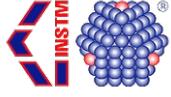


## CAMEL - new Carbothermic approaches to Recovery critical METals from spent Lithium-ion batteries






**Tech4Lib**  
Spent lithium-ion battery recovery

<https://tech4lib.unibs.it>  
<https://caramel.unibs.it>

**Antonella Cornelio**  
[antonella.cornelio@unibs.it](mailto:antonella.cornelio@unibs.it)



Ministero dell'Università e della Ricerca



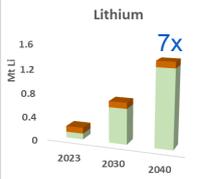
1

## Go electric!

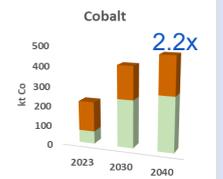


### Aumento della domanda entro il 2040, rispetto al 2023

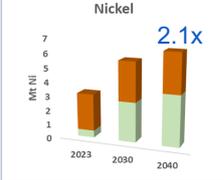
**Lithium**



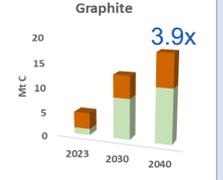
**Cobalt**



**Nickel**



**Graphite**



Data source: IEA 2024

Elementi chiave per la produzione di veicoli elettrici e sistemi di accumulo di energia.

⚠ Inclusi nella lista delle materie prime critiche a rischio di esaurimento entro il 2030.



**Global lithium resources**



**53% Triangolo del litio**

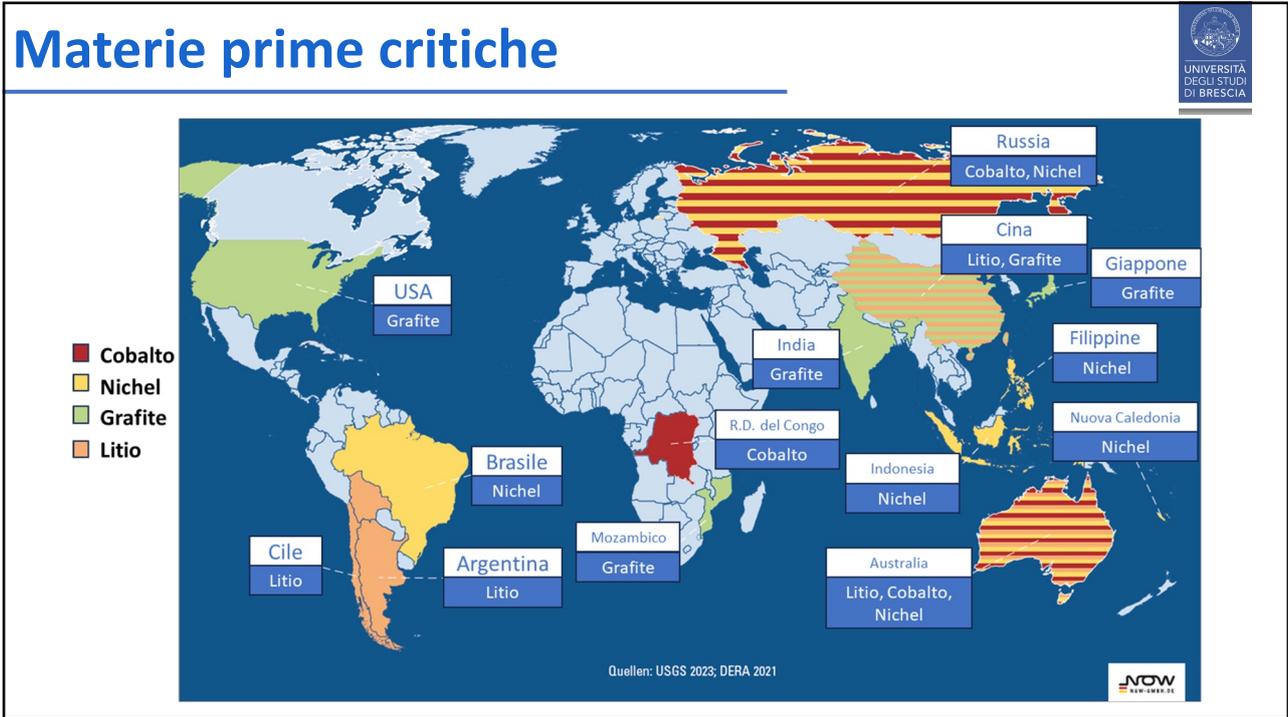


**Problemi ambientali e sociali**

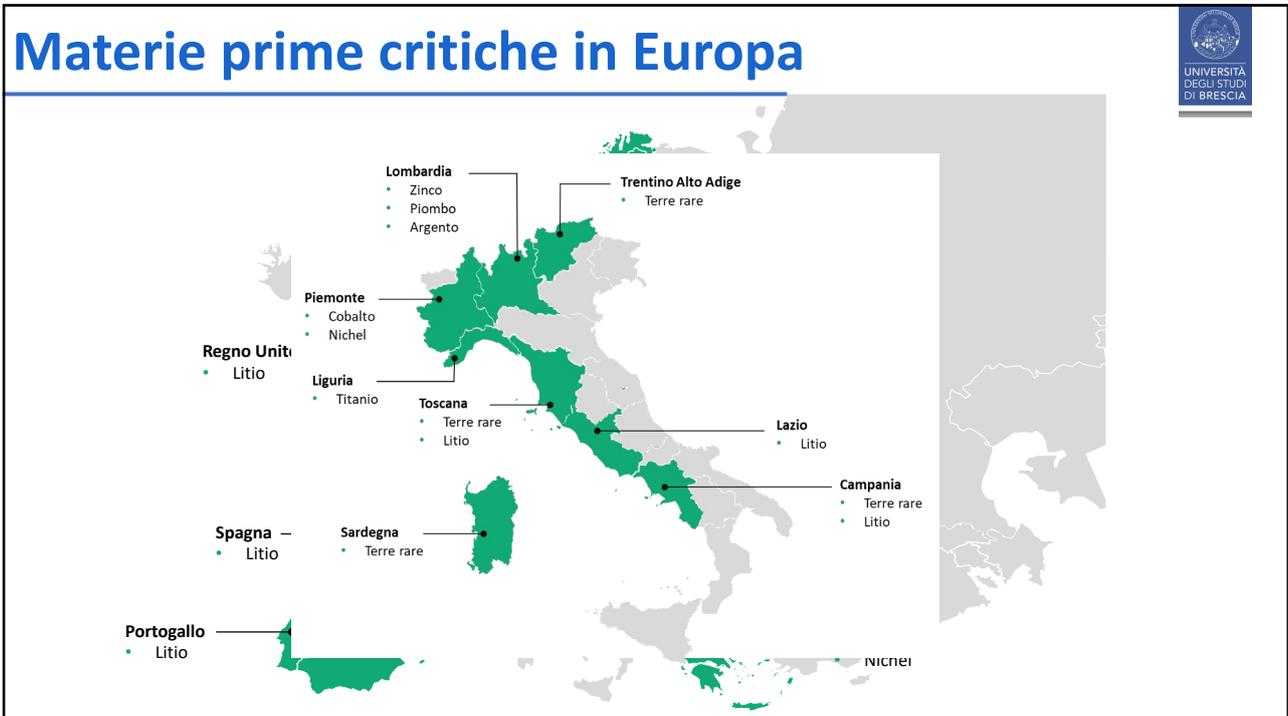


Sources: USGS, Environmental Yale

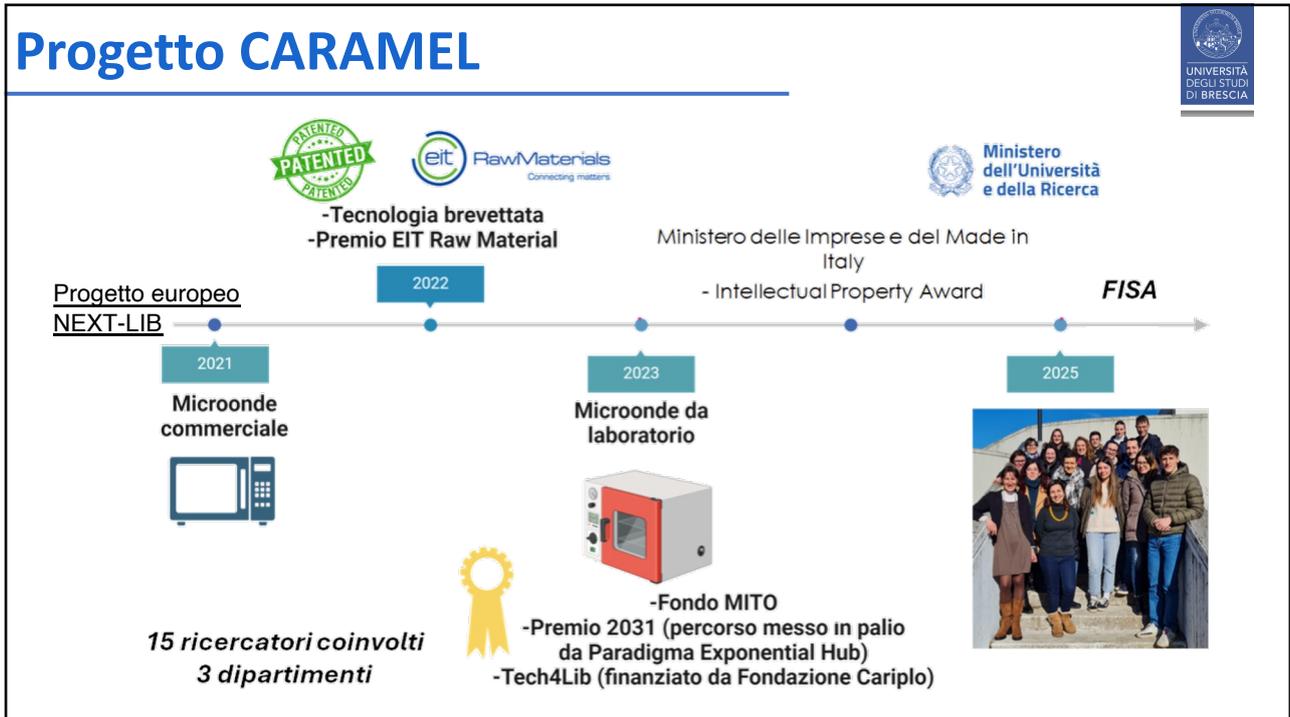
2



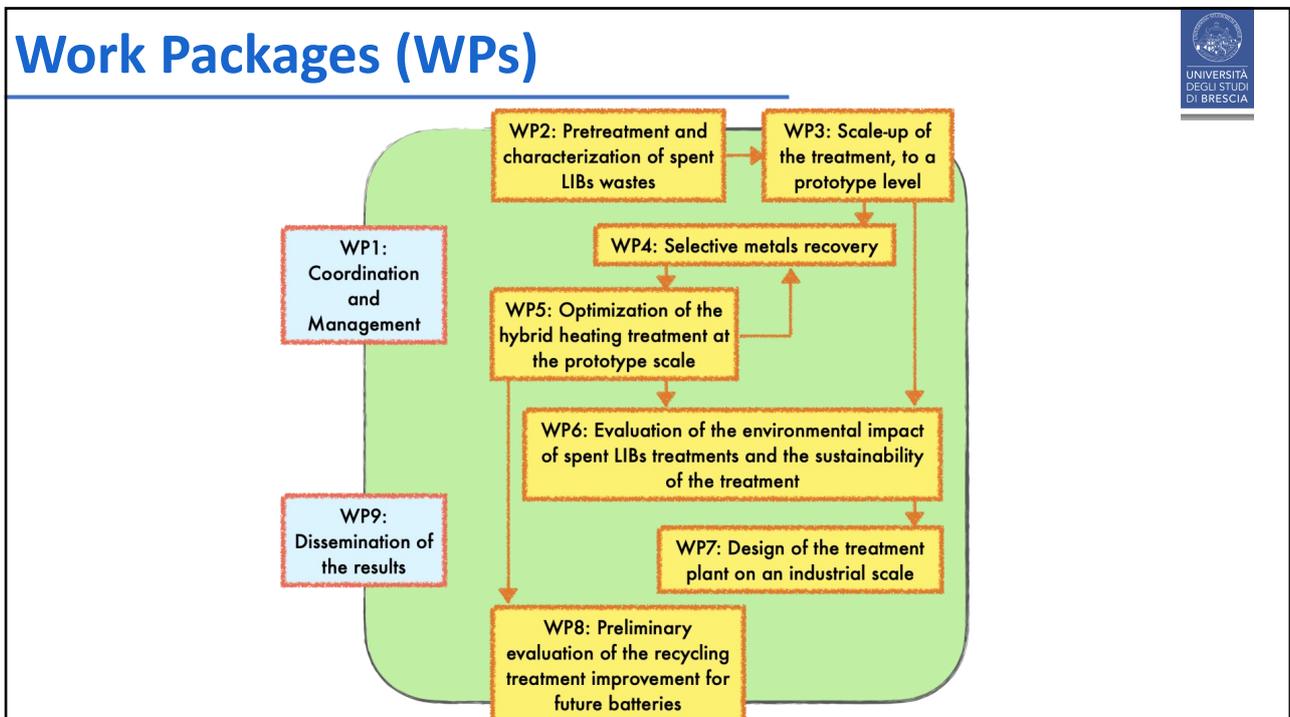
3



4



5



6



7

## Tecnologie circolari e sostenibili: innovazione per il futuro delle batterie e il recupero delle materie prime

Brescia, 25 febbraio 2025

### Le iniziative di Regione Lombardia per il riciclo di materie prime critiche da batterie ed altri rifiuti

[www.regione.lombardia.it](http://www.regione.lombardia.it)



8

## Cosa può fare Regione?

- Regione ha la competenza per l'**autorizzazione** di impianti sperimentali o innovativi di trattamento rifiuti
- Supporto e linee guida per l'**end of waste**
- Favorire la **raccolta** di batterie e RAEE
- **Finanziamenti**



9

## PR FESR 2021-2027 - Adesione alla piattaforma STEP

Il 1° marzo 2024 è entrato in vigore il Regolamento (UE) 2024/795 che istituisce la Piattaforma per le Tecnologie Strategiche per l'Europa, di seguito «**Regolamento STEP**». L'obiettivo della [Piattaforma STEP](#) è sostenere lo **sviluppo o fabbricazione di tecnologie critiche** in tutta l'Unione o **salvaguardare e rafforzare le rispettive catene del valore** al fine di **ridurre le dipendenze strategiche dell'Unione e preservare l'integrità del mercato interno**.

