

BREAK EVEN ANALYSIS DEI PROCESSI DI RECUPERO DELLE MATERIE PRIME E CRM DA BATTERIE AGLI IONI DI LITIO IN UN'OTTICA DI URBAN MINING E DI ECONOMIA CIRCOLARE. I CASI STUDIO DEGLI IMPIANTI DELL'AMERICA MANGANESE E DELL'ACCUREC

Valentina Squicciarino¹, Claudia Scagliarino², Marco La Monica³, Maurizio Boccacci Mariani¹ e Laura Cutaia³

¹ *Facoltà di Economia, Sapienza Università di Roma, Via del Castro Laurenziano, 9, 00161 Roma (RM), Italia*

² *CINIGeo - Consorzio Interuniversitario Nazionale per l'Ingegneria delle Georisorse, Corso Vittorio Emanuele II, 244, 00186 Roma (RM), Italia*

³ *ENEA. Laboratorio di Valorizzazione delle risorse (RISE), Dipartimento Sostenibilità dei Sistemi Produttivi e Territoriali (SSPT), C.R. ENEA Casaccia - Via Anguillarese 301, 00123 Roma (RM), Italia.*

ABSTRACT: La crescita repentina del mercato dei veicoli elettrici sta avendo un'espansione capillare al fine di raggiungere gli obiettivi di riduzione delle emissioni di gas ad effetto serra globali e di miglioramento della qualità dell'aria. Questo fenomeno ha comportato un'accelerazione nell'approvvigionamento delle risorse contenute all'interno delle batterie agli ioni di litio dei veicoli elettrici, aumentandone di conseguenza la loro estrazione dai giacimenti naturali. Attualmente sono presenti sul mercato società che hanno deciso di investire nel mercato delle materie prime seconde, in particolare nel recupero di metalli presenti all'interno delle batterie agli ioni di litio esauste, intravedendo in questo mercato una buona opportunità di investimento.

Questo lavoro nasce da una tesi di laurea magistrale in Tecnologie e Gestione dell'Innovazione che mira ad integrare alcuni aspetti del report realizzato nell'ambito dell'Accordo di Programma MiSE-ENEA "Ricerca di Sistema elettrico" da ENEA e dal consorzio CINIGeo: "Analisi dei flussi e studio dei mercati reali e finanziari delle materie prime presenti negli autoveicoli elettrici e nelle colonnine di ricarica 2018". In particolare, questo paper presenta una break even analysis dei processi di recupero delle batterie agli ioni di litio di due aziende: American Manganese Inc. ed Accurec. L'obiettivo principale è quello di valutare quale tra i due processi sia in grado di garantire la competitività sul mercato del recupero delle materie prime seconde nei prossimi tre anni, nel modo più efficiente possibile, a parità di flusso di materie prime immesse come input nel sistema.

Parole chiave: Litio; Cobalto; Manganese; Nickel; Batterie agli ioni di litio, Analisi costi benefici, Recupero, Materie prime critiche, Economia circolare, Urban mining

1. INTRODUZIONE

Ad oggi vengono posti molti interrogativi sulla capacità della Terra di sostenere il carico di sfruttamento fino ad ora realizzato dall'uomo e di quanto tempo ancora rimanga prima che la macchina biologica si fermi. Siamo in un'epoca di sfruttamento delle risorse senza precedenti e mai come ora si stanno riscontrando fortemente le conseguenze di queste azioni.

La modernizzazione, nonché il seguente insediamento nelle metropoli, hanno localizzato nelle città la più alta concentrazione di accumulo di prodotti e rifiuti non recuperati, rappresentando esponenzialmente il modello di economia lineare. Il prodotto tra urbanizzazione, industrializzazione e globalizzazione ha dato vita ad un aumento dei consumi, all'incremento dell'estrazione di materie prime e di conseguenza ad una generazione massiccia di rifiuti solidi urbani. Dei rifiuti generati a livello mondiale il 47% viene collocato in discarica, il 22% incenerito e solo il 31% riciclato (*International Resource Panel, 2018*). La gestione dei rifiuti così realizzata comporta un'enorme perdita di risorse che potrebbero avere futuri utilizzi e non permette, inoltre, di cogliere tutti i vantaggi economici provenienti da una filiera del recupero. Negli ultimi anni un nuovo modello è stato introdotto per contrastare e risolvere questo problema sempre crescente: il modello di economia circolare. In questo scenario vengono ripensati i confini di approvvigionamento delle risorse, spostando l'asse dell'estrazione dalle miniere alle città, luogo ricco di materie prime seconde in grado di poter rientrare all'interno del circuito economico. L'approvvigionamento delle risorse da contesti differenti rispetto a quelli a cui è consuetudine pensare, è individuato in quello che oggi viene chiamato urban mining (UM), considerato uno degli strumenti necessari per raggiungere gli obiettivi di economia circolare (EC).

In vista della limitatezza delle risorse naturali e delle pressioni ambientali, l'estrazione di risorse dai serbatoi urbani, pianificata e realizzata in un'ottica di ciclo di vita (LCA – Life Cycle Assessment), minimizza le necessità di estrazione da riserve geologiche e massimizza il recupero, il riutilizzo e il riciclaggio di materie prime seconde provenienti dalle discariche o da contesti urbani, riducendo al minimo le emissioni inquinanti (Cossou, R. Stergmann R., 2018).

L'UM favorisce una gestione sistemica delle scorte antropogeniche e dei rifiuti, in una prospettiva di *Life Cycle Thinking*, un interscambio continuo di materie che fluiscono come output dalle discariche, edifici, prodotti e spazi, per poi rientrare come input in un processo produttivo successivo, allungando il ciclo di vita dei materiali che altrimenti rimarrebbero depositati a lungo, senza poterli sfruttare per ulteriori utilizzi.

Nell'UM l'attenzione non viene più riposta sulle *fixed stocks*, materie prime incanalate nei giacimenti naturali, ma tutto viene "ripensato", spostando il sistema "classico" sulle nuove *anthropogenic stocks*, ovvero risorse immagazzinate negli anni nei sotterranei delle città (Cossu R., Salieri V., Bisinella V., 2012). Con il termine *stock* (giacenza) si indica qualsiasi prodotto che un'impresa conserva in magazzino per un impiego futuro. È possibile distinguere tra:

Per molti Paesi le risorse primarie non sono disponibili all'interno dei confini nazionali, è quindi necessario acquisire tali risorse da altri Paesi, che possono avere situazioni geopolitiche complesse e dove non sussistono leggi adeguate sul lavoro e sull'ambiente. La possibilità di riconsiderare le città come miniere urbane e non più come accumulatrici di rifiuti fornisce all'Unione Europea (UE) l'opportunità di ridurre la dipendenza verso l'esterno per l'approvvigionamento di risorse.

Un esempio è proprio quello del settore dei veicoli elettrici (VE), il cui mercato attualmente in forte espansione caratterizzerà una maggiore presenza di questi veicoli all'interno dei contesti cittadini, traducendosi in un incremento futuro di batterie agli ioni di litio esauste, ricche di importanti materiali da cui poter attingere. Per queste ragioni in questo elaborato è stata posta l'attenzione sulle principali materie prime (critiche e non) contenute all'interno delle batterie elettriche e sono state individuate le principali tecnologie presenti nel settore delle auto elettriche, per trasformare gli stock di materie prime contenute nelle batterie agli ioni di litio abitualmente destinate in discarica, in prodotti riutilizzabili e riciclabili.

