadi della catena operativa



Identificazione dei **rischi** e sviluppo di **dispositivi di supporto**

3

Trade-off fra opportunità legate al **riciclo e alla seconda vita** delle batterie per applicazioni stazionarie

Rischio di **non ottimizzare** il recupero del valore residuo della batteria



Sviluppo di **sistemi di supporto alla decisione** per la gestione di batterie a fine vita

4

Mancata disponibilità di dati nominali e sulla fase d'uso della batteria

Ricerca indipendente e ridondante dei dati utili al trattamento



Passaporto digitale di prodotto che condivide il minimo quantitativo utile di informazioni

Agenda

Stima del mercato del riciclo e degli investimenti necessari

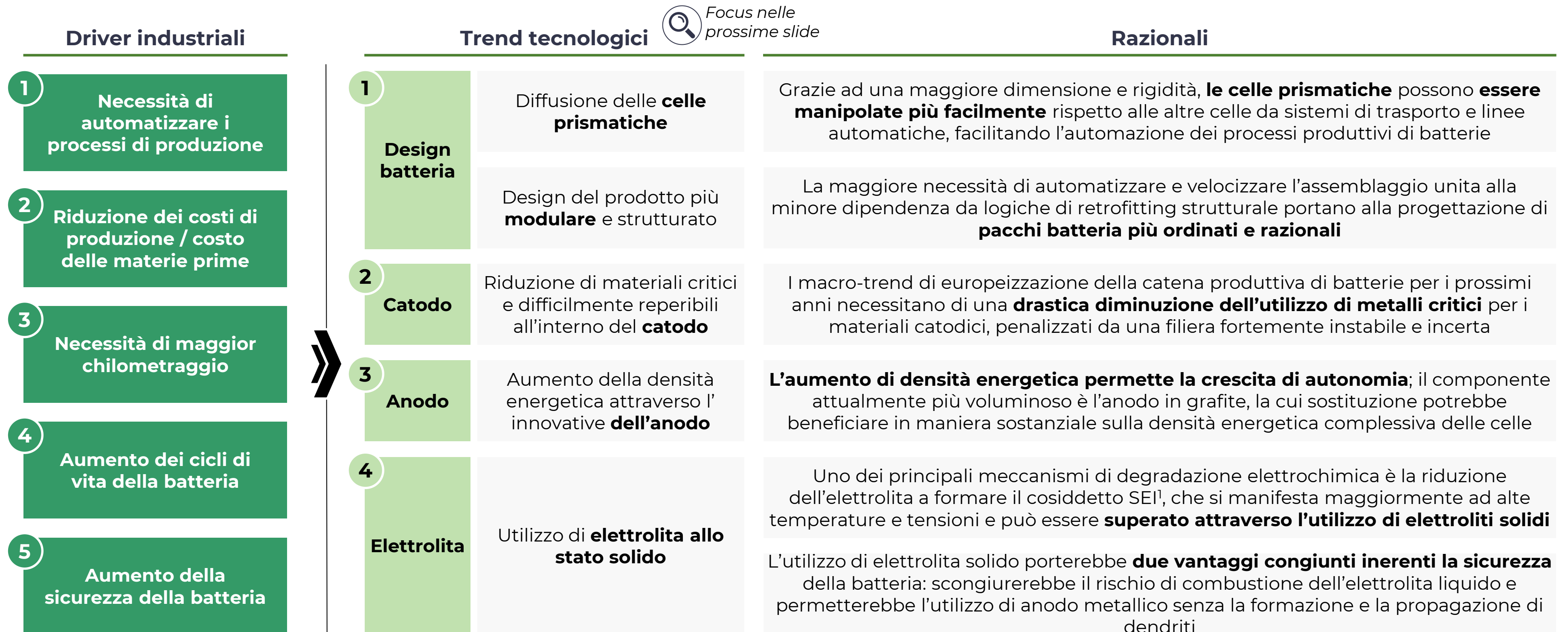
Considerazioni sui modelli di business

View tecnologica

I processi e le tecnologie di riciclo

I trend tecnologici con impatto sui processi di riciclo

Driver industriali e trend tecnologici



Note: 1) SEI = Solid Electrolyte Interphase
Fonte: Politecnico di Milano, elaborazione interna