La piattaforma STEP consente la **riprogrammazione del 6%** della dotazione del PR FESR 2021-27 (2,0 mld€) con l'obiettivo di istituire **2 nuovi Assi** nel PR (Asse VI e Asse VII), per un valore complessivo di **120 mln€**, attingendo **su tutti gli Obiettivi Specifici del Programma**, da utilizzare nei seguenti ambiti:

Tecnologie digitali e innovazione delle tecnologie deep tech

Biotechologie (inclusi i medicinali critici)

Tecnologie pulite ed efficienti nell'uso delle risorse

Dgr n. 2740 del 15/07/24 - avviato l'iter di riprogrammazione del programma FESR 2021-27, per adesione STEP  
**Il 18/09/2024 la Commissione UE ha approvato la riprogrammazione di Regione Lombardia per STEP**



10

## PR FESR 2021-2027 - Regolamento STEP

### Articolo 2 - Obiettivi STEP

1. **Al fine di** garantire la sovranità e la sicurezza dell'Unione, **ridurre le dipendenze strategiche dell'Unione in settori strategici**, potenziare la competitività dell'Unione rafforzando la sua resilienza e produttività attraverso la mobilitazione di finanziamenti, favorire condizioni di parità nel mercato interno, promuovere la partecipazione transfrontaliera, anche delle PMI, rafforzare la coesione economica, sociale e territoriale e la solidarietà tra gli Stati membri e le regioni, nonché promuovere un accesso inclusivo a posti di lavoro attraenti e di qualità investendo nelle competenze del futuro e adattando la sua base economica, industriale e tecnologica alle transizioni verde e digitale, **la STEP persegue gli obiettivi seguenti: a) sostenere lo sviluppo o la fabbricazione di tecnologie critiche in tutta l'Unione, o salvaguardare e rafforzare le rispettive catene del valore** di cui al paragrafo 3, **nei settori seguenti:** i) le tecnologie digitali, incluse quelle che contribuiscono ai traguardi e agli obiettivi del programma strategico per il decennio digitale 2030, i progetti multinazionali, quali definiti all'articolo 2, punto 2), della decisione (UE) 2022/2481, e l'innovazione delle tecnologie deep tech; ii) **le tecnologie pulite ed efficienti sotto il profilo delle risorse**, incluse le tecnologie a zero emissioni nette quali definite nel regolamento sull'industria a zero emissioni nette; iii) le biotecnologie, compresi i medicinali inclusi nell'elenco dell'Unione dei medicinali critici, e i loro componenti; (...)



11

## PR FESR 2021-2027 - Regolamento STEP

2. **Le tecnologie** di cui al paragrafo 1, lettera a), **sono considerate critiche se soddisfano almeno una delle condizioni seguenti:** a) apportano al mercato interno un elemento innovativo, emergente e all'avanguardia con un notevole potenziale economico; **b) contribuiscono a ridurre o a prevenire le dipendenze strategiche dell'Unione**



12

## Ipotesi di bando STEP – interventi ammissibili

Sviluppo o fabbricazione di tecnologie, relative a **RAEE (inclusi pannelli fotovoltaici) oppure a batterie ed accumulatori**, per:

- riprogettazione dei prodotti e tecniche di fabbricazione avanzate per facilitarne la riparazione, il riciclaggio o per sostituire una materia prima critica con un altro materiale o ridurre l'utilizzo (**ecodesign**);
- **preparazione per il riutilizzo e riutilizzo** di RAEE/AEE (inclusi pannelli fotovoltaici), batterie ed accumulatori;
- **pretrattamento** di RAEE (inclusi pannelli fotovoltaici), batterie ed accumulatori finalizzato al riciclaggio delle materie prime critiche;
- **riciclaggio** di RAEE (inclusi pannelli fotovoltaici), batterie ed accumulatori, incluso il riciclaggio delle materie prime critiche presenti;
- **riciclaggio di materie prime critiche presenti in rifiuti decadenti** dal trattamento di RAEE (inclusi pannelli fotovoltaici), batterie ed accumulatori (per es. "black mass", componenti rimossi da RAEE, etc...).



13

## Ipotesi di bando STEP – interventi ammissibili

Sviluppo o fabbricazione di tecnologie per:

- pretrattamento dei rifiuti contenenti fosforo finalizzati al recupero dello stesso (ad esclusione di incenerimento e trattamenti analoghi, quali pirolisi, gassificazione);
- recupero del fosforo da reflui, fanghi di depurazione, rifiuti organici, altri rifiuti contenenti fosforo o ceneri da incenerimento di tali rifiuti.

TRL  $\geq$  6



14

## Ipotesi di bando STEP

**Ipotesi bando a supporto dello sviluppo di «tecnologie che contribuiscono a ridurre o a prevenire le dipendenze strategiche dell'Unione», in particolare per le materie prime critiche, grazie all'economia circolare**

Dotazione finanziaria	€ 10.000.000,00
Chi può partecipare	PMI e grandi imprese
Caratteristiche dell'agevolazione	Fondo perduto Intensità aiuto: 40% grandi imprese, 50% PMI Importo spese ammissibili minimo: 500.000 € Importo contributo massimo: 7.500.000 €
Regime aiuti di Stato	Regime «de minimis» (max € 300.000) oppure, a scelta del richiedente GBER (Reg UE n.651/2014, art. 47) con scenario controfattuale
Tempi di realizzazione	30 mesi



15

## Ipotesi di bando STEP – spese ammissibili

Spese ammissibili:

- acquisto e installazione di **beni strumentali, macchinari, sistemi di automazione e tecnologie adattive, impianti di produzione, attrezzature e arredi**, necessari per il conseguimento delle finalità progettuali; revamping dei macchinari esistenti. Le spese devono riguardare esclusivamente beni durevoli, non di consumo e strettamente funzionali all'attività svolta. È ammesso anche l'acquisto di beni e attrezzature usati. L'importo di questa voce a) deve rappresentare **almeno il 30% del totale delle spese ammissibili** di progetto;
- acquisto di **hardware** (sono escluse le spese per smartphone, tablet e cellulari) purché strettamente connessi al progetto. È ammesso anche l'acquisto di beni e attrezzature usati;
- acquisto di **software** gestionali, licenze d'uso e servizi software di tipo cloud e SaaS e simili, servizi di cibersecurity, nella misura massima del 5% delle spese ammissibili per il progetto;



16

## Ipotesi di bando STEP – spese ammissibili

- d) servizi di **consulenza specializzata** per la realizzazione del progetto, servizi di prova e sperimentazione, servizi per il controllo della qualità; spese per sviluppo, registrazione o acquisizione di marchi, brevetti, certificazioni di qualità, certificazioni tecniche ed eventuale registrazione REACH. Questa voce deve rispettare la **misura massima del 20% delle spese ammissibili** per il progetto;
- e) **opere edili-murarie e impiantistiche** e relative spese di progettazione e direzione lavori direttamente correlate e funzionali al progetto, nel **limite del 25% delle spese ammissibili** per il progetto;
- d) **spese generali** determinate con un **tasso forfettario pari al 7% delle spese ammissibili** di cui alle precedenti lettere a), b), c), d), e) conformemente all'articolo 54 lettera a) del Regolamento (UE) n. 1060/2021.



17

## Ipotesi di bando STEP – spese ammissibili

Tutte le **spese** devono essere **sostenute successivamente alla presentazione della domanda di partecipazione, fatte salve le spese riconducibili alla voce d)** e riferite a lavori preparatori, quali la richiesta di permessi o la realizzazione di studi di fattibilità, per la realizzazione del progetto **che possono essere sostenute anche a partire dal 16/01/2025**, data della pubblicazione della DGR n. 3765/2025 di approvazione della presente iniziativa (BURL S.O. n. 3 del 16/01/2025).



18

## Ipotesi di bando STEP – criteri di valutazione

Descrizione dell'intervento oggetto di contributo
Contenuti tecnico-scientifici a supporto del progetto
Capacità di riduzione degli impatti ambientali dei processi (emissioni inquinanti e climalteranti, consumi di acqua o energia)
Livello di innovatività
Coerenza dei tempi di realizzazione, incluse le tempistiche per ottenere le necessarie autorizzazioni
Replicabilità
Scalabilità
Capacità di riduzione o prevenzione delle dipendenze strategiche dell'Unione
Capacità del progetto di combinare tecnologie deep tech, tecnologie pulite ed efficienti sotto il profilo delle risorse e biotecnologie
Grado di coinvolgimento di PMI nella filiera
Quantificazione dei risultati attesi in termini di aumento del riciclaggio di rifiuti contenenti materie prime critiche o di riduzione dell'utilizzo di materie prime critiche.

19

## Ipotesi di bando STEP – criteri di premialità

Partecipazione dell'impresa ad accordi con enti di ricerca in ambiti inerenti al progetto
Presenza di studi quantitativi per valutare e gestire le performance ambientali e l'utilizzo di energia e materia nel ciclo di vita dell'intervento, ad esempio Life Cycle Assessment (LCA), Product Environmental Footprint (PEF), carbon footprint, ecc. a supporto del progetto
Presenza di certificazioni riferite all'organizzazione ed ai siti produttivi ottenute mediante l'accreditamento ISO 14001, ISO 50001 e/o la registrazione EMAS
Soggetto proponente nella forma di start up innovativa e/o PMI innovativa
Rilevanza della componente femminile nel team di progetto consistente nella presenza di almeno il 30% di lavoratori di sesso femminile nel team di progetto
Rilevanza della componente giovanile nel team di progetto consistente nella presenza di almeno il 30% di lavoratori giovani (inferiore o pari a 35 anni alla data di presentazione della domanda) nel team di progetto

20

## Bando STEP – tempistiche

Cosa è stato fatto fino ad oggi:



21

## Bando STEP – tempistiche

Prossimi passi:



22

**Grazie per l'attenzione**  
[giorgio\\_gallina@regione.lombardia.it](mailto:giorgio_gallina@regione.lombardia.it)  
[bandi\\_economicircolare@regione.lombardia.it](mailto:bandi_economicircolare@regione.lombardia.it)

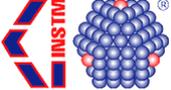
www.regione.lombardia.it

 **Sostenibilità**  
in Lombardia

 **Regione**  
Lombardia



23

**Tech4Lib: Economia circolare e innovazione per le Batterie agli Ioni di Litio (LIB)**

**Alessandra Zanoletti, Antonella Cornelio, Elisa Galli, Matteo Scaglia, Alessandro Bonometti, Ivano Alessandri, Elza Bontempi**  
**[alessandra.zanoletti@unibs.it](mailto:alessandra.zanoletti@unibs.it)**

**TECNOLOGIE CIRCOLARI E SOSTENIBILE: Innovazione per il futuro delle batterie e il recupero delle materie prime**

25 Febbraio 2025



24

### Estrazione Litio



**250 t**

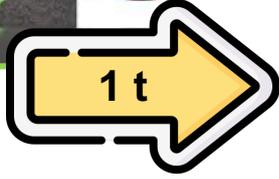
**256 batterie da EVs**



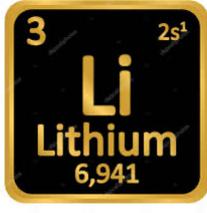
Considerando la crescita di EVs, le **riserve di Li** (~81Mt) che potrebbero durare alcuni secoli, dureranno solo **pochi decenni (40-50)**