2. LE PRINCIPALI MATERIE PRIME CRITICHE E NON CONTENUTE NELLE BATTERIE AGLI IONI DI LITIO DEI AUTOVEICOLI ELETTRICI

2.1 Individuazione delle materie prime critiche da parte dell'Unione Europea

Già nel Piano d'azione dell'economia circolare nel 2015, la Commissione Europea aveva individuato le CRM come uno dei cinque settori prioritari a cui doveva essere data una particolare attenzione (European Commission, 2015). Tale interesse è dovuto principalmente al fatto che i CRM sono di grande importanza non solo economica, ma anche strategica, esiste infatti, un rischio elevato associato alla loro offerta poiché la produzione è concentrata in alcuni Paesi extra UE. È importante sottolineare che i CRM sono utilizzati in molte applicazioni industriali e dispositivi elettronici di interesse strategico. Il bassissimo tasso di riciclaggio di questi materiali comporta la perdita di significative opportunità economiche e di importanti risorse materiali non disponibili in territorio europeo. Per questo motivo nel nuovo piano d'azione per l'economia circolare del 2020 la Commissione afferma che presenterà nei prossimi anni un nuovo quadro normativo specifico per le batterie, che contenga: i) regole sul contenuto di riciclato; ii) misure per migliorare i tassi di raccolta e riciclaggio di tutte le batterie; iii) garanzia del recupero dei materiali di valore; iv) elaborazione di orientamenti destinati ai consumatori (European Commission, 2020).

Nel 2018, la Commissione europea ha presentato una relazione sulle CRM e l'economia circolare, al fine di fornire un quadro più completo per l'individuazione di dati e la promozione di pratiche e azioni migliori da adottare per il loro recupero (European Commission, 2018). L'elenco viene aggiornato ogni tre anni in modo da seguire gli andamenti del mercato, delle innovazioni tecnologiche e produttive. La metodologia utilizzata per identificare le criticità dei materiali da parte dell'UE è realizzata analizzando:

- La catena di approvvigionamento, cioè il rischio di un'interruzione della fornitura dell'UE di una materiali prima.
- L'importanza economica: la rilevanza di una materia prima per l'economia dell'UE in termini di applicazioni per uso finale e valore aggiunto dei corrispondenti settori manifatturieri.

Nell'ultimo elenco del 2017 sono stati individuati 27 CRM come si può notare nel quadrante in alto a destra nella figura 1 (European Commission, 2017a).

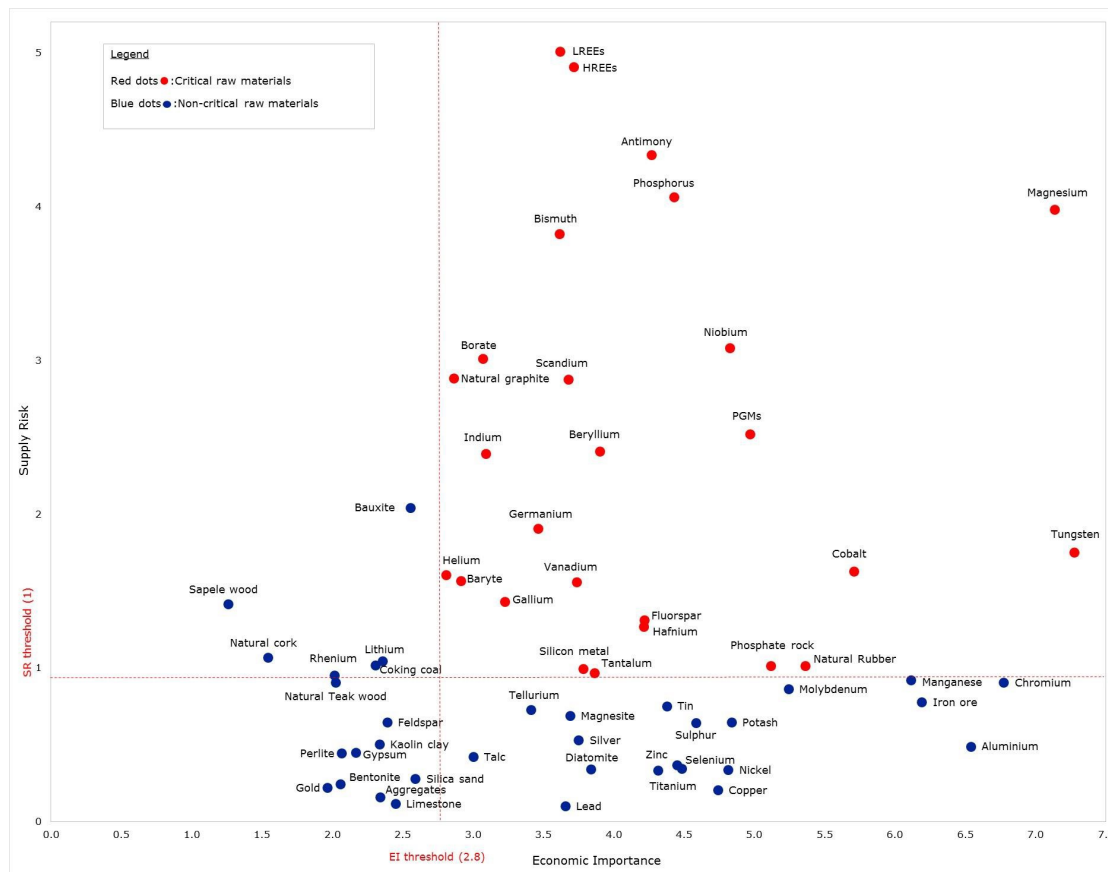


Figura 1. Valutazione di criticità dell'importanza economica e risultati del rischio di approvvigionamento dei materiali 2017. Fonte: European Commission, 2017a.

È importante sottolineare che nei Paesi come l'Europa dove si ha una completa assenza di queste risorse, attingere a possibili sostituti presenti sul proprio territorio riduce il rischio di approvvigionamento. Molti delle degli stock antropogenici presenti sul suolo europeo, rappresentano una potenziale fonte di CRM come ad esempio le apparecchiature elettroniche, batterie o altri rifiuti industriali.

2.2 Le materie prime e i CRM presenti nelle batterie agli ioni di litio

Le percentuali di recupero da fonti secondarie di materie prime sono ancora molto basse, nonostante le diverse materie prime critiche e non possiedono per loro natura la possibilità di essere riciclate con elevati tassi di purezza, sia in termini economici che tecnici. Inoltre, nonostante la determinazione delle politiche dell'UE nello spostare l'asse strategico di approvvigionamento di queste risorse verso modelli di EC, le materie prime critiche e non presenti negli stock urbani ancora non hanno del tutto sfruttato le loro potenzialità. Questa mancanza è dovuta ai prezzi delle materie vergini non abbastanza elevati da giustificarne il riciclaggio, determinando dei bassi livelli di recupero che non sono in grado di soddisfare una domanda di mercato elevata e dei costi di investimento nell'impiantistica dedicata. Un esempio eclatante è la filiera del recupero dei metalli all'interno delle batterie agli ioni di litio dei VE. Infatti, si stima che per giustificare i costi di investimento per un impianto che recupera batterie a ioni di litio debbano essere trattate almeno 4.000 tonnellate in un anno.

I materiali che vengono riciclati all'interno della batteria agli ioni di litio, sono quelli contenuti all'interno del catodo: litio, cobalto, manganese, nickel. Non tutti questi metalli sono individuati dall'UE come CRM, ma per alcune caratteristiche si avvicinano alle soglie di rischio sia per

approvvigionamento, sia per importanza economica. Nello specifico, il litio attualmente non è considerato CRM dall'UE, infatti risulta ancora avere una bassa importanza a livello economico, mentre per quanto riguarda il rischio di approvvigionamento si sfiora la soglia minima, poiché è presente in giacimenti naturali concentrati in pochi Paesi. Il cobalto, invece, viene classificato come CRM, sia per la sua importanza economica sia per il rischio di approvvigionamento. Le criticità per questo materiale sono dettate, in particolare, dalla concentrazione della produzione e raffinazione in due soli Paesi, rispettivamente il Congo e la Cina. Infatti la possibilità di interruzioni negli approvvigionamenti dovuti da conflitti civili o politici e l'adozione di dazi doganali sono molto alte in tali Paesi. Il manganese non è classificato come CRM. Nonostante abbia un valore economico molto alto, non vi sono preoccupazioni circa la sua disponibilità, ma presenta maggiori difficoltà nel raggiungere la purezza chimica richiesta. Anche il nickel, a livello UE non è considerato ancora CRM (European Commission, 2017a; 2017b).