Nuovi design per le batterie

	Tipo	Parametri di valutazione					AS IS	Trend	Impatto sul processo
Geometria delle celle		Configurazione	Resistenza meccanica	Scambio termico	Energia specifica (massa)	Densità energetica (volume)	Prismatiche Cilindriche	Pouch	L'utilizzo più esteso di celle prismatiche (di maggiori dimensioni e capacità, oltre che più facilmente manipolabili) è da vedersi nell'ottica di automazione e maggiore ritmo produttivo dei sistemi di assemblaggio batterie
	Prismatiche	A spirale, con tolleranze	3 Case alluminio	3	3	4	40%		
	Cilindriche	A spirale, ottimale utilizzo dello spazio	3 Case acciaio	2	3	3	15%		
	Pouch	A zig-zag, buon utilizzo dello spazio	1 No parti rigide	4	4	3	45%		
Layout della batteria		Configurazione	Giunzioni						Soluzioni di assemblaggio razionali e standardizzate volte all'automazione semplificheranno il processo di disassemblaggio
	Prima generazione	Retrofit, per innestarsi nei vecchi châssis	Diversificate e innestate manualmente			Adozione sempre crescente di batterie di seconda generazione	Adozione del metodo cell-to-pack , che prevede l'inserimento delle celle batteria senza l'utilizzo di moduli		
	Seconda generazione	Razionale, compatta, modulare	Standardizzate e innestate in linea						

4 Alto
0 Basso

Evoluzione della chimica del catodo

	AS IS			Trend		
Principali chimiche	Cobalt-rich ¹ NMC 111	LFP	NCA	Nichel-rich ² NMC 622 NMC 811	Li-S	Lithium - oxygen
Proprietà	Buona capacità , potenza, vita utile e affidabilità	Ottima affidabilità , vita utile e potenza, discreta capacità	Ottima capacità , buona potenza e vita utile, discreta affidabilità	Rispetto alle NMC tradizionali: maggiore capacità , minore vita utile e maggiore sensibilità alle sollecitazioni termiche	Il catodo viene stravolto, passando da una miscela di ossidi metallici a materiali poveri quali zolfo e ossigeno	
TRL	9	9	9	6-8	4-5	3-5
Pro	- Chimica più diffusa - Largamente testata ed affidabile	Assenza del rischio di deriva termica	Prestazioni comparabili alle NMC	Basso contenuto di cobalto, maggiore capacità	- Ottima densità energetica - Basso costo di materiali	Buona densità energetica
Contro	Alta percentuale di cobalto	Prestazioni peggiori rispetto alle NMC	Alta percentuale di cobalto	Minore vita utile e maggiore sensibilità alle sollecitazioni termiche	Bassa vita utile	- Instabilità - Resistenza interfaccia

Impatto sul processo

- A prescindere dal mix di tipologie di catodi utilizzati in futuro, è chiaro il trend di **diminuzione di utilizzo del cobalto** nelle prossime generazioni di batterie
- Questo avrà forti **implicazioni sulla sostenibilità economica** dei processi pirometallurgici, che si basa prevalentemente sul recupero del cobalto
- Strategie alternative quali **l'idrometallurgia o il direct recycling** potranno fare leva sulla valorizzazione di una quantità maggiore di materiali e funzionalità della batteria