**750 t**



**1 t**



**3** <sup>2s<sup>-1</sup></sup>  
**Li**  
**Lithium**  
6,941



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA

25

25

### Riciclaggio delle LIBs

Process	Advantages	Disadvantages	Challenge	
 <p><b>Hydrometallurgical process</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>High recovery rate</li> <li>High purity product</li> <li>Low energy consumption</li> <li>Less waste gas</li> <li>High Selectivity</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>More wastewater</li> <li>Long process</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Wastewater treatment</li> <li>Optimize the process</li> </ul>	 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> <p>Reagenti più comuni: acido nitrico, cloridrico, solforico oppure soda e ammoniaca.</p> </div>
 <p><b>Pyrometallurgical process</b></p>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Simple operation and short flow</li> <li>No requirement for categories and the size of inputs</li> <li>High efficiency</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Li and Mn are not recovered</li> <li>High energy consumption</li> <li>Low recovery efficiency</li> <li>More waste gas and the cost of waste gas treatment</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>Reduce energy consumption and pollution emissions</li> <li>Reduce environmental hazards</li> <li>Combine hydrometallurgy well</li> </ul>	 <div style="border: 1px solid black; padding: 5px; margin-top: 5px;"> <p>T (800-1300°C) → fusione metalli permettendone recupero come leghe (Cu, Co, Ni, Fe) poi raffinazione. Nella scoria: Li, Mn, Al, Si, Ca.</p> </div>



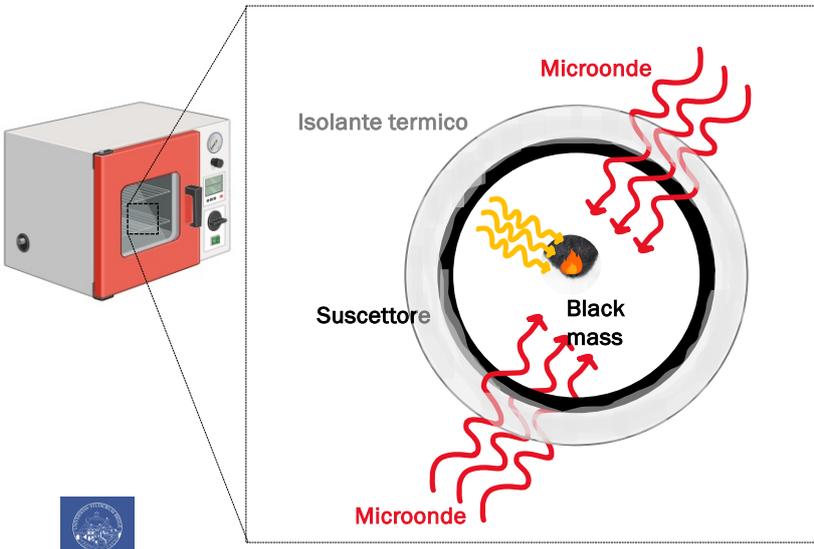
UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA

26

26



### Trattamento microonde



**PARAMETRI:**

- Potenza: max 1800 W
- Tempo
- Temperatura: max 1200 °C

- ✓ Rapida;
- ✓ Risparmio energetico;
- ✓ Facile da usare su scala di laboratorio;
- ✓ Aumenta l'efficacia di lisciviazione.



UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA

29

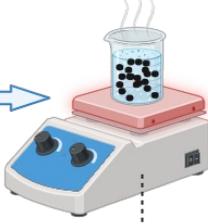
### Recupero di metalli

**Trattamento microonde**



- Potenza e tempo fissati
- Controllo temperatura

**Lisciviazione acqua**



- 40 g/L
- 80 °C
- 30 min
- 300 rpm

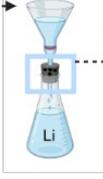
**Lisciviazione acido malico**



- 1.2 M acido malico
- H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1.5%)
- 40 g/L
- 80 °C
- 30 min
- 300 rpm

**Acido Malico** 

- ✓ Environmental friendly
- ✓ Riutilizzabile
- ✓ Economico
- ✓ Estrazione simultanea favorevole di metalli critici
- ✓ Buona alternativa agli acidi inorganici



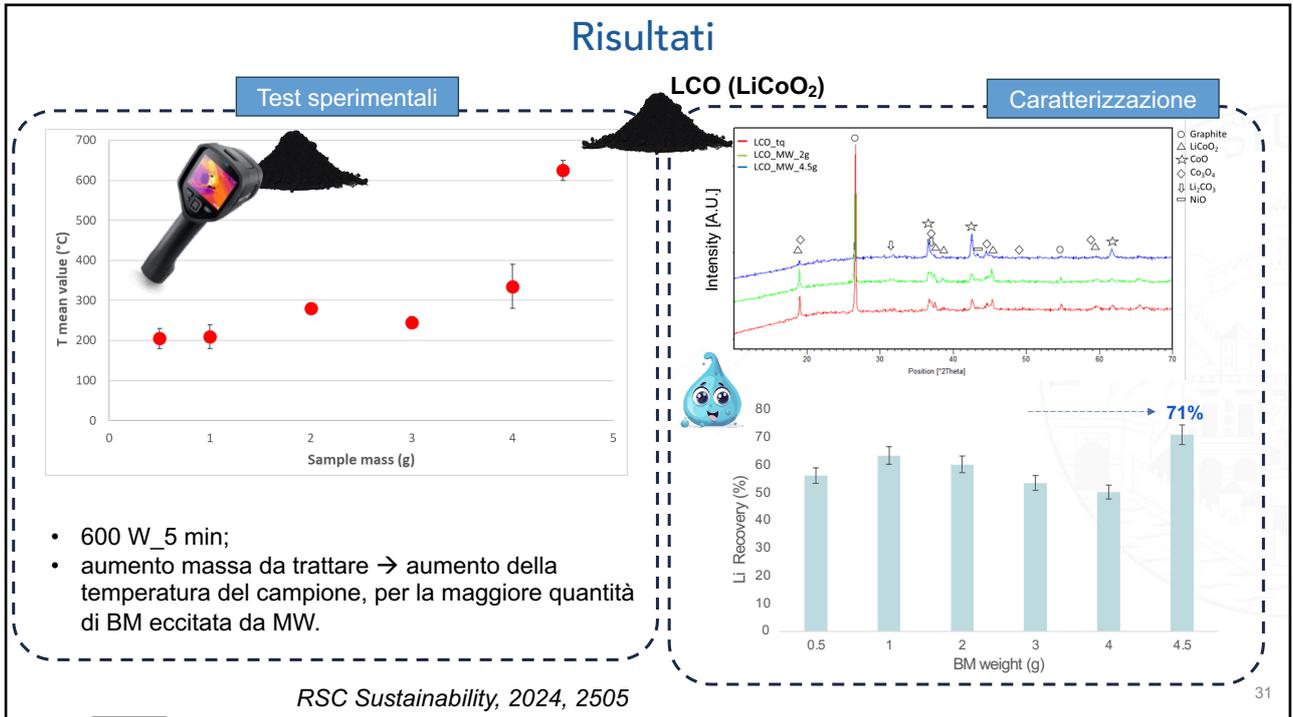
Li



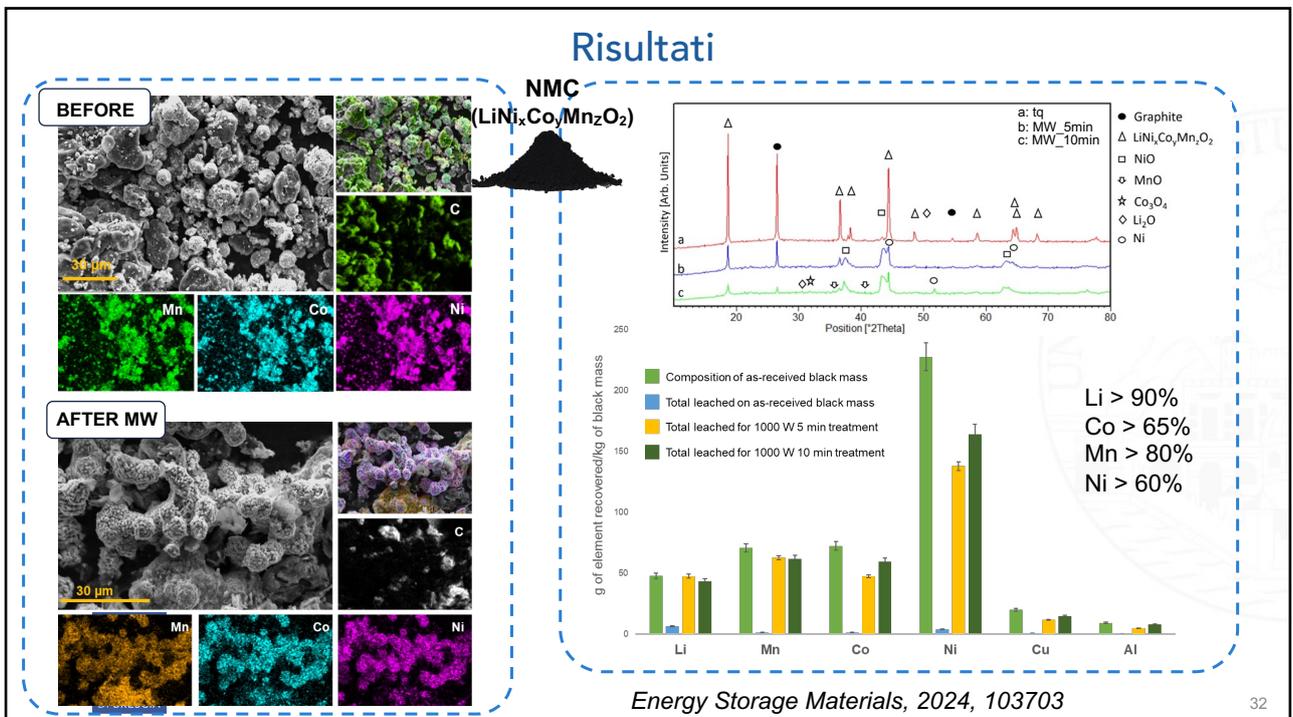
Co, Mn, Ni

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI BRESCIA

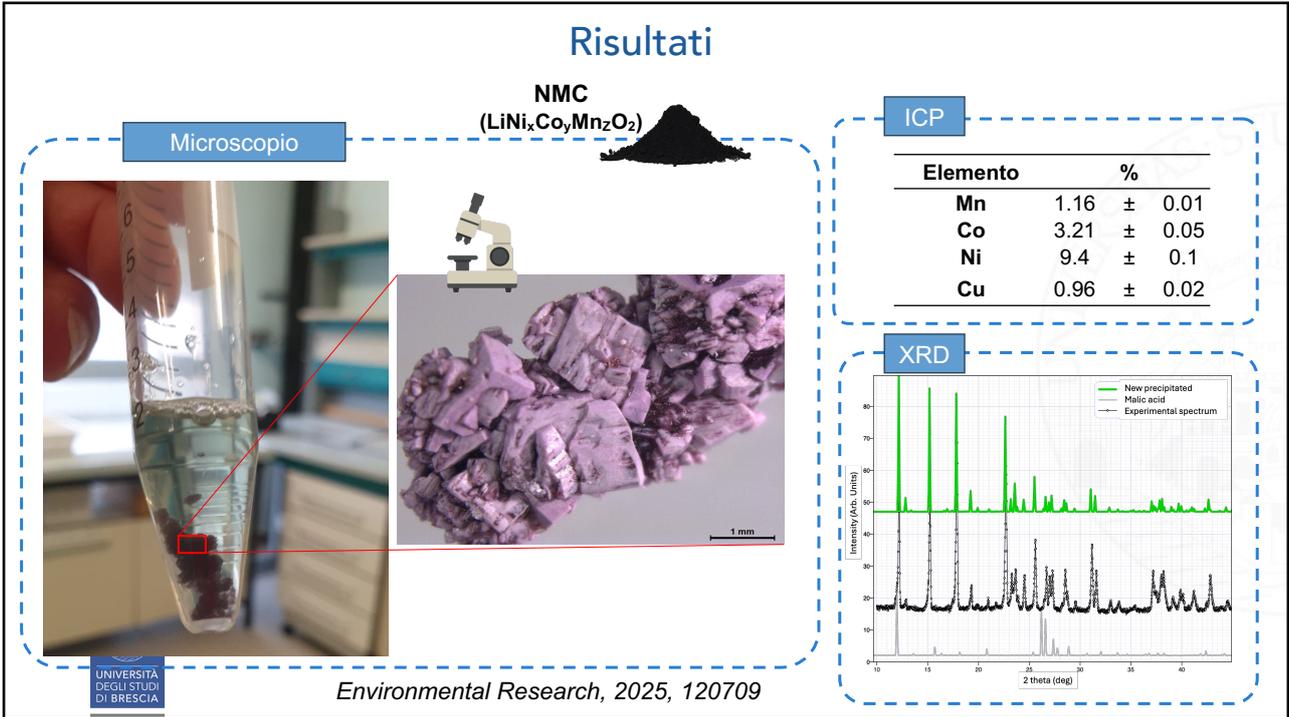
30



31



32



33



34

## Conclusioni

- La tecnologia proposta permette trattamenti minimi e quantità ridotte (vicino allo zero) di prodotti chimici commerciali;
- Il trattamento termico, basato su reazioni carbotermiche, avviene in tempi brevi rispetto ai metodi convenzionali;
- Li viene estratto in acqua;
- Il metodo è flessibile, quindi può essere adattato al trattamento di future batterie di diversa composizione chimica.