I quantitativi recuperati di questi metalli dipendono da diversi fattori, come ad esempio il tipo di trattamento che viene adottato e dalla loro capacità di recupero nei processi di trattamento delle batterie. Solitamente le quantità recuperate si stimano da un minimo del 90% del prodotto sul peso in ingresso ad un recupero totale. Uno fra gli ostacoli principali, che si interpone alla realizzazione di una spinta per il loro riciclo, risiede nell'impossibilità di individuare il tipo di batteria del futuro, visto i continui cambiamenti per migliorarne le prestazioni e ridurre i costi. In particolare, i cambiamenti repentini di dosaggi e composizioni delle celle, rendendo difficile stabilire un unico processo standardizzato per il recupero di questi metalli. Tuttavia, non è solo la composizione delle batterie a creare ritardi verso il raggiungimento di alti tassi di riciclo, gli ostacoli sono diversi: 1) le tecnologie di selezione e riciclaggio non sono ancora disponibili sul mercato a costi competitivi; 2) molte materie prime critiche e non secondarie rimangono bloccate all'interno dei prodotti per tempi lunghi. Questo implica, quindi, dei ritardi nei processi di recupero e un'insufficienza nell'offerta per competere con le materie prime nel rispondere alla domanda crescente del settore delle batterie; 3) prodotti sempre più miniaturizzati dell'elettronica rendono lo smontaggio dei componenti sempre più complesso.

3. I PROCESSI DI RECUPERO DELLE MATERIE PRIME E CRM DA BATTERIE AGLI IONI DI LITIO

3.1 Rassegna delle principali tecnologie per il riciclaggio delle batterie agli ioni di litio dei veicoli elettrici

Le tecnologie di trattamento industriale impiegate per il riciclo delle batterie esauste provenienti da diversi mercati (VE, elettronica ecc.) si dividono principalmente in tre diversi processi:

- *Pirometallurgico*: è un processo che utilizza alte temperature per il recupero di metalli come cobalto, nickel e metalli attivi provenienti da batterie esauste. Nel trattamento pirometallurgico vengono utilizzati forni industriali, in cui avviene una fusione con agente riducente per ottenere leghe metalliche e scorie, in cui i componenti organici della batteria sono bruciati e non più recuperabili. Il processo pirometallurgico si svolge principalmente in due fasi: calcinazione/pirolisi e riduzione/fusione. L'utilizzo di questo processo non permette di recuperare alcuni materiali, che per loro composizione chimica si dissolvono ad alte temperature. Un esempio è dato dal litio, il quale viene perso durante il processo di recupero, inoltre, si riscontrano alti consumi energetici ed elevate emissioni inquinanti (CO₂, diossine e furani).
- *Idrometallurgico*: questo processo comprende trattamenti in soluzione acquosa, con l'aggiunta di acidi inorganici, acidi organici o sistemi di sale di ammoniaca-ammonio i cui contenuti si trasformano in sale metallico idrosolubile, utilizzando temperature più basse rispetto al processo sopra descritto. Grazie al processo di elettrolisi, la precipitazione o la cristallizzazione del metallo, i materiali si

ottengono in soluzione liquida. Il processo idrometallurgico si divide in quattro fasi: lisciviazione, precipitazione, estrazione tramite solvente e separazione elettrochimica. In questo processo i consumi energetici risultano essere molto bassi così come le emissioni di CO₂. Tuttavia le reazioni chimiche richiedono tempi lunghi di lavorazione e un uso massiccio di sostanze chimiche necessarie in volumi elevati. Infine si evidenzia che in alcune realtà aziendali vengono utilizzati entrambi i processi: piro e idrometallurgico.

- Meccanico: il primo passaggio di questo trattamento avviene tramite separazione fisica dell'involucro della batteria, per recuperare i metalli attivi e minimizzarne l'alterazione. Il processo si svolge a secco, senza l'adozione di prodotti chimici, calore o acqua, i prodotti vengono poi suddivisi in base alle loro caratteristiche fisiche come qualità, peso ecc. Questo processo consuma poca energia, circa 0,3 kWh/kg, ottenendo un tasso di riciclaggio di oltre il 90%. Tuttavia, nonostante le percentuali di recupero siano molto alte, richiede una manodopera altamente specializzata e macchinari differenti per agevolare il trattamento delle batterie tra loro omogenee, con conseguente incremento dei costi rispetto ai due processi precedentemente descritti (Kushnir, D., 2015).

La scelta della tipologia di trattamento è importante a seconda dei risultati che si vogliono ottenere: recupero di tutti i materiali, recupero di alcuni materiali di ottima qualità riutilizzabili all'interno di un nuovo ciclo per la produzione di batterie, costi energetici bassi, evitare trattamenti onerosi dei fumi o delle acque contaminate da solventi chimici. Si sceglie quindi a monte il tipo di tecnologia di trattamento da utilizzare per ottenere a valle i prodotti voluti, per il recupero del litio, per esempio, sono utilizzabili solo trattamenti idrometallurgici e meccanici, in quanto il trattamento pirometallurgico perde completamente la possibilità di recupero di questo metallo. L'unico trattamento che permette il recupero di litio di buona qualità è quello meccanico che però ha i limiti già evidenziati precedentemente: personale molto qualificato e linee di trattamento complesse. I trattamenti pirometallurgici, invece, sono tecnologicamente più semplici e riescono a trattare quantitativi maggiori, ma costringono ad un trattamento a valle per la separazione dei materiali, inoltre sono ambientalmente meno sostenibili. La scelta impiantistica influisce molto sui prodotti finali, è importante quindi una progettazione accurata. Di seguito, all'interno della tabella 1, sono esposte le aziende attualmente presenti sul mercato per il riciclo delle batterie agli ioni di litio e non solo. Nella ricerca è stata realizzata una rassegna delle tecnologie e dei processi implementati all'interno delle società sottoesposte. Per necessità di sintesi, all'interno di questo elaborato verrà realizzato un approfondimento nello specifico delle sole due aziende prese in esame per lo studio: *American Manganese Inc* e *Accurec*.

Tabella 1. Impianti e tecnologie di trattamento delle batterie a ioni di litio.