Evoluzione della chimica dell'anodo

	AS IS		Trend		
Principali chimiche	Grafite	Ossido di litio titanio	Composito grafite-silicio	Silicio	Litio metallo
Proprietà	Questo materiale è di facile reperibilità e rappresenta ad oggi la scelta commerciale per la quasi totalità delle batterie litio-ione	Un'alternativa alla grafite, con proprietà peculiari quali l'elevata stabilità termica ; poco usato in ambito automotive	L'integrazione di silicio nell'anodo in grafite, fino al caso limite della sua completa sostituzione, aumenta la densità di energia mantenendo l'utilizzo di materiali di facile reperibilità e ottima sostenibilità ambientale		Questa configurazione anodica esclude qualsiasi struttura di alloggiamento del litio , che forma uno strato metallico fra il collettore in rame e il separatore elettrolitico solido
TRL	9	9	6-8	3-5	2-4
Pro	- Basso costo - Bassa escursione volumetrica fra carica e scarica	- Capacità di gestire alti C-rate - Buona vita utile - Bassa escursione volumetrica	- Alta capacità - Alta stabilità - Materiali non tossici		Ottima densità di energia e conseguente capacità
Contro	Bassa densità di energia	- Alto costo - Bassa capacità - Bassa tensione nominale	- Alta escursione volumetrica - Performance elettriche ridotte		Forte instabilità e alti rischi dovuti ai dendriti e ad eventuali incidenti