## Sviluppi Futuri

- Recupero parziale della grafite, ad esempio mediante flottazione;
- Valutazione delle emissioni durante trattamento termico a microonde;
- Produzione di acidi organici da scarti alimentari (INSTM);
- Analisi sostenibilità della tecnologia proposta (SSSA).

Work in Progress



35

35

## GRAZIE PER L'ATTENZIONE



36





UNIVERSITY OF BRESCIA





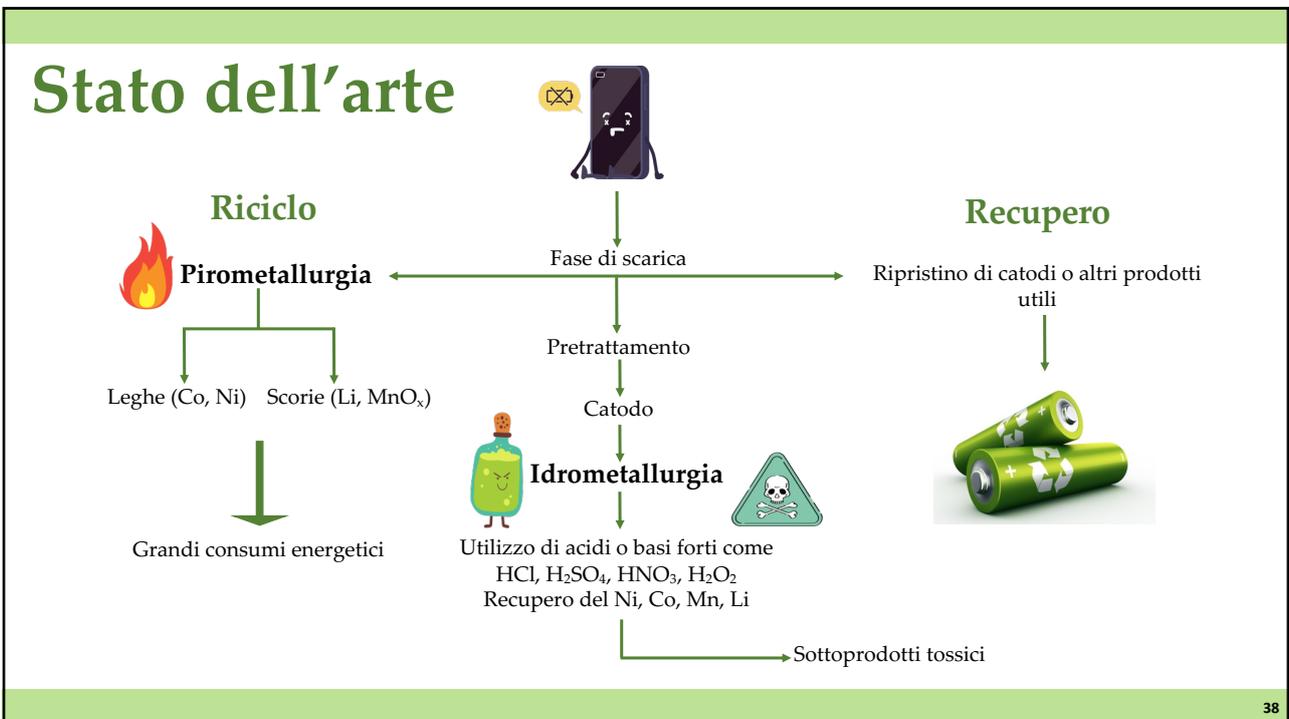
Sant'Anna  
Scuola Universitaria Superiore Pisa

# Processi avanzati per il recupero dei metalli con acidi

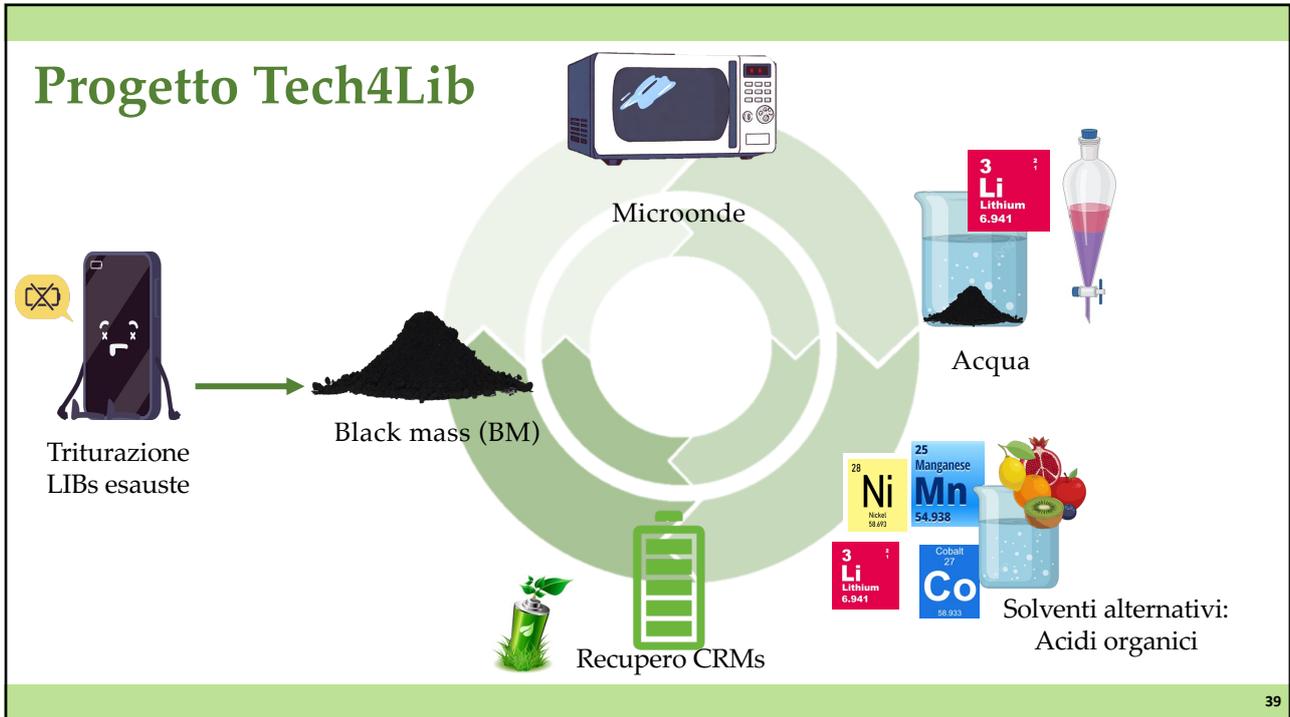
Elisa Galli, Alessandra Zanoletti, Antonella Cornelio, Matteo Scaglia, Alessandro Bonometti, Ivano Alessandri, Irene Vassalini, Elza Bontempi.

elisa.galli@unibs.it

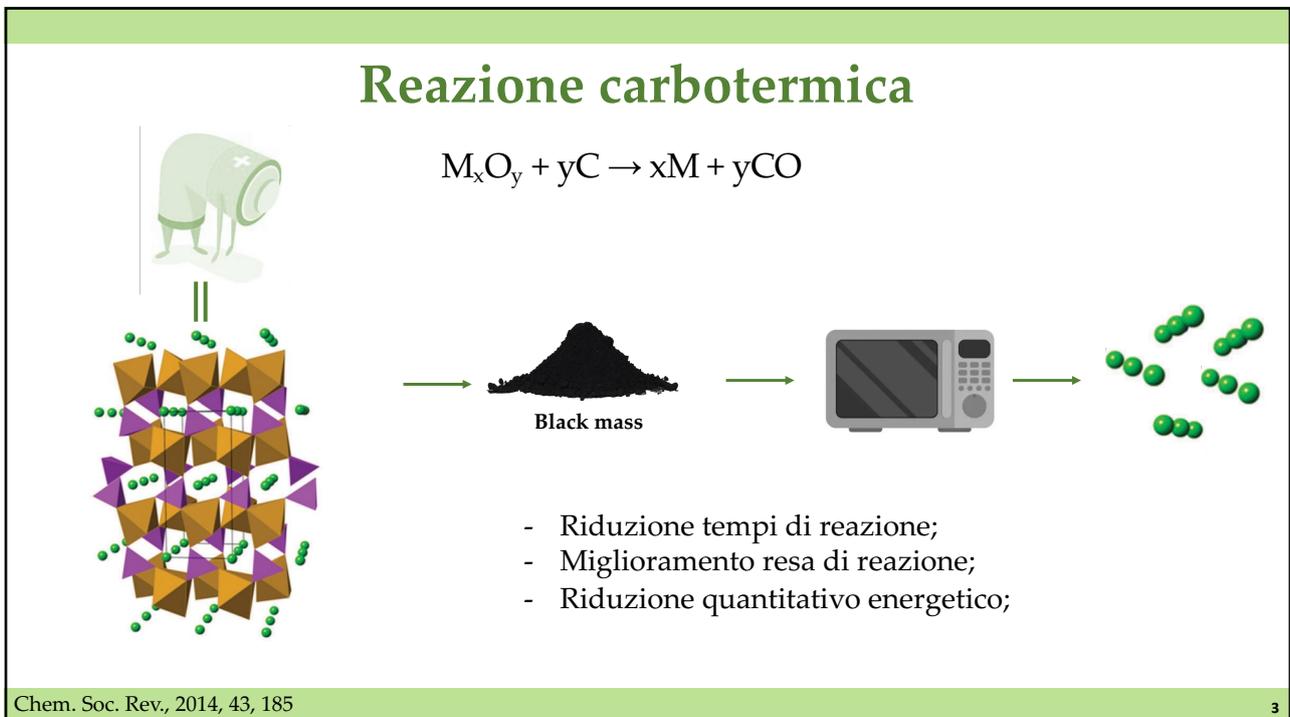
37



38



39



40

## Eccesso di sprechi alimentari



Significative emissioni di gas serra



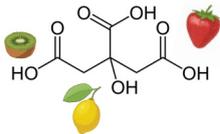
Spreco di risorse: acqua, terra, energia



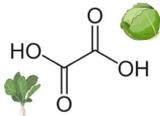
Costi elevati

La Food and Agriculture Organization (FAO) delle Nazioni Unite stima che circa 1.3 miliardi di tonnellate di cibo vengono sprecate ogni anno a livello globale

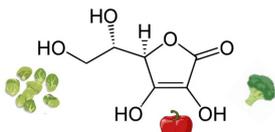
## Acidi organici a partire da scarti alimentari



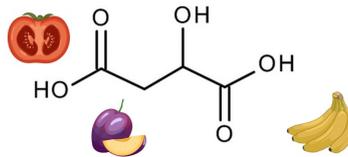
Acido citrico



Acido ossalico



Acido ascorbico



Acido malico



40 g/L, 80°C, 30 min,  
300 rpm  
1.2 M Acido Malico  
H<sub>2</sub>O<sub>2</sub> (1.5%)