Tecnologia	Tipo di batterie	Processo	Locazione impianto	Quantità trattate (t/a)	TRL ¹
ACCUREC	Batterie ioni di litio	Pirometallurgico idrometallurgico	Germania	6000	8
BATREC	Batterie a ioni di litio	Pirometallurgico	Svizzera	400	8
Glencore Xstrata	Batterie al Nichel, al Cobalto, al Litio, NiMH	Pirometallurgico idrometallurgico	Canada	7000	8
Inmetco	Batterie al Litio, al Nichel	Pirometallurgico	USA	6000	8
UMICORE	Tutte le batterie	Pirometallurgico, idrometallurgico	Belgio	7000 ²	8
American Manganese Inc.	Batterie auto elettriche	Idrometallurgico	USA, Canada	3-5 t/gg (materiale catodico)	7
RECUPYL	Batterie al litio	Separazione meccanica, idrometallurgico	Francia	320	5
ENEA	Batterie al litio	Idrometallurgico	Italia		3
AKKUSER	Batterie al litio	Meccanico	Finlandia	4000	8
Foshan Bangpu Ni/Co High-Tech Co (Brunp)	Batterie al litio	Idrometallurgico	Cina	3600	8
LITHOREC	Batterie auto elettriche	Idrometallurgico	Germania		
Shenzhen green Eco-manufacturer Hi-tech Co (Gem)	Batterie al litio	Idrometallurgico	Cina	50.000 (20.000 Batterie auto elettriche)	8
SNAM	Batterie a ioni di litio	Pirometallurgico	Francia	300	8
Sony		Pirolisi, idrometallurgico	Giappone	150	5
TOXCO Inc./Retrive Technologies	Tutte le batterie	Idrometallurgico	Canada	4500	8

Fonte: Nostra elaborazione su dati Cutaia et al., 2018; Kushnir., D. 2015. Gli impianti evidenziati utilizzano trattamenti Closing the loop, processi a circuito chiuso, i metalli recuperati sono reimmessi nel mercato nella stessa catena produttiva per cui inizialmente erano stati progettati

¹ TRL: Technology Readiness Level, indica una metodologia per la valutazione del grado di maturità di una tecnologia

² 7000 t/a corrispondono a 35.000 batterie per veicoli elettrici.

3.2 Il processo di recupero RecycLiCO dell'American Manganese Inc.

L'America Manganese è una società mineraria e di riciclaggio di batterie agli ioni di litio nordamericana che ha come obiettivo principale quello di creare un'economia circolare attraverso il processo tecnologico da loro brevettato, RecycLiCO (figura 2).

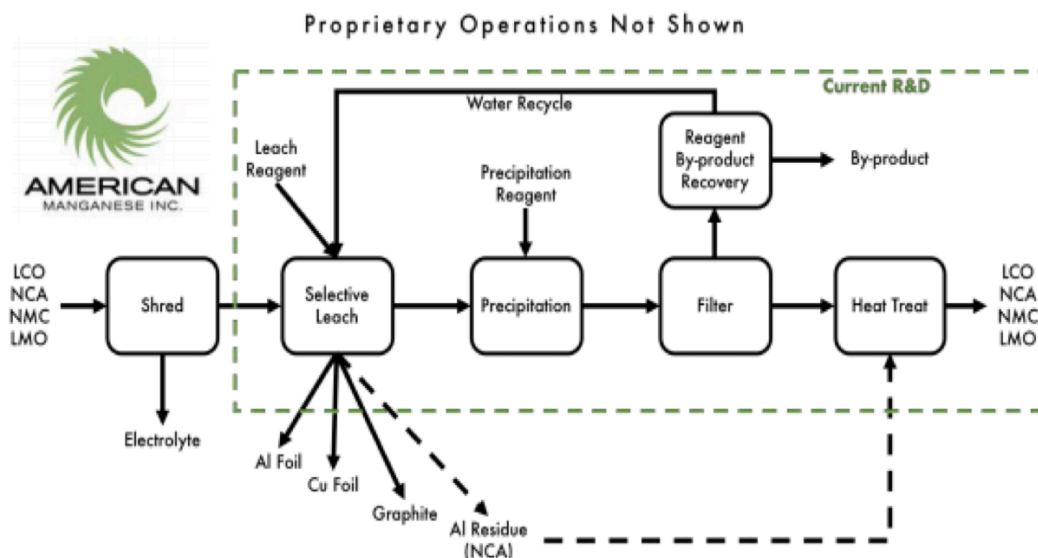


Figura 2. Processo idrometallurgico dell'American Manganese. Fonte: RecycLiCo Patented Process, 2020.

RecycLiCO è un processo idrometallurgico a circuito chiuso che utilizza una combinazione di reagenti in grado di fornire un'elevata estrazione di materiali all'interno del catodo. RecycLiCO è un processo per la rimozione e il riciclo dell'acqua del solfato di sodio e del ditionato di sodio, contenete liquori derivanti dalla lavorazione di materiale a base di cobalto essenzialmente privo di litio, la precipitazione del cobalto avviene come carbonato o idrossido di cobalto. In seguito si effettua la sua rimozione dal liquore, attraverso una cristallizzazione del solfato di sodio e rimozione dei cristalli, seguita dal riscaldamento dei cristalli a solfato di anidro di sodio. Il processo inizia con una separazione meccanica delle batterie esauste, il passaggio successivo prevede il loro trattamento con una serie di processi proprietari, al fine di produrre un materiale catodico attivo di elevata purezza.

Le batterie principalmente riciclate sono: NMC, NCA (111, 622, 811), LCO e LMO. Da cui vengono recuperati metalli come litio, nickel, cobalto, manganese e alluminio, con una capacità di riciclo di 3-5 tonnellate di materiale catodico giornaliero. Questa tecnologia è in grado di recuperare all'incirca il 95% dei matalli con una purezza vicina al 100%. Per le caratteristiche appena descritte, tale società è in grado di vendere materiali recuperati direttamente sul mercato della produzione di batterie in un'ottica di EC a prezzi più vantaggiosi (Tabella 2) (American Manganese Inc., 2018; Kushnir D., 2015).

Tabella 2. Scheda tecnologica RecyclLiCO - American Manganese Inc.

Processo utilizzato	Idrometallurgico
Technology Readiness Level	7
Capacità installata	Tra le 3-5 tonnellate al giorno di materiale catodico
Metalli recuperati	Metalli recuperati sotto forma di: $MnCo_3$; Li_2Co_3
Input	Batterie a ioni di litio: NMC 111; NMC 622; NMC 811; NCA; LCO; LMO.
Output	Ni; Co; Mn; Li; Al (Venduti).
Closing the loop	Si
Caratteristiche	Sistema idrometallurgico a circuito chiuso: Senza emissioni di gas serra; zero scarti in discarica; Basso consumo energetico; Riciclaggio d'acqua di processo e reagenti; Riduzione della dipendenza dalle materie prime di estrazione.

Fonte: Nostra elaborazione su dati ENEA e American Manganese, 2019.

3.3. Il processo di recupero EcoBatRec dell'Accurec Recycling GmbH

Accurec è una società tedesca di riciclaggio delle batterie usate per la gestione di materie prime secondarie. Ad oggi sono stati sviluppati due stabilimenti che recuperano tipologie di batterie differenti:

- il *Mulheim* dove vengono recuperate le batterie NiCd e NiMh;
- il *Krefeld* dove vengono recuperate batterie al litio primarie e secondarie.

Per quanto riguarda le batterie agli ioni di litio l'azienda utilizza un processo brevettato e sviluppato in collaborazione con Aquisgrana RWTH, EcoBatRec (figura 3).

