

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

***Relazione per la prova finale:  
« Life Cycle Assessment di Batterie al  
Litio Ferro-Fosfato »***

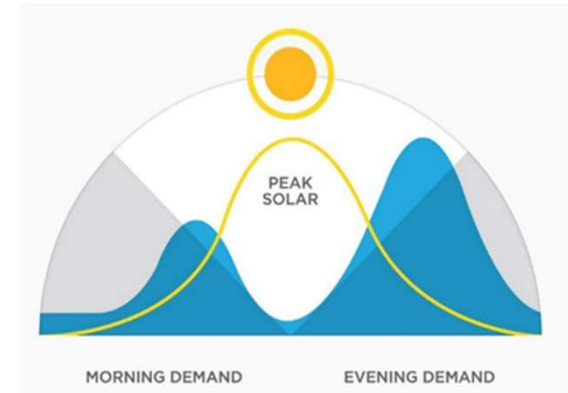
Tutor universitario: Prof. Sergio Rech

Laureando: *Matteo Graziussi*

Padova, 13/07/2023

L'energia elettrica prodotta da fonti rinnovabili, per sua natura, **non è sempre disponibile** nel momento in cui deve essere consumata. I **sistemi di accumulo** sono quindi necessari per soddisfare le esigenze di consumo e rendere più conveniente la transizione energetica.

- Batterie di veicoli elettrici
- Sistemi di accumulo stazionari (es. fotovoltaico)



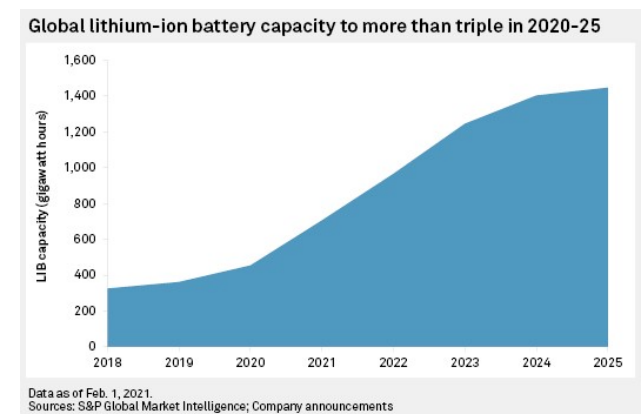
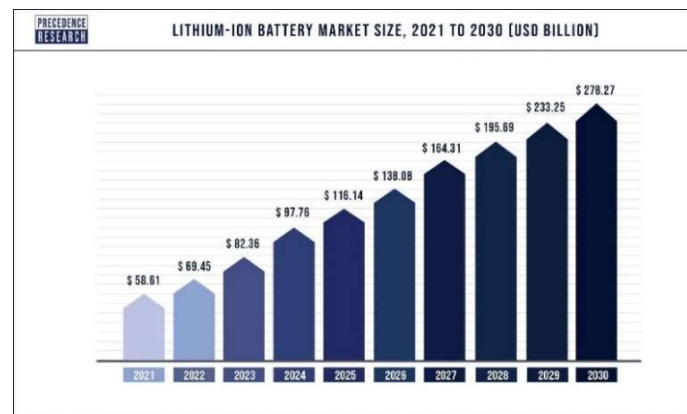
**DATI E PREVISIONI:**