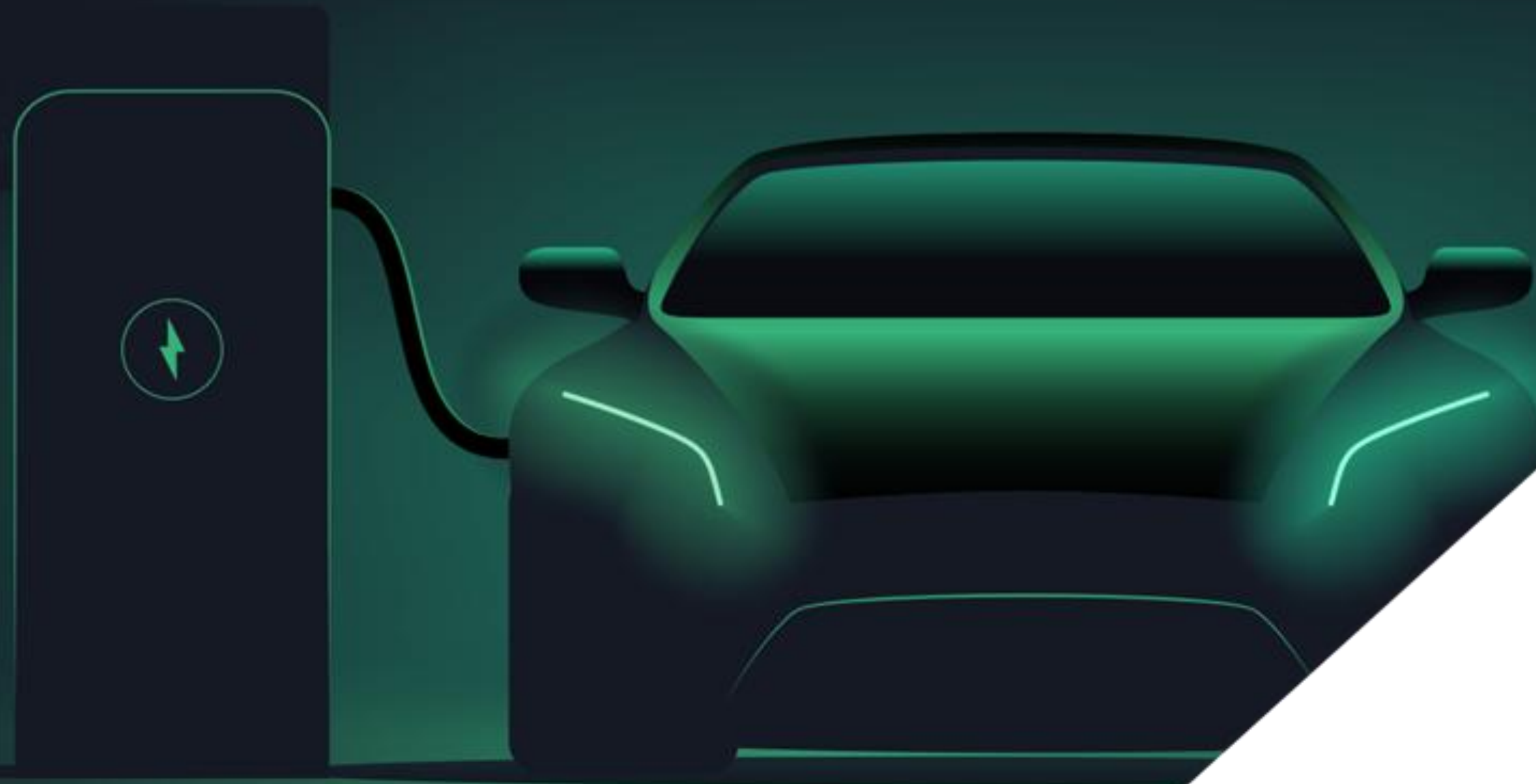
Impatto sul processo

- L'eventuale **introduzione di titanio** nelle batterie commerciali meriterebbe una rivisitazione dedicata dei processi di recupero, ma non ci sono particolari segnali di mercato a riguardo
- La graduale **sostituzione della grafite con il silicio** non influenzerebbe i processi di riciclo; entrambi i materiali possono essere considerati come «contaminanti non metallici» della black mass
- Il riciclo di **batterie litio metallico** richiede una **inertizzazione del materiale attivo** durante le fasi di pre-trattamento. Tipicamente, si opera frantumazione criogenica in ambiente inerte. Le fasi successive della catena di riciclo non subiscono particolari alterazioni

Evoluzione della chimica dell'elettrolita

	AS IS	Trend		Impatto sul processo
Principali chimiche	Elettrolita liquido	Elettrolita solido ceramico	Elettrolita solido polimerico	
Proprietà	L' elettrolita liquido è, per sua natura, l'alternativa ad oggi disponibile che più facilita il passaggio di ioni di litio fra catodo e anodo. Tale fondamentale caratteristica lo rende particolarmente appetibile per le applicazioni automotive, che necessitano di batterie reattive e dinamiche	Principalmente solfiti, ossidi o fosfati , la cui configurazione cristallina li rende adatti alla creazione di film sottili. Sono particolarmente indicati a prestare esercizio a temperature elevate	Possono avere consistenza solida o gel ; in particolare, l'elettrolita gel incorpora particelle liquide in una matrice polimerica (tipicamente PVDF, usato anche come binder degli elettrodi)	- La natura ceramica o organica degli elettroliti solidi non interferisce particolarmente con i processi metallurgici - La presenza di materiale ceramico potrebbe contaminare la black mass, abbassando la concentrazione di metalli target
TRL	9	3-4	3-4	
Pro	Alta conducibilità di ioni di litio	Buone performance a temperature elevate e condizioni operative esigenti	Mantiene una maggiore flessibilità, facilmente gestibile in ottica produttiva su larga scala	L'elettrolita gel potrebbe inficiare i processi di frantumazione e vagliatura, qualora la liberazione di tali materiali non favorisse l'evaporazione della frazione liquida
Contro	- Instabilità elettrochimica e formazione incontrollata del SEI¹ - Inflammabilità - Creazione di sovrappressioni durante cortocircuiti - Necessità di evacuazione tramite valvole	La bassa conducibilità ionica limita fortemente l'utilizzo di elettrolita solido in ambito automotive		