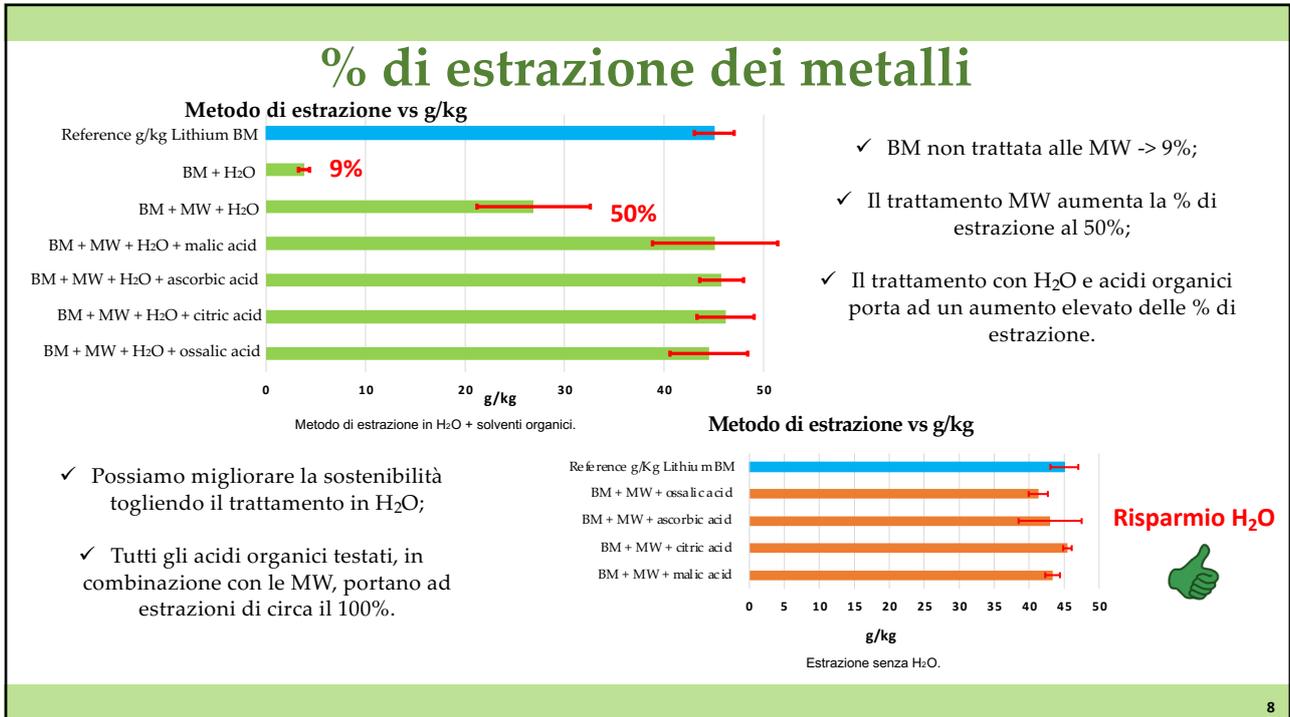




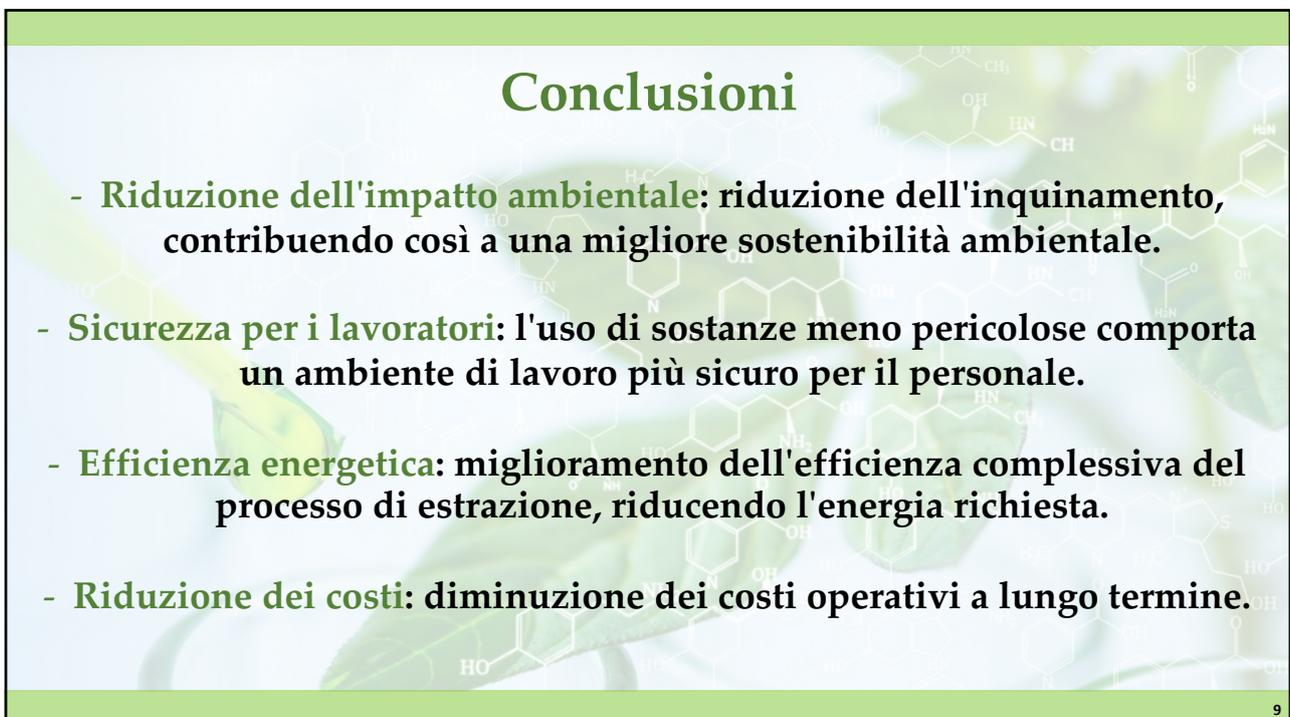
43



44



45



46

**Grazie per l'attenzione**




**Tech4Lib**  
Spent lithium-ion battery recovery!

**4EMTEC**

47

47



**Ex-ante Life Cycle Assessment della tecnologia Tech4Lib:  
analisi dei risultati preliminari e prospettive di sviluppo**

*Federico Rossi\**, *Marta Fundoni\*\**, *Nicola Fabbri\*\**, *Filippo Corsini\**, *Monia Niero\**, *Fabio Iraldo\*\**

\* *Sant'Anna School of Advanced Studies, Interdisciplinary Center for Sustainability and Climate, via Santa Cecilia n.24, 56127 Pisa, Italy*  
 \*\* *Sant'Anna School of Advanced Studies, Institute of Management, Piazza Martiri della Libertà, n. 33, 56127 Pisa, Italy*

Brescia, 25/02/2025



48

## La black mass, prodotto intermedio





Steel shell



Separator plastic



Black mass

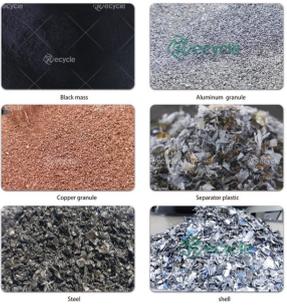


Aluminum granule



Copper granule

[Lithium Ion Battery Recycling - How to Separate the Black Mass](#)



[Recycle Black Mass from Spent Lithium Ion Batteries | New Battery Recycle Plant](#)



49

## Life Cycle Assessment (LCA)

**LCA:** Metodologia per il calcolo dell'impronta ambientale di prodotti, **processi**, e servizi considerandone l'intero ciclo di vita.

**Ex-ante LCA:** Per confrontare le tecnologie consolidate con tecnologie emergenti, è necessario valutare le prestazioni ambientali che queste ultime su scala industriale.

**1. Definizione obiettivo e campo di applicazione:**

- Valutare da un punto di vista ambientale la potenziale competitività futura della tecnologia sviluppata in Tech4LIB.

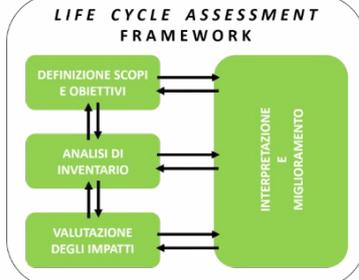
**2. Analisi di inventario**

- Dati primari del processo di laboratorio
- Dati secondari da letteratura per modellare lo scale-up (Piccinno et al., 2016) e possibili tecnologie alternative (Mohr et al. 2020)
- Dati di background da ecoinvent 3.9.1.

**3. Valutazione degli impatti**

Metodo Environmental Footprint 3.1 (EF3.1), raccomandato dalla Commissione Europea. Basato su 16 categorie di impatto.





Piccinno, F., Hirschier, R., Seeger, S., Som, C., 2016. From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies. J Clean Prod 135, 1085–1097. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.164>  
 Mohr, M., Peters, J., Baumann, M., Weil, M., 2020. Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling process. <https://doi.org/10.1111/jiec.13021>

50

## Life Cycle Assessment (LCA)

**Confini del sistema:**  
Dal cancello alla tomba (from gate to cradle)

**Metodo di allocazione degli impatti:**  
Cut-off: materie prime riciclate non hanno impatto sull'ambiente.

**Dati primari:**  
Potenza forno  
Materiali forno  
Materiale trattato (4.5 g)  
Rapporto solido/liquido  
Concentrazioni reagenti  
Consumi energetici strumenti

**Ipotesi:**  
In laboratorio sono effettuati circa 1000 test ogni anno.  
Acido malico prodotto da fonti primarie

51

## Processo di laboratorio: risultati preliminari

**Microwaves treatment**

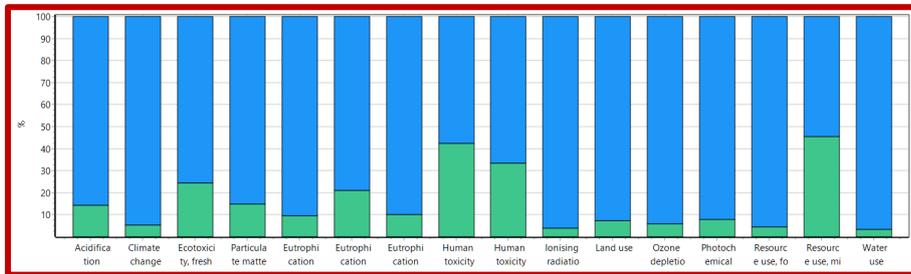
- Microwave equipment
- Electricity

**Leaching**

- Heating plate
- Drying
- Malic acid leaching
- Vacuum filtration

52

## Processo di laboratorio: risultati preliminari



### Laboratory-scale



- Leaching
- Microwave treatment

- Nel processo sviluppato in Tech4LIB, la fase di lisciviazione (*leaching*) risulta essere più impattante rispetto alla fase di trattamento termico a microonde (*microwave treatment*).
- L'impatto del processo di lisciviazione è da attribuire principalmente ai consumi energetici richiesti dalla piastra scaldante (*heating plate*) e di asciugatura del materiale filtrato (*drying*). L'acido malico ha un contributo trascurabile rispetto ai processi termici.
- L'impatto del trattamento a microonde (*microwave treatment*) è invece legato principalmente alla strumentazione (in particolare al forno stesso) piuttosto che ai consumi energetici del processo.

53

## Scale-up

### Microwaves treatment:

- Funzionamento forno **12 h/giorno** per **250 giorni/anno**.
- **Incremento output** da 4.5 g a 100 g.

$$Q_{react(1000\ l)} = \frac{C_p * m_{mix} * (T_r - 298.15\ K) + 3.303\ W/K * (T_r - 298.15\ K) * t}{0.75}$$

### Leaching:

- Aumento dei **volumi dei reattori a 1000 litri** (Piccinno et al., 2016); rapporto solido liquido mantenuto e concentrazioni reagenti mantenute invariate.
- **Scambi energetici ottimizzati** secondo leggi termodinamiche (Piccinno et al., 2016).
- **Recupero del calore** residuo dell'acqua reflua in uscita per ridurre i consumi energetici della *Heating plate* e *Drying* (Piccinno et al., 2016).
- Necessità di inserire sistemi di **pompaggio**, e di **miscelazione/omogenizzazione** nell'impianto che hanno un consumo energetico (Piccinno et al., 2016).
- Utilizzo acido malico da riciclo di sostanze organiche alimentari

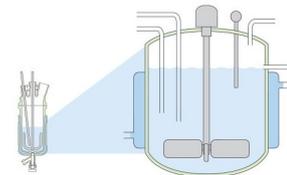
$$Q_{dry} = \frac{C_{p,liq} * m_{liq} * (T_{boil} - T_0) + \Delta H_{vap} * m_{vap}}{\eta_{dry}}$$

$$E_{stir(1000\ l)} = 0.0180\ m^5 s^{-3} * \rho_{mix} * t$$

$$E_{hom(1000\ l)} = 15.47\ m^5 s^{-3} * \rho_{mix} * t$$

### Ipotesi residue:

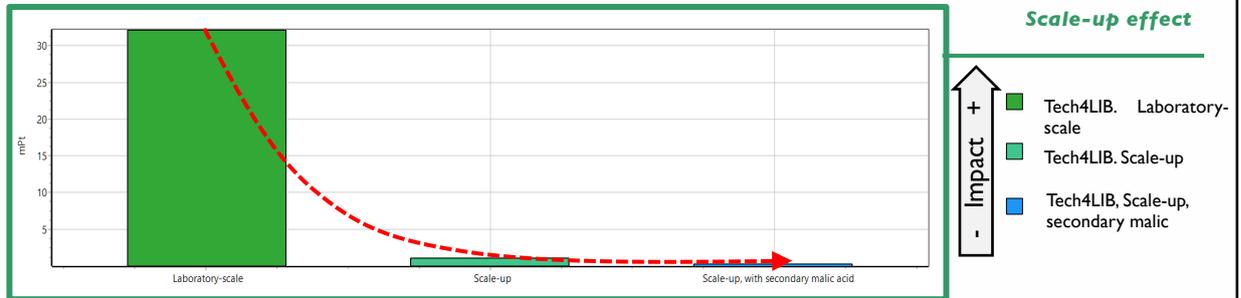
- Umidità residua pre-asciugatura: 1%.
- Acido malico da riciclo privo di impatti sull'ambiente.
- Possibilità di preriscaldare l'acqua in ingresso fino a 60°C.