**Mercato** delle batterie al litio:

- 2022 ≈ 70 Mld \$
- 2030 ≈ 280 Mld \$

**Capacità** globale installata:

- 2018 ≈ 290 GWh
- 2028 ≈ 2 TWh



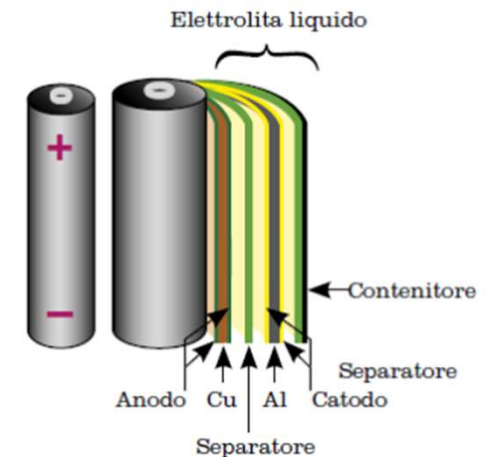
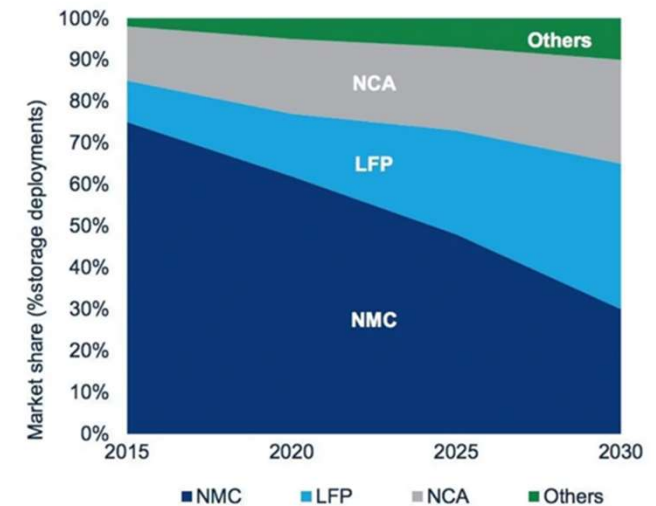
Le batterie al litio ferro fosfato ( $\text{LiFePO}_4$  / **LFP**) sono una delle tipologie più diffuse di batterie al litio, poiché soddisfano le esigenze specifiche del settore industriale.

- Sicurezza e stabilità termica
- Densità energetica
- Vita utile

2015	10%	
2023	<b>20%</b>	
2030	40 %	<i>capacità batterie LFP rispetto al tot. Li-Ion</i>

Una batteria LFP è composta dal **catodo** ( $\text{LiFePO}_4$ ), l'**anodo** (grafite), il **separator** (materiale polimerico) e l'**elettrolita** (sali di litio, liquido). Nelle celle cilindriche, più diffuse, sono disposti in strati concentrici.

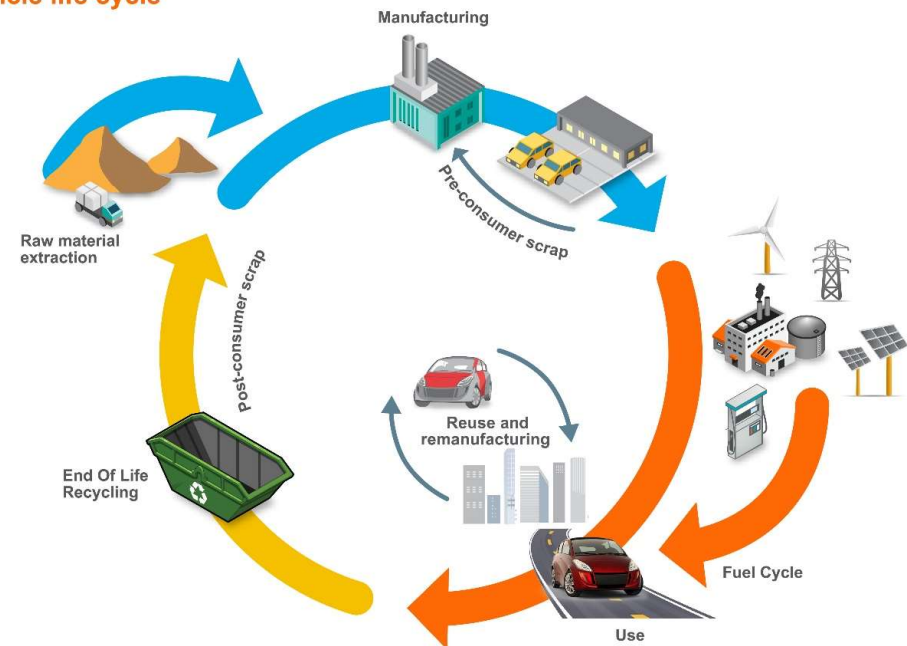
I **collettori di corrente** sono composti di rame sull'anodo e di alluminio sul catodo, mentre la **scozza** è normalmente in alluminio.



L'obiettivo di questa tesi è valutare, tramite il **Life Cycle Assessment (LCA)**, l'**impatto ambientale** delle batterie LFP durante in loro **intero ciclo di vita** dalla produzione allo smaltimento, individuando i passaggi più critici e confrontando tre diverse possibilità di **recupero** e **riciclo**:

- Riutilizzo Echelon-Use
- Recupero IdroMetallurgico
- Recupero MultiComponente

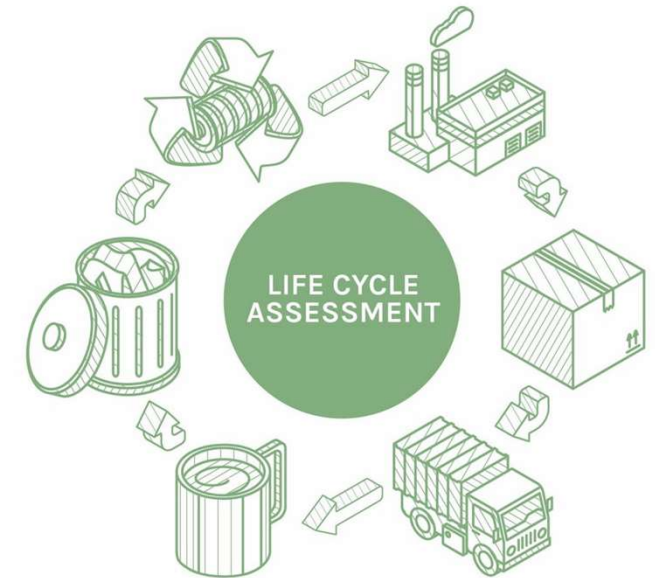
**Vehicle life cycle**

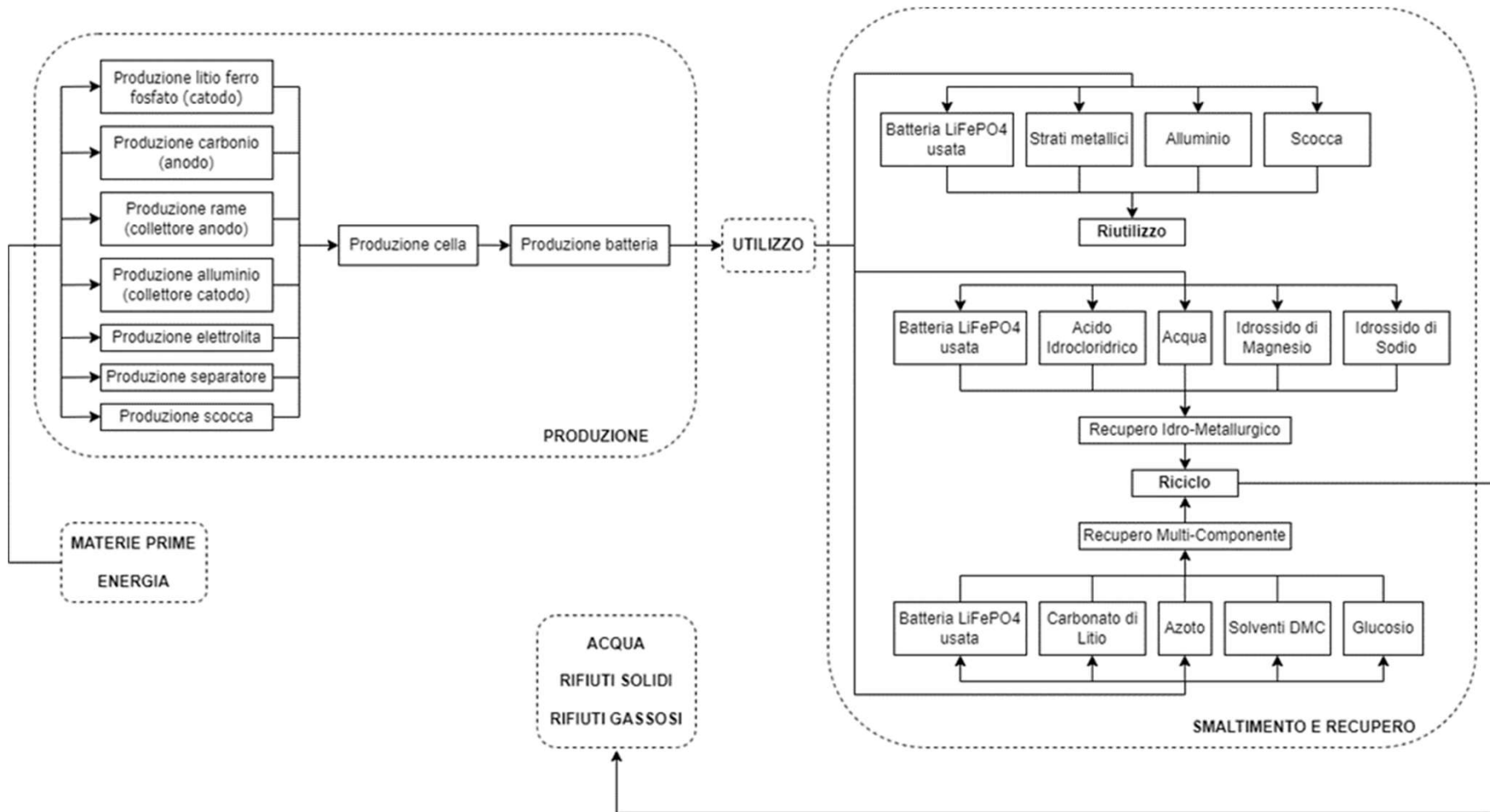


Processo iterativo, standardizzato dalle norme **ISO.14040** e **ISO.14044**, che comprende 4 fasi:

- Definizione dell'obiettivo e del campo di applicazione  
confini del sistema, unità funzionale, ipotesi e parametri dello studio
- Analisi di inventario (Life Cycle Inventory, LCI)  
flussi IN/OUT di risorse, beni, servizi, rifiuti ed emissioni
- Valutazione degli impatti (Life Cycle Impact Assessment, LCIA)  
classificazione delle categorie di impatto e degli indicatori di impatto
- Interpretazione  
identificazione dei punti critici e valutazione dei risultati

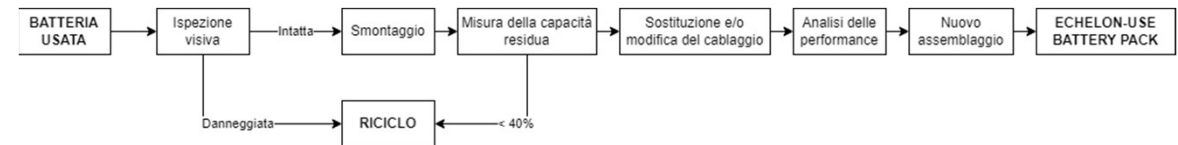
In questa tesi, gli indicatori di impatto sono stati selezionati tra quelli previsti dal metodo **IMPACT2002+**, che combina a sua volta altri metodi LCA.





## Riutilizzo ECHELON-USE:

Ritiro a fine vita delle batterie dai veicoli elettrici (alte prestazioni) per inserirle in sistemi di accumulo stazionari.



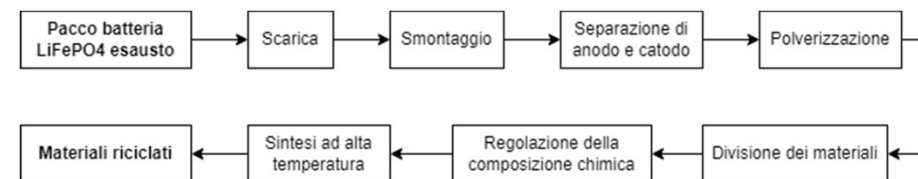
## Recupero IDRO-METALLURGICO:

Le batterie esauste vengono smontate, gli elettrodi smantellati, si ricava cloruro di litio (LiCl).



## Recupero MULTI-COMPONENTE:

Le batterie esauste vengono smontate, anodo e catodo vengono smantellati e polverizzati. E' possibile recuperare tutti i componenti che componevano la batteria originale.



		ER (kg eq PM2,5)	AC (kg eq SO2)	EU (kg eq PO4 3-)	GWP (kg eq CO2)	ENR (MJ)
<b>Fase di produzione</b>		0,318	2,29	0,0899	107	143000
<b>Fase di utilizzo</b>		0,195	0,668	0,041	126	168000
<b>Fase di recupero</b>	Riutilizzo Echelon-use	-0,304	-2,2	-0,0861	-101	-137000
	Recupero idro-metallurgico	0,00479	-0,00311	-0,00138	2,9	29,4
	Recupero multicomponente	-0,211	-1,84	-0,0611	-46,2	-564
<b>LCA totale</b>	Riutilizzo Echelon-use	0,209	0,757	0,0479	132	176000
	Recupero idro-metallurgico	0,518	2,95	0,133	236	316000
	Recupero multicomponente	0,303	1,11	0,0729	187	257000
<b>Variazione LCA tramite recupero a fine vita</b>	Riutilizzo Echelon-use	-59,26%	-75,80%	-65,76%	-43,35%	-44,05%
	Recupero idro-metallurgico	0,93%	-0,12%	-1,05%	1,24%	0,01%
	Recupero multicomponente	-41,13%	-62,20%	-46,68%	-19,83%	-0,18%



Tesla Model Y (Standard Range): batteria LFP da 55kWh

GWP = 12815 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>

con recupero echelon-use: GWP = 7260 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub> **- 43,3%**



La produzione di energia elettrica in Italia ha un GWP pari a:

259,8 g<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub> / kWh (ISPRA, 2022)