Grazie



Agenda

Appendice

Glossario abbreviazioni

Abbreviazione	Lingua	Termine esteso	Traduzione termine esteso
BEV	Inglese	Battery electric vehicle	Veicolo elettrico a batteria
BMS	Inglese	Battery management system	Sistema di gestione della batteria
DPI	Italiano	Dispositivi di protezione individuale	Dispositivi di protezione individuale
EPR	Inglese	Extended producer responsibility	Responsabilità estesa del produttore
EV	Inglese	Electric vehicle	Veicolo elettrico
HDV	Inglese	Heavy duty vehicle	Veicolo pesante
LCV	Inglese	Light commercial vehicle	Veicoli commerciali leggeri
LFP	Inglese	Lithium Iron Phosphate	Fosfato di ferro e litio
LNMO	Inglese	Lithium Nickel Manganese Oxide	Ossido di litio, nichel e manganese
LNO	Inglese	Lithium Nickel Oxide	Ossido di litio e nichel
NCA	Inglese	Lithium Nickel Cobalt Aluminum Oxide	Ossido di litio nichel cobalto alluminio
NMC	Inglese	Lithium Nickel Manganese Cobalt Oxide	Ossido di litio, nichel, manganese e cobalto
PC	Inglese	Passenger Car	Autovettura
PHEV	Inglese	Plug-in hybrid electric vehicle	Veicolo elettrico ibrido plug-in
RAEE	Italiano	Rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche	Rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche
SEI	Inglese	Solid electrolyte interphase	Interfase elettrolitica solida
SOC	Inglese	State of charge	Stato di carica
SoH	Inglese	State of health	Stato di salute
TRL	Inglese	Technology readiness level	Livello di maturità tecnologica

Fonti (1/2)

- Arumugam Manthiram et al., Chemical Reviews, 2014 “Rechargeable Lithium–Sulfur Batteries”
- Bruno Scrosati et al., Energy and Environmental Science, 2011 “Lithium-ion batteries. A look into the future”
- Dahllöf, L., et al., (2019). Mapping of lithium-ion batteries for vehicles: A study of their fate in the Nordic countries: Nordic Council of Ministers.
- DeMoBat https://www.ipa.fraunhofer.de/en/reference_projects/DeMoBat.html.
- Das, A., Li, D., Williams, D., Greenwood, D., 2018. Joining Technologies for Automotive Battery Systems Manufacturing. World Electric Vehicle Journal 9, 22. <https://doi.org/10.3390/wevj9020022>. Weeber, M., 2021.
- Diekmann, J., Grützke, M., Loellhoeffel, T., Petermann, M., Rothermel, S., Winter, M., Nowak, S., Kwade, A., 2018. Potential Dangers During the Handling of Lithium-Ion Batteries, in: Kwade, A., Diekmann, J. (Eds.), Recycling of Lithium-Ion Batteries: The LithoRec Way. Springer International Publishing, Cham, pp. 39–51. https://doi.org/10.1007/978-3-319-70572-9_3.
- European Commission. Joint Research Centre., Sustainability Assessment of Second Life Application of Automotive Batteries (SASLAB): JRC exploratory research (2016 2017): final technical report, August 2018. Publications Office, 2018. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/53624>.
- European Commission. Joint Research Centre., Study on the EU’s list of critical raw materials (2020)
- European Commission. Joint Research Centre., Study on the future demand and supply of nickel for electric vehicle batteries (2021) doi:10.2760/212807
- G. Reinhart, S. Passerini et al, 2018 "All-solid-state lithium-ion and lithium metal batteries – paving the way to large-scale production”
- Gaines, L., Dai, Q., Vaughey, J.T., Gillard, S., 2021. Direct Recycling R&D at the ReCell Center. Recycling 6, 31. <https://doi.org/10.3390/recycling6020031>.
- Gentilini, L., Mossali, E., Angius, A., Colledani, M., 2020. A safety oriented decision support tool for the remanufacturing and recycling of post-use H&EVs Lithium-Ion batteries. Procedia CIRP 90, 73–78. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2020.01.090>.
- Harper, G., Sommerville, R., Kendrick, E., Driscoll, L., Slater, P., Stolkin, R., Walton, A., Christensen, P., Heidrich, O., Lambert, S., Abbott, A., Ryder, K., Gaines, L., Anderson, P., 2019. Recycling lithium-ion batteries from electric vehicles. Nature 575, 75–86. <https://doi.org/10.1038/s41586-019-1682-5>.
- Larouche, François, et al. Progress and status of hydrometallurgical and direct recycling of Li-ion batteries and beyond. Materials, 2020, 13.3: 801.
- Lv, W., et al., (2018). A sustainable process for metal recycling from spent lithium-ion batteries using ammonium chloride. Waste management, 79, 545-553.
- M. Bini et al., 2014 “Rechargeable lithium batteries: key scientific and technological challenges”
- M. Wentker, M. Greenwood, e J. Leker, «A Bottom-Up Approach to Lithium-Ion Battery Cost Modeling with a Focus on Cathode Active Materials», Energies, vol. 12, n. 3, pag. 504, feb. 2019, doi: 10.3390/en12030504