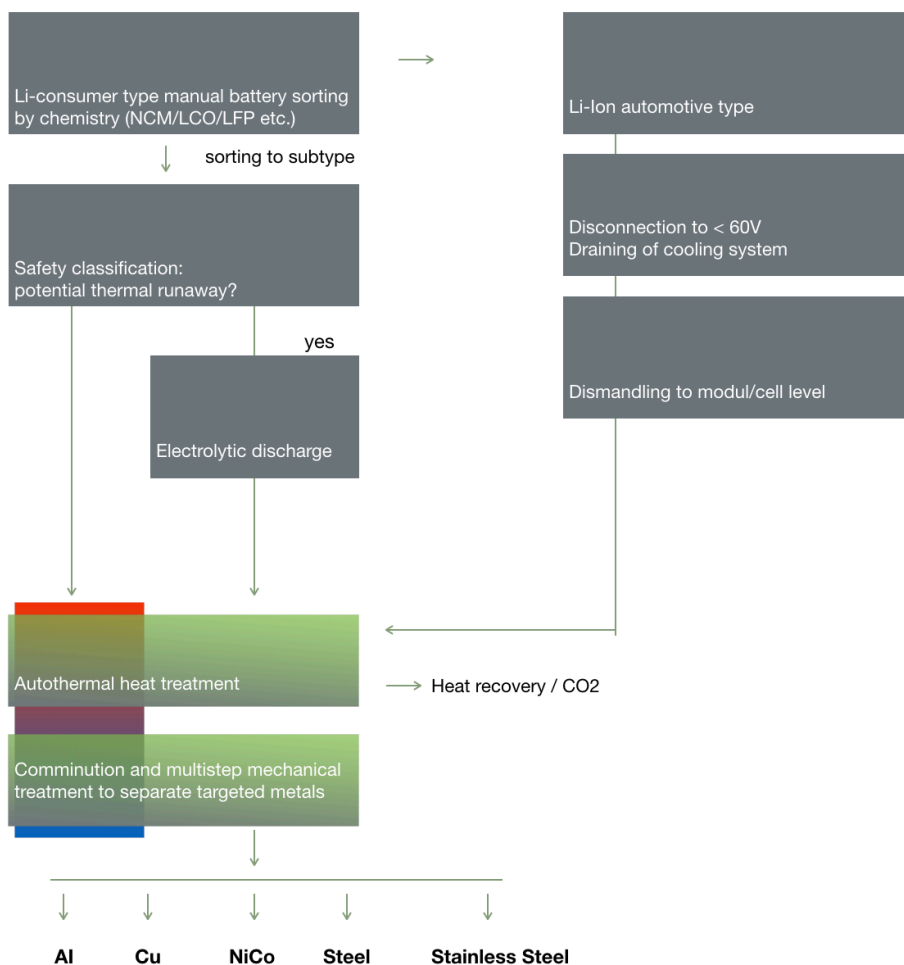


Figura 3. Processo di recupero di batterie agli ioni di litio di Accurec. Fonte: Accurec Recycling GmbH, 2020.

La tecnologia *EcoBatRec* recupera sia di batterie primarie che secondarie attraverso un mix di processi: pirolisi a vuoto e idrometallurgico. Il processo inizia da un primo smantellamento e smistamento degli accumulatori di energia e rimozione dei leganti organici (PVDF) attraverso un pretrattamento termico sotto vuoto. Metalli come ferro, alluminio e rame dopo una macinazione meccanica vengono separati magneticamente. In seguito si passa ad una pellettizzazione della frazione fine (<0,2 mm) che corrisponde al materiale dell'elettrodo. Durante il processo pirometallurgico, avviene una minimizzazione della grafite e fusione carbo-riduttiva. A questo stadio viene prodotta una lega di base di cobalto e un concentrato di litio, che subisce un trattamento idrometallurgico da acido solforico, carbonato di sodio e acqua. Il litio viene recuperato come carbonato, mentre un residuo è costituito da solfato di sodio. I metalli recuperati all'interno del catodo sono: cobalto, nickel, manganese, alluminio e acciaio inossidabile. La capacità massima raggiungibile dalla società è di 6000 tonnellate annuali di materiale catodico. Con il processo implementato Accurec è in grado di recuperare il 100% dei metalli che entrano come input nel forno, ma nonostante questo non è in grado di raggiungere una purezza elevata dell'output. Questo comporta, flussi in uscita, che non sono in grado di rientrare nel circuito della produzione delle batterie (Accurec Recycling GmbH, 2017; 2020; Kushnir, D., 2015; Recharge, 2018) (tabella 3).

Tabella 3. Scheda tecnologica EcoBatRec - Accurec Recycling GmbH.

Processo utilizzato	Pirometallurgico e idrometallurgico
Technology Readiness Level	8
Capacità installata	4000 tonnellate all'anno
Metalli recuperati	LiCO ₃ ; Co; Ni
Input	Batterie agli ioni di litio esauste
Output	Olio pirolisi (Utilizzato per l'autoconsumo). Fe-metalli (Fe, Ni): 18; Cu lega base: 9%; Alluminio: 2%; LiCO ₃ : 1% (Venduti), Frazione di lamina di elettrodo: 17% (Rigenerazione di batterie). Residui di solfato di sodio; Residui di plastica e parti allegate: 35% (Smaltiti).
Closing the loop	No
Caratteristiche	Massima sicurezza durante la lavorazione; Nessuna emissione di HF; Nessuna emissione di elettroliti pericolosi per l'ambiente; Quasi lo 0% di emissioni di gas di scarico; Basso consumo energetico; Massima sicurezza dei lavoratori sul lavoro: nessuna emissione di micro-polvere cancerogena Co/Ni nei luoghi di lavoro.

Fonte: Nostra elaborazione su dati Enea e Accurec Recycling GmbH, 2017.

4. LA BREAK EVEN ANALYSIS DEI PROCESSI DI RECUPERO DELLE MATERIE PRIME DA BATTERIE AGLI IONI DI LITIO: I CASI STUDIO DELL'AMERICAN MANGANESE E DELL'ACCUREC

4.1 Obiettivi e metodologia

Scopo della ricerca è realizzare una *break even analysis* dei processi di recupero di alcune delle principali materie prime presenti nelle batterie agli ioni di litio, attraverso i processi utilizzati dalle due società prese in esame: *American Manganese Inc.* e *Accurec Recycling GmbH*.

I criteri di selezione che hanno orientato la scelta verso le suddette realtà aziendali sono stati principalmente:

1. il grado di maturità (TRL) della tecnologia utilizzata;
2. l'utilizzo, da parte di queste, di due distinti processi di estrazione di TRL molto simili.

Per quanto riguarda il primo punto si è deciso di selezionare un livello di TRL superiore a 6, in quanto un punteggio inferiore non avrebbe permesso la costruzione di un modello applicabile al mercato, poiché si sarebbero prese in esame delle tecniche in fase troppo embrionale o di sperimentazione.

I criteri descritti nel secondo punto rappresentano invece la condizione necessaria per conferire profondità all'analisi attraverso un confronto tra i due processi principali attualmente utilizzati nel mercato del recupero delle materie prime delle batterie al litio: il processo idrometallurgico e pirometallurgico.

In questa ricerca uno degli obiettivi è quello di identificare quali sono le batterie agli ioni di litio nel settore dei VE più convenienti da recuperare per queste due società e, in seguito, di verificare come possono variare i profitti al variare della composizione di *input* inseriti nel sistema produttivo.

Inizialmente saranno ipotizzati due scenari per singola azienda:

- primo scenario: l'analisi viene realizzata tenendo conto che le società recuperano tutte le batterie abitualmente riciclate;
- secondo scenario: l'analisi viene realizzata scorporando dal calcolo le batterie risultanti meno remunerative, sulla base della loro composizione chimica, delle quantità riciclate e dei prezzi di vendita.

Una volta individuati i due scenari, per singola azienda sarà realizzato una *break even analysis* per entrambi gli scenari.

In vista, inoltre, delle potenzialità di crescita future del mercato dei VE, verrà analizzato il *trend* di crescita dei profitti di ogni singola azienda dal 2019 al 2022, tenendo conto sia del tasso di crescita percentuale futuro del mercato dei VE, si stima un incremento del 20% all'anno CAGR, (Mordor Intelligence, 2019), sia dei limiti di capacità installata delle tecnologie implementate dalle due aziende in esame.

Per ultimo verrà realizzato un confronto tra la società *American Manganese* e *Accurec*, per identificare le possibili differenze e potenzialità, al fine di valutare quale tra i due processi analizzati è in grado di garantire la competitività sul mercato nei prossimi tre anni, nel modo più efficiente possibile, a parità di flusso di materie prime immesse come *input* nel sistema.