Piccinno, F., Hischier, R., Seeger, S., Som, C., 2016. From laboratory to industrial scale: a scale-up framework for chemical processes in life cycle assessment studies. *J. Clean Prod.* 135, 1085–1097. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2016.06.164>

54

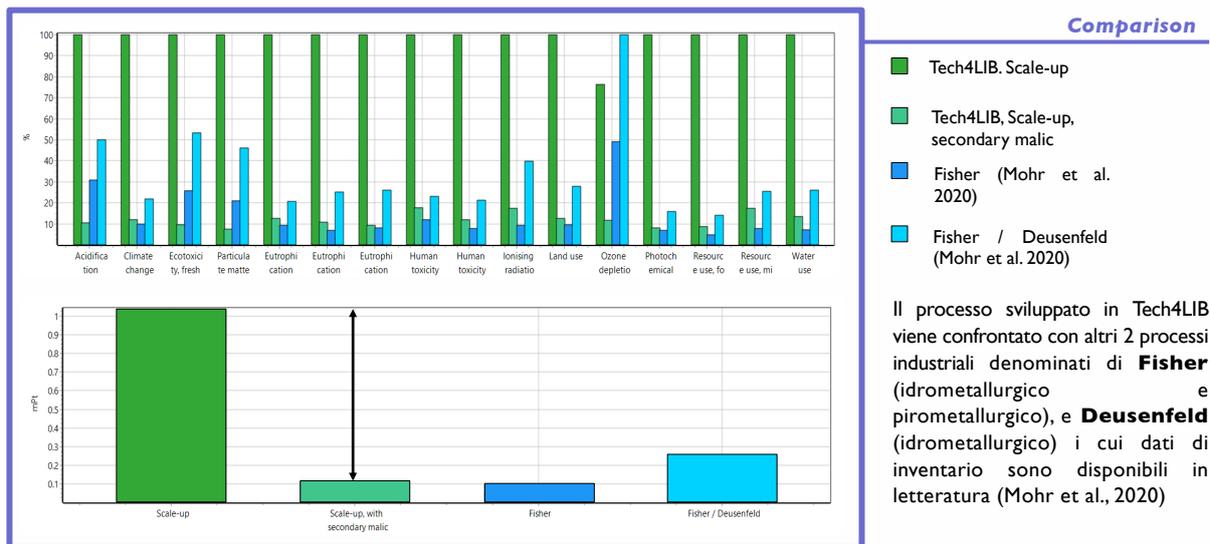
## Scale-up: risultati preliminari



- Attraverso lo scale-up abbiamo esponenzialmente ridotto gli impatti dei principali hotspot ambientali individuati su scala di laboratorio, legati cioè alla strumentazione per il trattamento a microonde (*microwave treatment*) e ai processi termici coinvolti nel processo di leaching. Gli impatti residui sono principalmente quelli dell'acido malico.
- Utilizzare acido malico da scarti alimentari può potenzialmente ridurre ulteriormente gli impatti. **ATTENZIONE:** gli impatti legati alla conversione degli scarti alimentari in acido malico non è ancora stata contabilizzata perché sono in corso le sperimentazioni.

55

## Confronto con processi industriali: risultati preliminari



Il processo sviluppato in Tech4LIB viene confrontato con altri 2 processi industriali denominati di **Fisher** (idrometallurgico e pirometallurgico), e **Deussenfeld** (idrometallurgico) i cui dati di inventario sono disponibili in letteratura (Mohr et al., 2020)

Mohr, M., Peters, J., Baumann, M., Weil, M., 2020. *Toward a cell-chemistry specific life cycle assessment of lithium-ion battery recycling process.* <https://doi.org/10.1111/jiec.13021>

56

## Prossimi passi



Includere gli impatti legati alla produzione di acido malico da recupero di scarti alimentari.



Valutare il processo di riciclo proposto da Tech4LIB nel ciclo di vita delle principali batterie agli ioni di litio (es. NCA, NCM, LFP).



Considerare l'efficienza di riciclo delle principali materie prime critiche contenute nelle batterie (es. litio, cobalto, manganese).



Aggiornamento continuo del modello LCA sulla base dei risultati delle sperimentazioni del progetto e di ulteriori scenari da prendere in considerazione (es. Utilizzo forno settore food con tramoggia e rullo).



- Includere scenari di background con *PREMISE*.

57

## Grazie per l'attenzione



Dr. Federico Rossi

Centro Interdisciplinare per la sostenibilità e il  
Clima

Scuola Superiore Sant'Anna  
Via Santa Cecilia, 24  
56127 Pisa (Italy)

[federico2.rossi@santannapisa.it](mailto:federico2.rossi@santannapisa.it)



Scuola Superiore  
Sant'Anna



INTERDISCIPLINARY  
CENTER  
Sant'Anna

58

# Quando la Fisica Incontra la Chimica: Simulare per Innovare

Prof. Maria Antonietta Vincenti

*Dipartimento di Ingegneria dell'Informazione – Università degli Studi di Brescia*

25 Febbraio 2025

62

## Outline



- I modelli multifisici
- Vantaggi e svantaggi
- Esempi di applicazione
- Uso di modelli multifisici per l'ottimizzazione del processo di estrazione di metalli

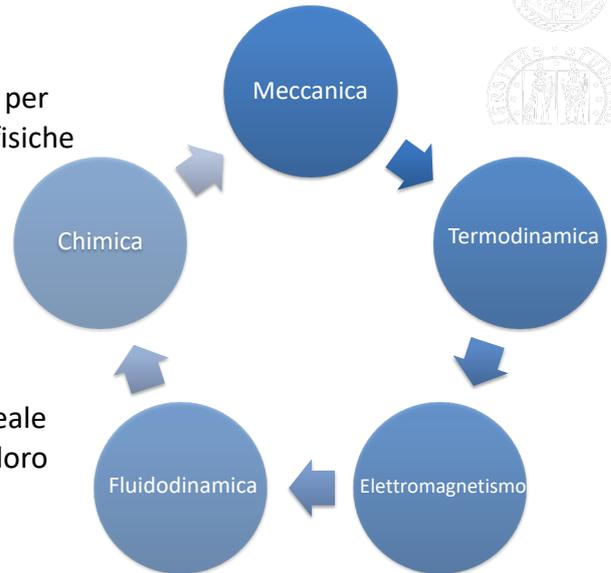
63

## I modelli multifisici

Strumenti matematici e computazionali utilizzati per simulare fenomeni che coinvolgono più discipline fisiche contemporaneamente



Consentono di descrivere problemi del mondo reale dove diverse forze e fenomeni interagiscono tra loro

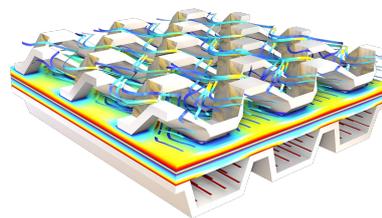


64

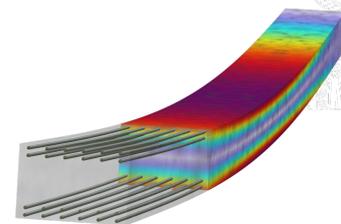
## I modelli multifisici



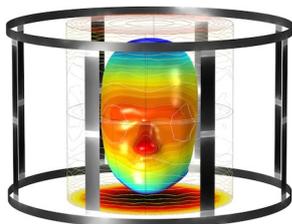
Ingegneria



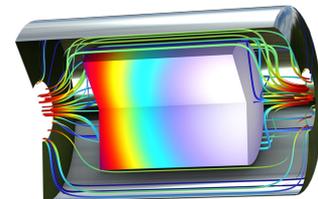
Elettronica



Geomeccanica



Medicina



Scienza dei materiali

65

## I modelli multifisici



### 1. Definizione del problema

- Identificare le fisiche coinvolte (es. elettromagnetismo, termico, chimico).
- Stabilire i fenomeni di accoppiamento tra le fisiche (es. il calore generato da un campo elettromagnetico).

### 2. Formulazione matematica

- Ogni fisica è descritta da equazioni differenziali (es. equazioni di Maxwell per l'elettromagnetismo, equazione di Fourier per la conduzione termica).
- Le equazioni sono collegate tra loro da termini di accoppiamento (es. la densità di potenza elettromagnetica diventa sorgente di calore nell'equazione termica).

### 3. Discretizzazione e Risoluzione Numerica

- Le equazioni differenziali vengono discretizzate con metodi numerici (es. Elementi Finiti o Volumi Finiti) per trasformarle in un sistema risolvibile da un computer.
- Si utilizzano software di simulazione (es. COMSOL, ANSYS,...) per risolvere il sistema.

### 4. Validazione e Interpretazione dei Risultati

- I risultati della simulazione vengono confrontati con dati sperimentali o teorici per verificarne l'accuratezza.
- Si analizzano i risultati per ottimizzare il sistema o prevedere comportamenti futuri.

66

## Vantaggi



### Realismo e accuratezza

- Simulazione di sistemi complessi
- Possibilità di analizzare l'interazione tra fenomeni diversi

### Riduzione dei costi

- Test virtuali prima della prototipazione

### Versatilità

- Applicabili a molteplici settori: ingegneria, biomedicina, energia, aerospazio, elettronica
- Utilizzabili per l'ottimizzazione di processi industriali

### Integrazione con software avanzati

- Possibilità di combinare simulazioni con intelligenza artificiale o machine learning per ottimizzazione automatica.

67

## Svantaggi



### Alta complessità computazionale

- Richiedono molta potenza di calcolo e risorse hardware avanzate.
- Simulazioni complesse possono richiedere ore o giorni per essere eseguite.

### Difficoltà di modellazione e validazione

- Richiedono competenze avanzate in più discipline (fisica, matematica, informatica)

### Maggiore difficoltà nella calibrazione dei parametri

- Molti parametri fisici devono essere determinati sperimentalmente o tramite approssimazioni.
- Errori nei dati di input possono compromettere la qualità della simulazione.

### Costo dei software e licenze

- Strumenti avanzati possono essere molto costosi
- L'uso di software open-source richiede competenze di programmazione e più tempo per la configurazione.

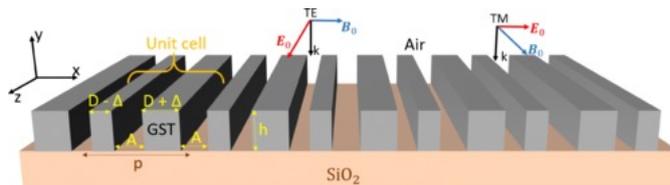
68

## Esempi di Applicazione



### Elettromagnetismo + Termico

→ Studio del riscaldamento indotto da campi elettromagnetici ed impatto sulle proprietà ottiche della struttura.

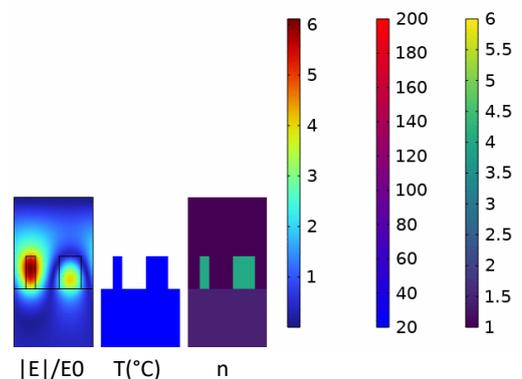


Nanostruttura composta da GST, un materiale che cambia fase (da amorfo a cristallino) quando la temperatura supera 160°C.



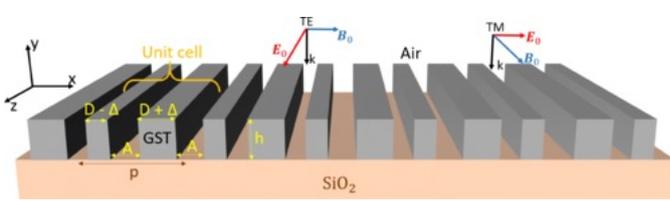
Il cambio di fase del materiale causa una variazione sostanziale nelle proprietà ottiche della struttura

Time=0 s



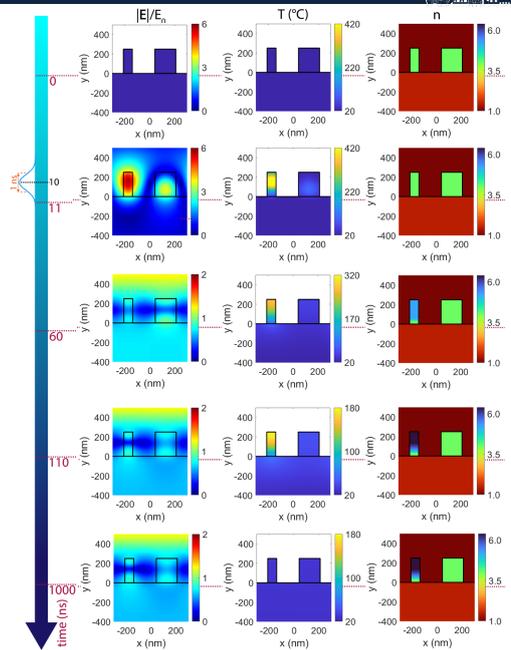
69

### Esempi di Applicazione



Nanostruttura composta da GST, un materiale che cambia fase (da amorfo a cristallino) quando la temperatura supera 160°C.