Fonti (2/2)

- Makuza, B., Tian, Q., Guo, X., Chattopadhyay, K., Yu, D., 2021. Pyrometallurgical options for recycling spent lithium-ion batteries: A comprehensive review. Journal of Power Sources 491, 229622. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2021.229622>.
- Mossali, E., Picone, N., Gentilini, L., Rodríguez, O., Pérez, J.M., Colledani, M., 2020. Lithium-ion batteries towards circular economy: A literature review of opportunities and issues of recycling treatments. Journal of Environmental Management 264, 110500. <https://doi.org/10.1016/j.jenvman.2020.110500>
- Proposal for a Regulation of the European parliament and of the council concerning batteries and waste batteries
- Q. Dai, J. C. Kelly, J. B. Dunn, e Benavides, «Update of Bill-of-materials and Cathode Materials Production for Lithium-ion Batteries in the GREET Model». 2018
- Xin Su et alter, Advanced Energy Materials, 2014 "Silicon-Based Nanomaterials for Lithium-Ion Batteries: A Review" . "Lithium metal anodes for rechargeable batteries", Wu Xu et alter, Royal Society of Chemistry, 2014"
- Sun, L., Qiu, K., 2011. Vacuum pyrolysis and hydrometallurgical process for the recovery of valuable metals from spent lithium-ion batteries. Journal of Hazardous Materials 194, 378–384. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2011.07.114>.
- Winslow, K. M., et al., (2018). A review on the growing concern and potential management strategies of waste lithium-ion batteries. Resources, Conservation and Recycling, 129, 263-27
- Wu Xu et alter, Royal Society of Chemistry, 2014 "Lithium metal anodes for rechargeable batteries"
- Xin Su et alter, Advanced Energy Materials, 2014 "Silicon-Based Nanomaterials for Lithium-Ion Batteries: A Review"
- Zhang, T., He, Y., Ge, L., Fu, R., Zhang, X., Huang, Y., 2013. Characteristics of wet and dry crushing methods in the recycling process of spent lithium-ion batteries. Journal of Power Sources 240, 766–771. <https://doi.org/10.1016/j.jpowsour.2013.05.009>.
- Zhao, Y., Pohl, O., Bhatt, A.I., Collis, G.E., Mahon, P.J., Rüther, T., Hollenkamp, A.F., 2021. A Review on Battery Market Trends, Second-Life Reuse, and Recycling. Sustainable Chemistry 2, 167–205. <https://doi.org/10.3390/suschem2010011>.
- Zhou, X., He, W., Li, G., Zhang, X., Zhu, S., Huang, J., Zhu, S., 2010. Recycling of Electrode Materials from Spent Lithium-Ion Batteries, in: 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering. Presented at the 2010 4th International Conference on Bioinformatics and Biomedical Engineering, pp. 1–4. <https://doi.org/10.1109/ICBBE.2010.5518015>.
- Immagini preselezione e disassemblaggio a livello modulo: concessione di POLLINI LORENZO E FIGLI S.R.L. – P.IVA 00696460989
- Immagini scarica: concessione di Barletta Apparecchi Scientifici Srl – P.IVA 09890900153

Grazie