Attualmente sono presenti sul mercato una molteplicità di batterie agli ioni di litio, che, nonostante abbiano le stesse funzionalità, differiscono nella composizione chimica, sia in termini di materiali, sia in termini di peso. Le attuali batterie elettriche solitamente sono identificate da una sigla che corrisponde ai componenti chimici presenti nel catodo e da un numero che indica in che rapporto stechiometrico sono le diverse componenti tra loro. Un esempio può essere dato dalla tecnologia NMC 622, la sigla indica che il catodo è composto da Nichel, Manganese e Cobalto, il numero sta a significare che al proprio interno la batteria contiene 6 parti di nickel, 2 parti di manganese e 2 parti di cobalto. L'innovazione tecnologica e le continue ricerche nel settore delle batterie hanno portato a repentini cambiamenti delle stesse per ridurre il peso e aumentarne l'efficienza, in modo da diminuire i costi di produzione e prolungare l'autonomia e le prestazioni dei VE. Per una migliore comprensione, nella tabella 4 vengono forniti in dettaglio quali sono le batterie presenti attualmente sul mercato dei VE e la composizione del catodo.

Tabella 4. Batterie agli ioni di litio presenti nel mercato dei VE

Tipologia di batteria	NMC: LiNiMnCoO ₂	LFP: LiFePO ₄	LCO: LiCoO ₂	LMO: LiMn ₂ O ₄	NCA: LiNiCoAlO ₂
-----------------------	--------------------------------	-----------------------------	----------------------------	--	--------------------------------

Composizione del catodo	Litio, nichel, manganese, cobalto e ossido.	Litio, fosforo e acciaio	Litio, cobalto e ossido.	Litio e manganese.	Litio, nichel, cobalto, alluminio e ossido.
-------------------------	---	--------------------------	--------------------------	--------------------	---

Fonte: Nostra elaborazione su Battery University, 2019.

Non essendovi informazioni più dettagliate sulla composizione delle batterie esauste, i dati della figura 4 saranno presi a riferimento come punto di partenza per individuare i quantitativi di metalli presenti nelle batterie recuperate dalle due società. La composizione chimica esaminata si riferisce esclusivamente a metalli quali: litio, cobalto, manganese, nichel, alluminio e acciaio, recuperati in misura diversa dalle due aziende prese a riferimento.

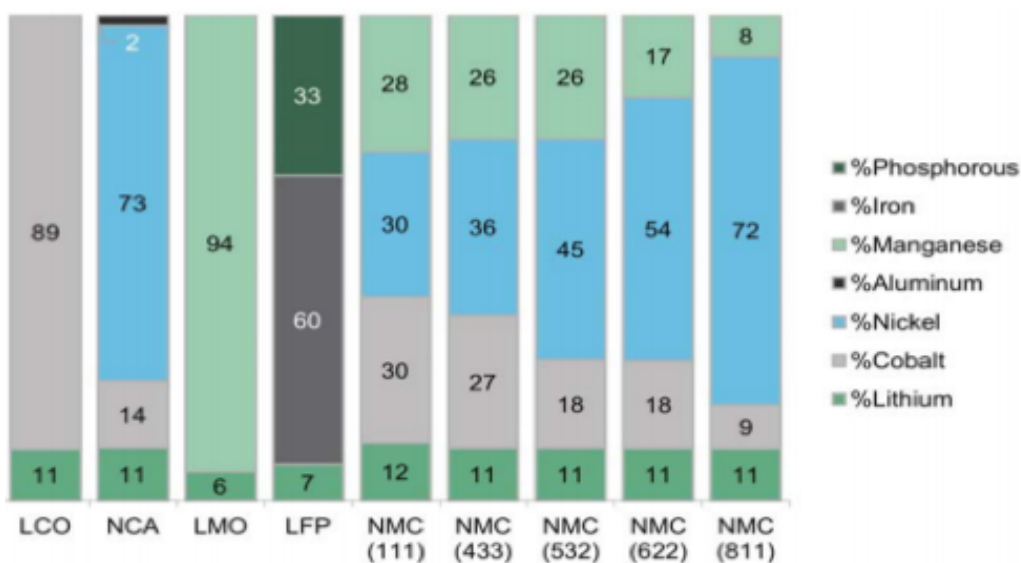


Figura 4. Composizione dei metalli delle batterie agli ioni di litio più diffuse sul mercato dei VE. Fonte: American Manganese, 2018. Company Business Plan.

Inizialmente, all'interno del modello sono state introdotte le seguenti condizioni:

- entrambe le società partono da una base minima di recupero di materiale catodico di 500 kg al giorno, contenente le stesse percentuali di metalli in base alla composizione e alla tipologia di batterie agli ioni di litio precedentemente raffigurate.
- Si è stabilita come valuta di riferimento l'euro¹.
- Le due realtà aziendali prese a riferimento dispongono giornalmente di un parco batterie eterogeneo, da cui possono attingere per recuperare metalli. Le tipologie di batterie recuperate da entrambe in questo settore sono le stesse, ad esclusione della tecnologia LFP, al momento non riciclata dall'American Manganese.
- I costi variabili di produzione non dipendono della tipologia di batteria trattata, ma variano solo in base al quantitativo in peso di materiale catodico trattato.

¹ Al 16 novembre 2019, il cambio dollaro euro è pari a 1,11 \$ (1 €=1,11 \$).

4.2 Analisi e valutazione del break even point del processo di recupero delle batterie agli ioni di litio di American Manganese Inc

I prezzi di vendita per singolo metallo sono riportati in tabella 5.

Tabella 5. Prezzi di vendita dei metalli per la società American Manganese Inc

Metalli	Prezzi (€/kg)
Litio	12,67
Cobalto	31,67
Manganese	1,82
Nichel	13,00
Alluminio	1,81

Fonte: American Manganese Inc., 2018.

Prendendo a riferimento la figura 4 e considerando che le batterie LFP non vengono recuperate, in tabella 6 sono riportate le percentuali di recupero di metalli contenuti nel catodo per singola tipologia di batteria.

Tabella 6. Percentuale di metalli recuperati giornalieri in base alla composizione delle batterie agli ioni di litio (American Manganese Inc.)

Tipologia di batteria	Litio %	Cobalto %	Manganese %	Nichel %	Alluminio %
NMC 111	11	29	27	29	/
NMC 433	10	26	25	34	/
NMC 532	10	17	25	43	/
NMC 622	10	17	16	51	/
NMC 811	10	9	8	68	/
NCA	10	13		69	2
LCO	10	85	/	/	/
LMO	6	/	89	/	/

Fonte: Nostra elaborazione su dati figura 4

Sulla base degli input presenti nelle tabelle 5 e 6 è stato calcolato il ricavo realizzabile giornalmente per ogni tipo di metallo (tabella 7), moltiplicando la percentuale recuperata all'interno di una specifica batteria per il suo prezzo e per il quantitativo in kg stimato.

Tabella 7. Ricavi giornalieri per tipologia di batteria per 1 kg di materiale catodico riciclato

Tipologia di batteria	Litio (€)	Cobalto (€)	Manganese (€)	Nichel (€)	Alluminio (€)	Totale Ricavi (€)
LCO	1,32	26,78	/	/	/	28,10
NCA	1,32	4,21	/	9,02	0,04	14,59
NMC 111	1,44	9,03	0,48	3,71	/	14,34

NMC 433	1,32	8,12	0,45	4,45	/	14,34
NMC 622	1,32	5,42	0,29	6,67	/	13,70
NMC 811	1,32	2,71	0,14	8,89	/	13,06
NMC 532	1,32	5,42	0,45	5,56	/	12,74
LMO	0,72	/	1,62	/	/	2,34

Fonte: Nostra elaborazione

In seguito, è stato calcolato il ricavo medio giornaliero ottenibile dal recupero di un kg di metalli presenti nelle batterie agli ioni di litio recuperati e moltiplicato per le quantità produttive giornaliere stimate: prezzo medio di 14,40 €/kg (tabella 8).