Il cambio di fase del materiale causa una variazione sostanziale nelle proprietà ottiche della struttura

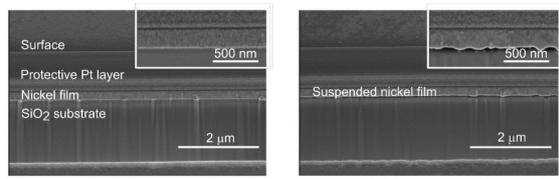
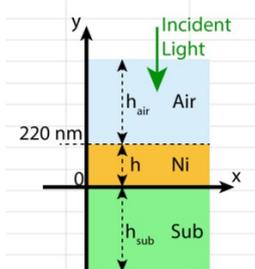
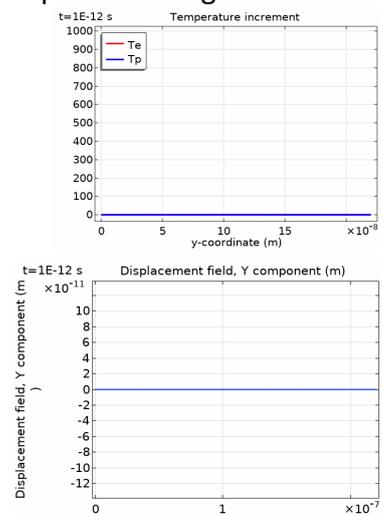


70

### Esempi di Applicazione

#### Elettromagnetismo + Termico + Meccanico/Acustico

→ Studio della generazione di modi acustici generati dalla dilatazione termica causata da riscaldamento dovuto a campi elettromagnetici.

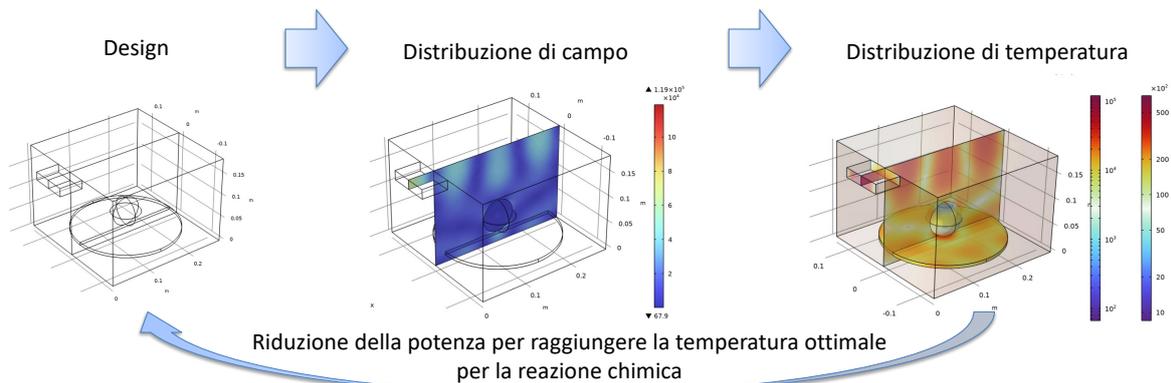




71

## Ottimizzazione del processo di recupero metalli

Per modellare il recupero dei metalli con riscaldamento a microonde, è necessario un modello multifisico che includa:

- Elettromagnetismo**: per simulare la propagazione delle microonde e la loro interazione con i materiali.
- Termico**: per modellare l'aumento di temperatura dovuto all'assorbimento delle microonde.
- Chimico**: per descrivere le reazioni che avvengono a determinate temperature.



72

Thank you for your attention!

Prof. Maria Antonietta Vincenti  
[maria.vincenti@unibs.it](mailto:maria.vincenti@unibs.it)

73



**Studi preliminari volti alla progettazione di un forno a microonde**

**Matteo Scaglia**  
[matteo.scaglia@unibs.it](mailto:matteo.scaglia@unibs.it)

**TECNOLOGIE CIRCOLARI E SOSTENIBILE: Innovazione per il futuro delle batterie e il recupero delle materie prime**

25 Febbraio 2025



74

## Metodo

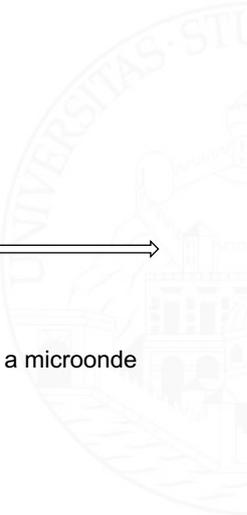
**FASE 2**

**eseguire delle simulazioni per dimensionare la cavità del forno, e poi, studiare il comportamento termico della polvere;**

—————→

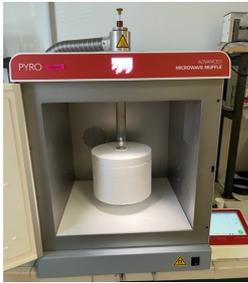
**FASE 1**  
riprodurre il modello del forno commerciale di **laboratorio Pyro**

**FASE 3**  
**prototipazione** del forno a microonde



75

## Simulazioni sul forno di laboratorio Pyro Milestone



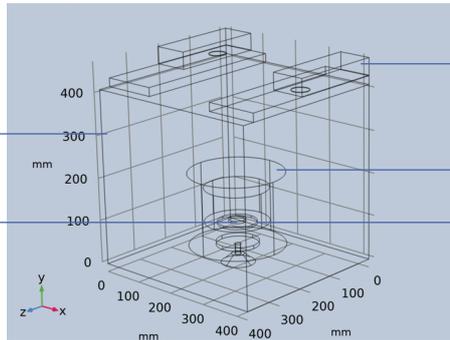
**Obiettivo:**

Determinare una **correlazione** tra prove sperimentali e simulazioni.

- Predire il comportamento del campione a fronte di prove sperimentali, si lavora in **sicurezza** e si **ottimizza** il materiale utilizzato;
- Studio del sistema al variare di alcuni parametri del campione, come **altezza e diametro**;
- Studio del sistema al variare di alcuni parametri del forno, come **potenza e tempo**;

Cavità del forno

Campione di Black Mass



Guide d'onda

Camera di allumina

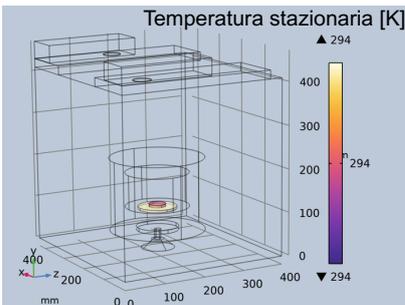
Suscettore in carburo di silicio



76

76

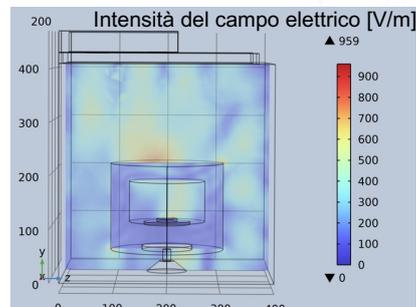
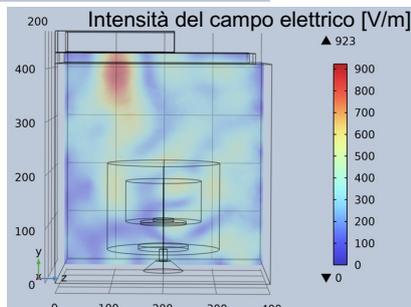
## Simulazioni sul forno di laboratorio Pyro Milestone



La geometria di questo forno è però complessa ed i risultati delle simulazioni **non sono affidabili**. Sono presenti discrepanze tra prove sperimentali e simulazioni.

Come si può notare, il campo elettrico è disomogeneo ed è caratterizzato da un'intensità bassa in corrispondenza del campione.

Nell'ottica di trattare maggiori quantità di polvere, è essenziale **progettare un'apposita cavità**.



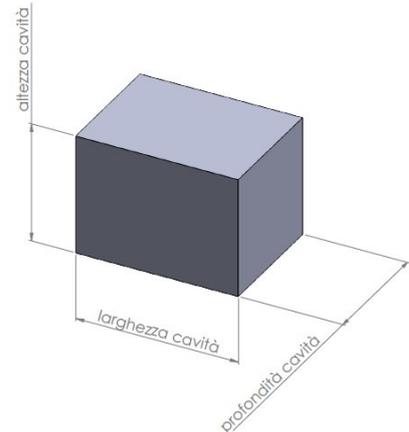
77

77

## Dimensionamento della cavità

Studiare la **distribuzione del campo elettromagnetico** all'interno di una cavità a forma di prisma a base rettangolare:

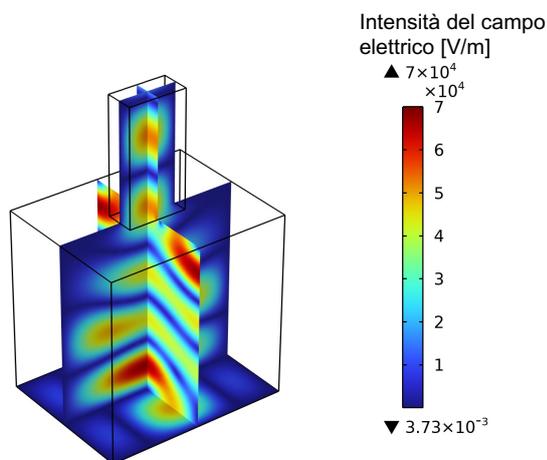
- sono state avviate in parallelo delle simulazioni, parametrizzando la geometria della cavità a parità di sorgente.



78

## Esempio di distribuzione di campo elettromagnetico in una cavità

Per ogni configurazione, sono state costruite delle **sezioni** all'interno della cavità, grazie alle quali è possibile individuare le posizioni e le dimensioni degli **hotspot**, zone caratterizzate da un'elevata intensità del campo elettrico.



79

79

## Posizionamento del campione



In corrispondenza degli hotspot, viene posizionato il materiale che deve essere sottoposto al riscaldamento elettromagnetico, in modo da massimizzare l'efficienza del sistema.

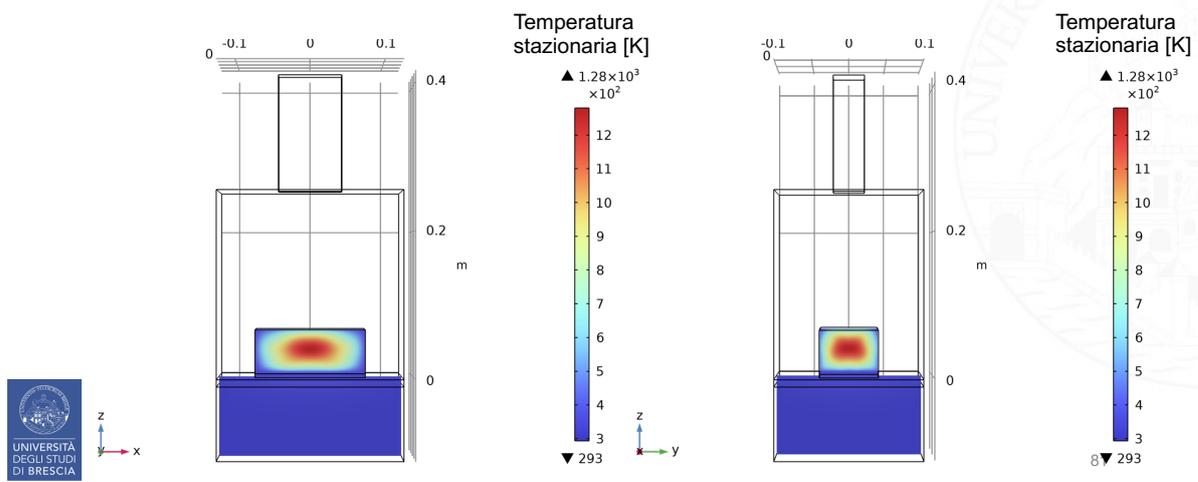


80

80

## Esempio di campo di temperatura in un campione di Black Mass

Una volta posizionato il campione di black mass in corrispondenza degli hotspot, ne viene studiato il **comportamento termico**. Anche in questo caso, sono stati costruiti dei piani di sezione x-z ed y-z nella mezziera della cavità.