227 g<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub> / kWh (Enel SPA, 2021) → ≈ 250 g<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub> / kWh

Percorrenza tot. 160000 km, autonomia con una carica 450km ≈ 0,122 kWh/km (ciclo WLTP)

→ 19520 kWh di energia da prelevare → 4880 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub> = GWP energia elettrica totale immagazzinata

### CONFRONTO

Ford Kuga 1.5 EcoBoost: emissioni dichiarate 149 g<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>/km (ciclo WLTP)

Percorrenza tot. 160000 km → 23840 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub> = GWP a parità di km percorsi

**(quasi 5 volte superiori)**

Risultati simili ottenuti dal Joint Research Center (EU):

-75% emissioni di CO<sub>2</sub> di un EV

*Comparative life cycle assessment of lithium-ion battery chemistries for residential storage, Journal of Energy Storage, Volume 28, April 2020, 101230*

217 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>/kWh LCA “cradle to grave”, senza recupero a fine vita

233 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>/kWh Tab. 19, GWP produzione + utilizzo

*Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling processes, Mohr m., Journal of Industrial Ecology, Volume 25, Issue 2*

90-100 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>/kWh LCA considerando vari metodi di recupero

132 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>/kWh Tab. 19, GWP con riutilizzo echelon-use

*The environmental impact of Li-Ion batteries and the role of key parameters – A review, Jens F. et. al., Renewable and Sustainable Energy Reviews, Volume 67, January 2017*

110 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>/kWh LCA focalizzato sul processo di produzione

107 kg<sub>eq</sub>CO<sub>2</sub>/kWh Tab. 19, GWP produzione

ALTRI STUDI

QUESTA TESI



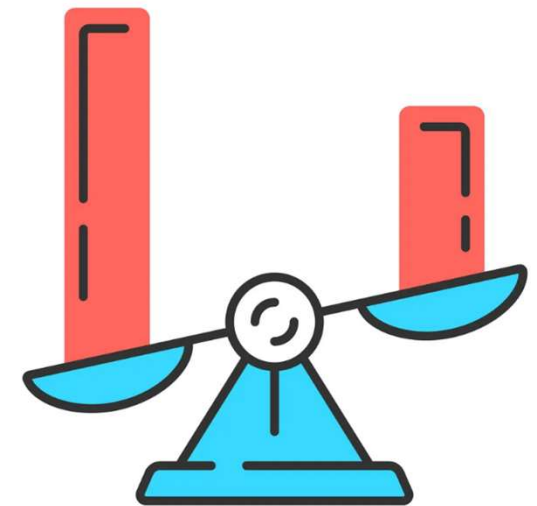
**Riutilizzo echelon-use:** impatto ambientale minore, permette di abbattere quasi totalmente l'impatto nella produzione di nuove batterie

- 96% GWP di nuove batterie

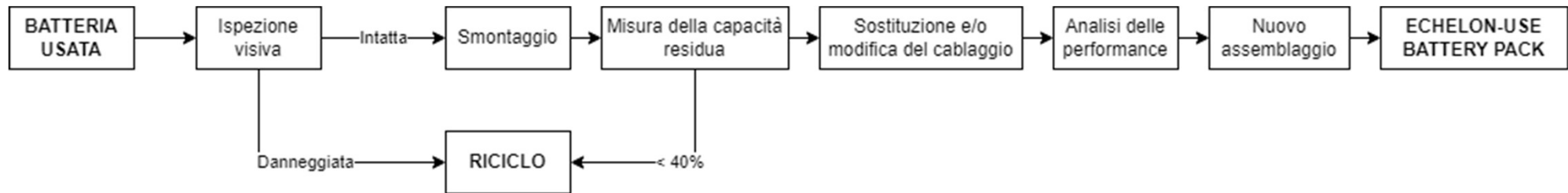
**Recupero multicomponente:** impatti ambientali maggiori, permette una riduzione significativa dei medesimi impatti nella produzione di nuove batterie

- 78,9% ERN - 91,17% AC

**Recupero idro-metallurgico:** impatto ambientale relativamente ridotto ( $\approx$  riutilizzo echelon-use). Riduzione dell'impatto ambientale nella produzione di nuove batterie trascurabile



Possibile processo standardizzato per il recupero a fine vita:



Il **riutilizzo echelon-use** può essere adottato come processo per **allungare** la **vita utile** delle batterie al litio ferro fosfato (applicabile anche ad altre tipologie di batterie al litio) e ridurre la produzione di nuovi esemplari, per poi **concludere** il suo **ciclo di vita** tramite uno dei metodi di **riciclo** analizzati.