Tabella 8. Ricavi giornalieri sulla base dei metalli recuperati (American Manganese)

Metalli recuperati (kg/gg)	Ricavi per kg di metalli venduti
500	€ 7.200,00
1000	€ 14.400,00
1500	€ 21.600,00
2000	€ 28.800,00
2500	€ 36.000,00
3000	€ 43.200,00
3500	€ 50.400,00
4000	€ 57.600,00
4500	€ 64.800,00
5000	€ 72.000,00

Fonte: Nostra elaborazione

I costi fissi e variabili giornalieri sono stati forniti direttamente dalla società, attraverso il *business plan*. All'interno della società sono attualmente presenti 15 dipendenti, la cui giornata lavorativa si svolge in 8 ore con una retribuzione oraria di 40,66 €. Anche in questo caso i costi per dipendenti, utilities e amministrativi sono stati raccolti direttamente dal *business plan* della società. Mentre il costo di prodotto fa riferimento al costo che l'azienda deve sostenere per acquistare le batterie esauste presenti sul mercato.

Tabella 9. Costi fissi e costi variabili giornalieri della società American Manganese

Costi fissi (€/gg)	
<i>Dipendenti</i>	4886,40
<i>Amministrativi</i>	2687,46
<i>Utilities</i>	381,86
Costi variabili (€/kg)	
<i>Costo di prodotto</i>	4,07
<i>Reagenti</i>	0,91

Fonte: American Manganese Inc., 2018

Sulla base dei dati raccolti precedentemente descritti e individuando la capacità massima installata

per questa società di 5 tonnellate di materiale catodico recuperato giornalmente, è stata realizzata una break even analysis prendendo in considerazione il primo scenario.

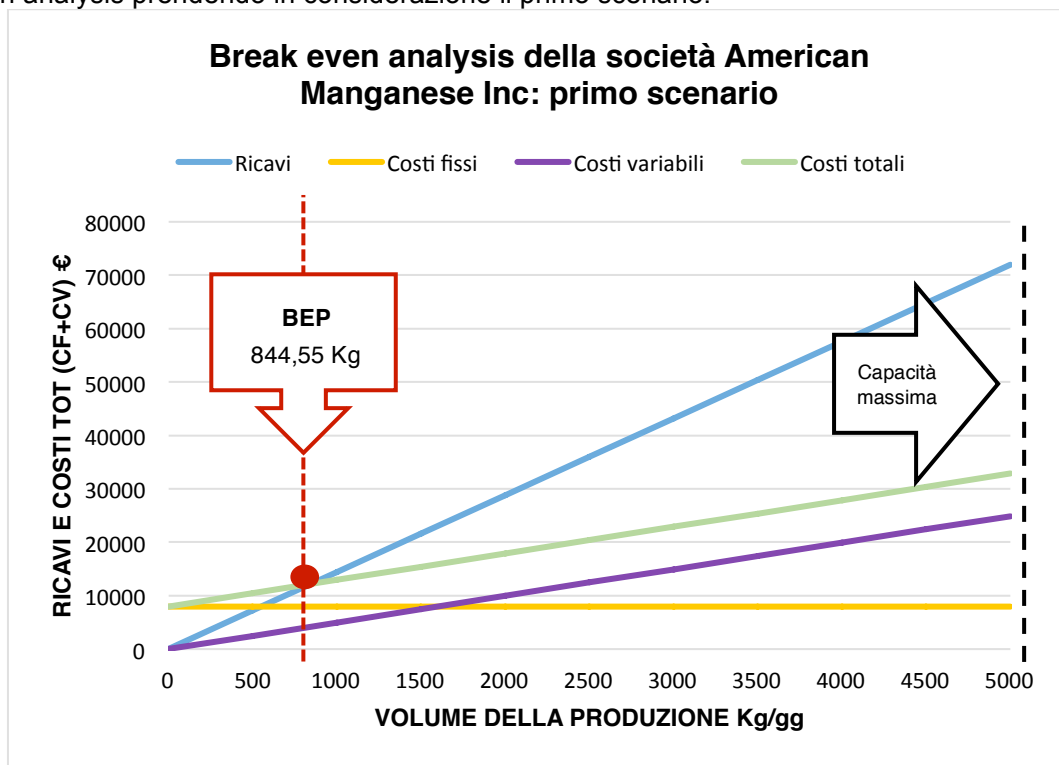


Grafico 1. Analisi del break even point società American Manganese Inc. Fonte: Nostra elaborazione

Il punto di pareggio tra costi e ricavi viene raggiunto con la vendita di 844,55 kg di materiali recuperati. In seguito dall'osservazione della tabella 5 è stato individuato come le batterie LCO siano le più remunerative per questa società (28 €/kg).

In questo caso l'azienda nel lungo periodo, man mano che il mercato dei VE comincerà a saturarsi, potrà approvvigionarsi di batterie più remunerative, scorporando in seguito quelle che pesano ad oggi negativamente sull'intero sistema produttivo.

Partendo da questo presupposto si ipotizza un secondo scenario, in cui viene scorporata dall'analisi di *break even* la batteria LMO risultante dalla tabella 6 la meno remunerativa. Attraverso quest'operazione è possibile notare come il prezzo medio per kg di materiale venduto subisce un incremento a 15,88 € rispetto ai 14,19 € calcolati per il primo scenario (tabella 10).

Tabella 10. Ricavi giornalieri della società American Manganese Inc. per il secondo scenario

Metalli recuperati (kg/gg)	Ricavi per kg di metalli venduti
500	€ 7.940,00
1000	€ 15.880,00
1500	€ 23.820,00
2000	€ 31.760,00
2500	€ 39.700,00
3000	€ 47.640,00
3500	€ 55.580,00
4000	€ 63.520,00

4500	€ 71.460,00
5000	€ 79.400,00

Fonte: Nostra elaborazione

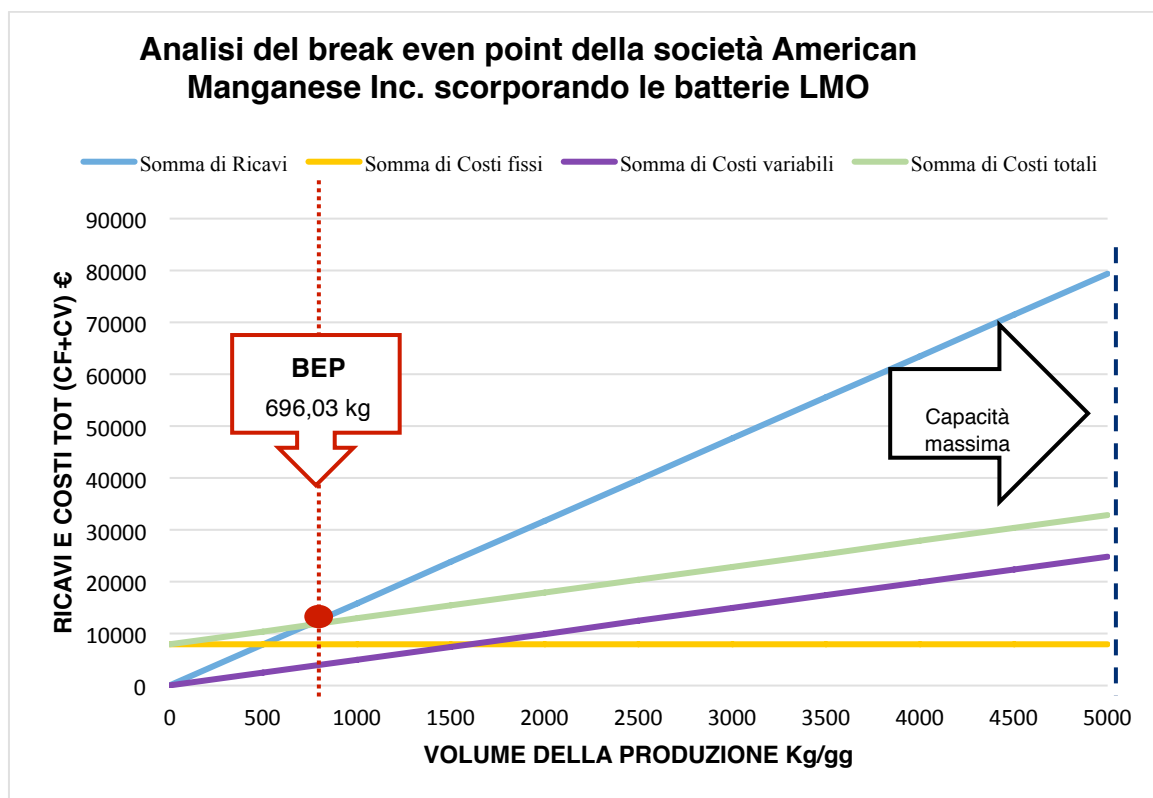


Grafico 2. Analisi del break even point della società American Manganese Inc. per il secondo scenario. Fonte: Nostra elaborazione