81

**Grazie per l'attenzione**



82

82

# Nuovi trattamenti della Black Mass

ING. ANGELO FORESTAN  
Presidente di Spirit Srl

25 Febbraio 2025

**TECNOLOGIE CIRCOLARI  
E SOSTENIBILI:**  
Innovazione per il futuro delle batterie  
e il recupero delle materie prime



83

## Cos'è la BM?

In gergo si intendono le batterie Li-Ion a fine vita, processate meccanicamente sino ad ottenere miscele di polveri anodiche e catodiche.



Riproduzione vietata

84

## Black Mass

Black Mass è un intermedio del processo di recupero delle batterie Libs e Ni-MH.

Black Mass è l'INPUT per processi di raffinazione metalli di tipo pirometallurgico o idrometallurgico.

E' al momento una definizione commerciale, più che di composizione.

85

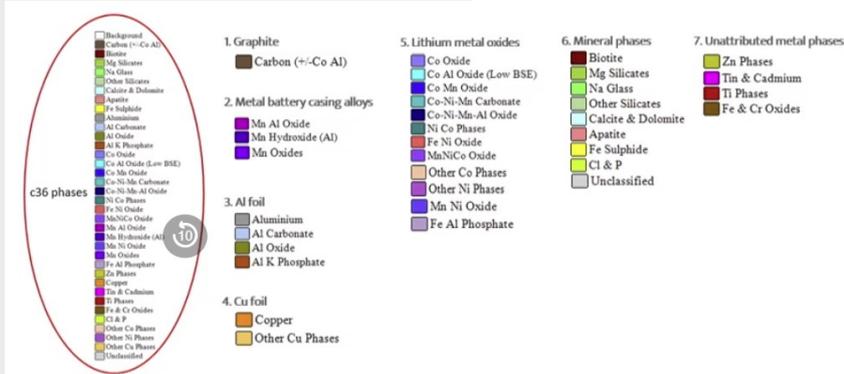
Riproduzione vietata

85

**La Black Mass varia**

- in base alle batterie da cui viene originata: LCO, CNM, LFP,...
- a seconda del processo di recupero delle batterie.

Infatti, può contenere, oltre ai metalli: acqua, solvente, elettrolita, rame, alluminio, plastiche, ...in concentrazioni variabili.



Quindi: studi sul recupero di quanto contenuto nella BM devono partire da campioni industriali di BM!

**IN EUROPA:**

Non esiste una definizione tecnica di Black Mass.  
Si sta ancora discutendo se è Rifiuto, prodotto o “Rottame”.

E' importante definirla? Si, perchè a seconda di dove rientra le normative sono diverse.

Attualmente disomogeneità in Europa con obblighi diversi e quindi economie diverse.

Anche per l'esportazione I costi e le procedure sono diversi!

LA CINA/ASIA ha introdotto una prima classificazione/suddivisione della Black Mass.

- ▶ **Categoria 1:** Si riferisce a Black Mass prodotta da Li-Ion battery scrap, contenente nichel e/o cobalto.
- ▶ **Categoria 2:** si riferisce a Black Mass prodotta da Li-ion battery scrap contenente LiFePO4
- ▶ **Classe A** si riferisce a Black Mass da recupero di soli catodi (industria batterie). Quindi senza C e Al.
- ▶ **Classe B** si riferisce a Black Mass prodotta da batterie a fine vita.

NB: Nell'import-export occorre considerare il contenuto di tutti i tipi di metalli, ai fini della definizione dei dazi doganali.

Riproduzione vietata

88

88

China's National Standard for Battery Black Mass (%by weight, dry basis)

	Category 1 (LCO/NCM,..)		Category 2 (LFP)	
	Class A	Class B	Class A	Class B
Lithium	≥6,00	≥3,50	≥4,00	≥2,00
Nickel & Cobalt combined	≥45,00	≥25,00	≤1,00	
Iron	-		≥28,00	≥18,00
Phosphate	≤0,8		≥15,00	≥10,00
Manganese	-		-	
Water soluble Fluoride	≤0,1	≤0,4	≤0,1	≤0,1

Riproduzione vietata

89

89

## Specifiche cinesi di riferimento per il valore economico della Black Mass, classe A.

Assessment	Symbols	Current Quality Specification	New Quality Specification
Ni-Co black mass DDP China calculated price	NBMCD00		
Ni-Co black mass DDP China lithium payable	NBMCA00	Min. Li 4%, Co 10%, Ni 20%	Min. Li 3%, Co 5%, Ni 12%; Less than 3% combined Cu, Al, Fe
Ni-Co black mass DDP China cobalt payable	NBMCB00		
Ni-Co black mass DDP China nickel payable	NBMCC00		

90

Riproduzione vietata

90

### SINTESI DEI PROCESSI INDUSTRIALI ATTUALMENTE APPLICATI ALLE BATTERIE PER PRODURRE BM:

#### ► PROCESSO IDROMETALLURGICO:

Macinazione delle batterie tal quali in soluzione alcalina.

La soluzione acquosa viene filtrata, trattata per eliminare il solvente e recuperare il Litio.

Il filtrato è costituito da polveri catodiche+anodiche, plastiche, fili di rame, alluminio, rame, schede elettroniche,...

#### ► PROCESSO PIROMETALLURGICO:

Le batterie sono introdotte in un forno verticale a plasma. Carbone, plastiche,.. L'organico vario è incenerito.

I metalli basso fondenti, come litio e zinco, evaporano;

I metalli pesanti sono raccolti nel fondo.

I metalli sono quindi lisciviati per la separazione dei diversi metalli.

91

Riproduzione vietata

91

**SPRIT S.R.L.**  
 P-Ca 021 4.02 - Mixture of Lithium metal Oxide based Cells (P11.0) (Lotto 0224 K - PG)  
 Recycled mixture based Lithium Oxide  
 Composizione: Ni-MH

**Test Results Table:**

Test	Unit	Result	Method
Li	%	4.50	0001
Al	%	4.70	0001
Fe	%	1.03	0001
Cd	%	0.01	0001
Cu	%	2.72	0001
Pb	%	0.01	0001
Co	%	21.20	0002
Ni	%	12.95	0002
Mn	%	5.15	0002
Ha	%	<0.0005	0002

Riproduzione vietata

► **PROCESSO SPIRIT SRL**

Si distingue dai precedenti perché le batterie sono scaricate e smontate in celle.

► Nella BM non entra plastica, fili di rame, schede elettroniche...

► Le singole celle sono inertizzate, liberate da elettrolita e solvente, ad una temperatura massima di 380°C. Questa temperatura non distrugge del tutto le fasi cristalline.

► Per successiva macinazione e raffinazione meccanico/magnetica una frazione è recuperata come NCAM. Altre frazioni possono essere usate direttamente nel comparto dei pigmenti. EoW validati ed autorizzati.

92

**PROCESSI DI TRATTAMENTO DELLA BLACK MASS:**

La Black Mass in genere viene raffinata per separare i diversi metalli di valore (Li, Co, Ni o FePO4).

L'obiettivo è ottenere:

- Precursori per materiali per la produzione di nuove celle;
- Concentrati di metalli come cobalto, nichel, litio, a maggior valore aggiunto, da destinare ai vari settori di utilizzo.

Tutti i processi di trattamento della Black Mass prevedono una fase di Lisciviazione, in genere acida.

L'acido viene scelto in base all'obiettivo (lisciviazione totale o parziale?) e al metallo di maggior interesse.

Soluzioni di liscivia con:

- Acidi organici: ossalico, citrico, acetico,...
- Acidi inorganici: solforico, cloridrico, nitrico, sodio persolfato, miscele di acidi forti,...
- Solventi Eutettici: processi di scarsa applicazione industriale per l'elevato costo dei solventi.

93

Riproduzione vietata

▶ **Esempio: Liscivia con acido solforico:**  
 Soluzione si acido solforico 1M; Temperatura a 90°C; aggiunta di acqua ossigenata; tempo 5 h.  
**Rapporto Polvere/Soluzione= 1/10, meglio 1/20**

▶ **Esempio: Liscivia con acido citrico:**  
 Soluzione si acido citrico 0,5M; Temperatura a 90°C; aggiunta di acqua ossigenata; tempo 2 h.

In qualsiasi caso, dalla BM si ottengono:

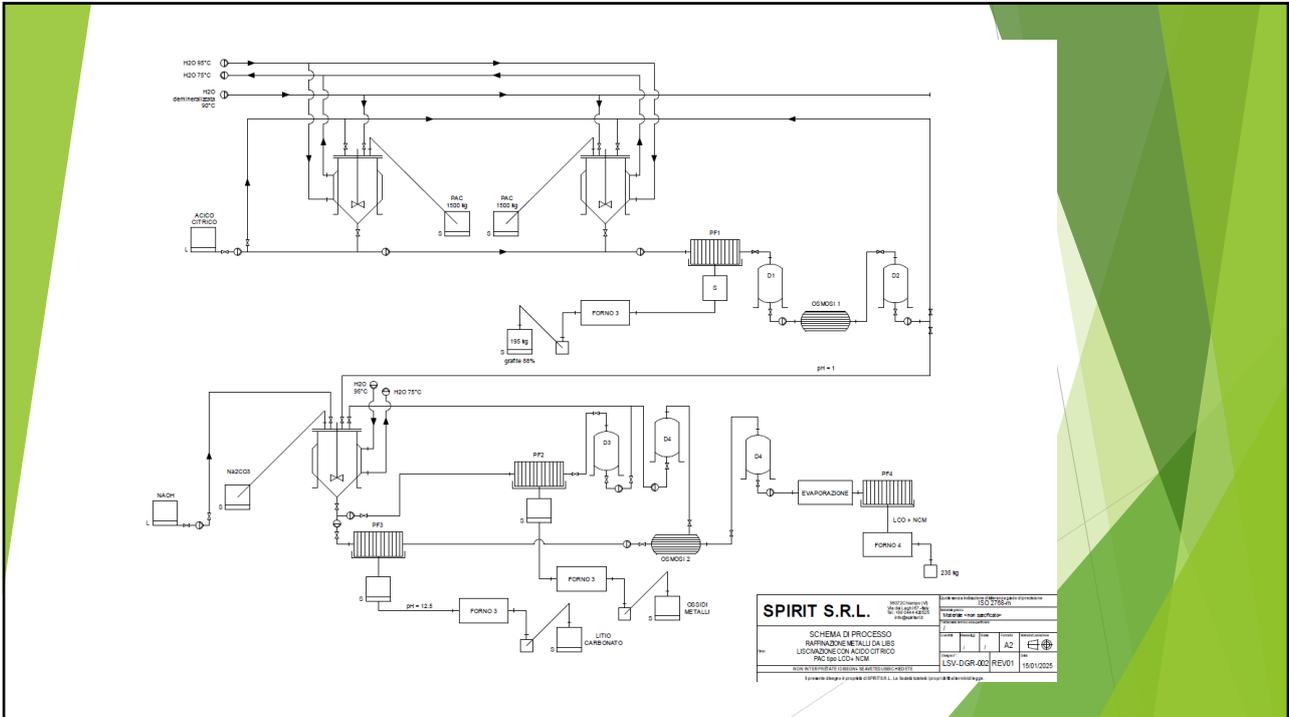
- Liquor con metalli disciolti;
- Pannello di grafite+frazioni di ossidi indisciolti (soprattutto ossido di manganese).

La scelta dell'acido è subordinata all'obiettivo di una liscivia totale o parziale dei metalli. Ossia: si vogliono i singoli metalli separati? si possono volere miscele di ossidi metallici? È sufficiente il recupero del solo litio?

94

Riproduzione vietata

94



95

**DOPO LISCIVIA**

Dal liquor di liscivia occorre separare i diversi metalli contenuti.

► **Estrazione con chelanti e solventi organici dei metalli di interesse. (Solvent Extraction).**

Tecnologia applicata normalmente, anche per la raffinazione metalli da miniera.

Criticità: Impianti di grandi dimensioni; grandi volumi di acqua di processo.

A favore: Sali di nichel e cobalto a grado elevato.

► **Separazione metalli con membrane:**

Tecnologia piuttosto «giovane», ancora in impianti pilota.

Criticità:

-uso di grandi volumi di acqua;

-tecnologia «nuova», con membrane ancora poco performanti;

Riproduzione vietata

96

96

**DOPO LISCIVIA**

Dal liquor di liscivia occorre separare i diversi metalli contenuti.

► **Precipitazione selettiva di metalli, agendo su pH e anione.**

Tecnologia applicata, che porta a concentrati metallici misti. E' gestibile per prodotti non ad alto titolo, adatti ad alcuni comparti industriali.

Criticità: Non porta a prodotti molto puri;

Discreti volume di acqua.

A favore: Tecnologia semplice.

► **Separazione metalli per via elettrochimica.**

Criticità:

- Di difficile applicazione per miscele molto variabili;

-grande consumo di corrente;

-discreti volumi di acqua.

Riproduzione vietata

97

97