Attraverso l'analisi di *break even* per il secondo scenario, il punto di pareggio viene raggiunto a 696,03 kg di materiale venduto, dato che si differenzia rispetto al primo scenario in cui il punto di pareggio è raggiunto a 844,55 kg (grafico 1). È possibile osservare come la società, eliminando dal flusso di *input* le batterie LMO, possa raggiungere un punto di pareggio a livelli di produzione minori, ottenendo una remunerazione maggiore.

4.3 Analisi e valutazione del break even point del processo di recupero delle batterie agli ioni di litio di Accurec

Ai fini della ricerca lo studio si è focalizzato esclusivamente sullo stabilimento *Krefeld*, delimitando l'analisi alle sole batterie agli ioni di litio secondarie. Il processo di pirolisi a vuoto, adottato da *Accurec*, in cui i metalli vengono recuperati tramite fusione, non permette di recuperare il litio o comunque di non recuperarlo in modo da poter ottenere un'alta qualità per conservarne il suo valore intrinseco. In questo caso il litio viene perso durante il processo di riciclo non possedendo le caratteristiche chimiche in grado di resistere alle alte temperature. Inoltre, non essendo *Accurec* in grado di raggiungere livelli di qualità dei metalli recuperati alle percentuali ottenute dalla sua *competitor*, i prezzi di vendita sono condizionati dal punto di incontro tra la domanda e l'offerta sui mercati di riferimento (tabella 11).

Tabella 11. Prezzi di vendita di Accurec

Metalli	Prezzi (€/kg)
Cobalto	30,00
Nichel	12,90
Manganese	1,82
Alluminio	1,82
Acciaio inossidabile	2,025

Fonte: nostra elaborazione su dati Pricepedia, 2019, London Metal Exchange Nickel, 2019, American Manganese Inc, Mano Mano, 2019 e Alibaba 2019.

Di seguito (tabella 12) sono riportate le percentuali dei metalli recuperati giornalieri per ogni singola tipologia di batteria.

Tabella 12. Percentuale di metalli recuperati giornalieri in base alla composizione delle batterie agli ioni di litio

Tipologia di batteria	Litio %	Cobalto %	Manganese %	Nichel %	Alluminio %	Acciaio inox %
NMC 111	/	30	28	30	/	/
NMC 433	/	27	26	36	/	/
NMC 532	/	18	26	45	/	/
NMC 622	/	18	17	54	/	/
NMC 811	/	9	8	72	/	/
NCA	/	14	/	73	2	/
LCO	/	89	/	/	/	/
LMO	/	/	94	/	/	/
LFP	/	/	/	/	/	60

Fonte: Nostra elaborazione su figura 4

Anche per la società *Accurec*, sulla base degli *input* presenti nelle tabelle 11 e 12, la percentuale di metallo recuperata all'interno di una specifica batteria è stata moltiplicata per il suo prezzo e per il quantitativo in kg stimato.

Tabella 13. Ricavi giornalieri per tipologia di batteria per 1 kg di materiale catodico riciclato

Tipologia di batteria	Cobalto (€)	Manganese (€)	Nichel (€)	Alluminio (€)	Acciaio Inox (€)	Totale Ricavi (€)
LCO	26,70	/	/	/	/	26,70
NCA	4,20	/	9,42	0,04	/	13,65
NMC 111	9,00	0,51	3,87	/	/	13,38
NMC 433	8,10	0,47	4,64	/	/	13,22
NMC 622	5,4	0,31	6,97	/	/	12,68
NMC 811	2,70	0,15	9,29	/	/	12,13
NMC 532	5,40	0,47	5,81	/	/	11,68
LMO	/	1,71	/	/	/	1,71
LFP	/	/	/	/	1,22	1,22

Fonte: Nostra elaborazione

Lo stabilimento *Krefeld* conta 40 dipendenti, di cui 12 impiegati nel recupero delle batterie su cui si è concentrata la ricerca. Non sono disponibili dati riguardo gli stipendi retribuiti ai dipendenti per la società presa in esame. Quindi nel modello si suppone che lo stipendio giornaliero remunerato dall'*Accurec* per i suoi dipendenti sia lo stesso remunerato da America Manganese, lavorando entrambe nello stesso settore. Per quanto riguarda i costi fissi (amministrativi e utilities) al momento dell'analisi non disponibili, si ipotizza siano in linea con i costi fissi della società comparata (tabella 14). Il processo è alimentato da risorse differenti rispetto al processo di riciclaggio precedentemente esposto, prodotti come DMC, EC, CxHy e catrame da plastica vengono utilizzati per produrre un flusso di gasolio *Scrubber* e alimentare il forno in modo da raggiungere temperature vicino ai 400° C. Questa società non fornisce ulteriori informazioni riguardo ai quantitativi utilizzati di reagenti per kg di materiale riciclato, nella seconda fase, dedicata al processo idrometallurgico. Quindi non essendo possibile calcolare i costi variabili legati a questa fase, al fine di una contabilizzazione plausibile, si suppone che *Accurec* sostenga gli stessi costi di processo nell'utilizzo di reagenti per il recupero di un kg di materiale riciclato di America Manganese (0,91 €/kg).

Tabella 14. Costi fissi e costi variabili di Accurec

Costi fissi (€/gg)	
<i>Dipendenti</i>	3.909,12
<i>Amministrativi</i>	2500
<i>Utilities</i>	600
Costi variabili (€/kg)	
<i>Costo di prodotto</i>	3,6
<i>Dimetilcarbonato - DMC</i>	0,11
<i>Etilene di carbonato - EC</i>	0,14
<i>CxHy da plastiche</i>	0,0034
<i>Catrame da plastica</i>	0,56
<i>Reagenti</i>	0,91

Fonte: Nostra elaborazione e ACCUREC Recycling GmbH, Mülheim. EcoBatRec.

Prendendo a riferimento la tabella 13 è stato calcolato il ricavo medio giornaliero ottenibile dal recupero di un kg di metalli presenti all'interno degli accumulatori, moltiplicato per le quantità produttive giornaliere stimate: prezzo medio 11,82 €/kg.

Tabella 15. Ricavi giornalieri sulla base dei metalli recuperati di Accurec

Metalli recuperati (kg/gg)	Ricavi per kg di metalli venduti
500	€ 5.910,00
1000	€ 11.820,00
1500	€ 17.730,00
2000	€ 23.640,00
2500	€ 29.550,00
3000	€ 35.460,00
3500	€ 41.370,00

3745

€ 44.265,90

Fonte: Nostra elaborazione

Dal grafico tre è possibile osservare l'analisi grafica del *break even di Accurec* realizzata all'interno del primo scenario.

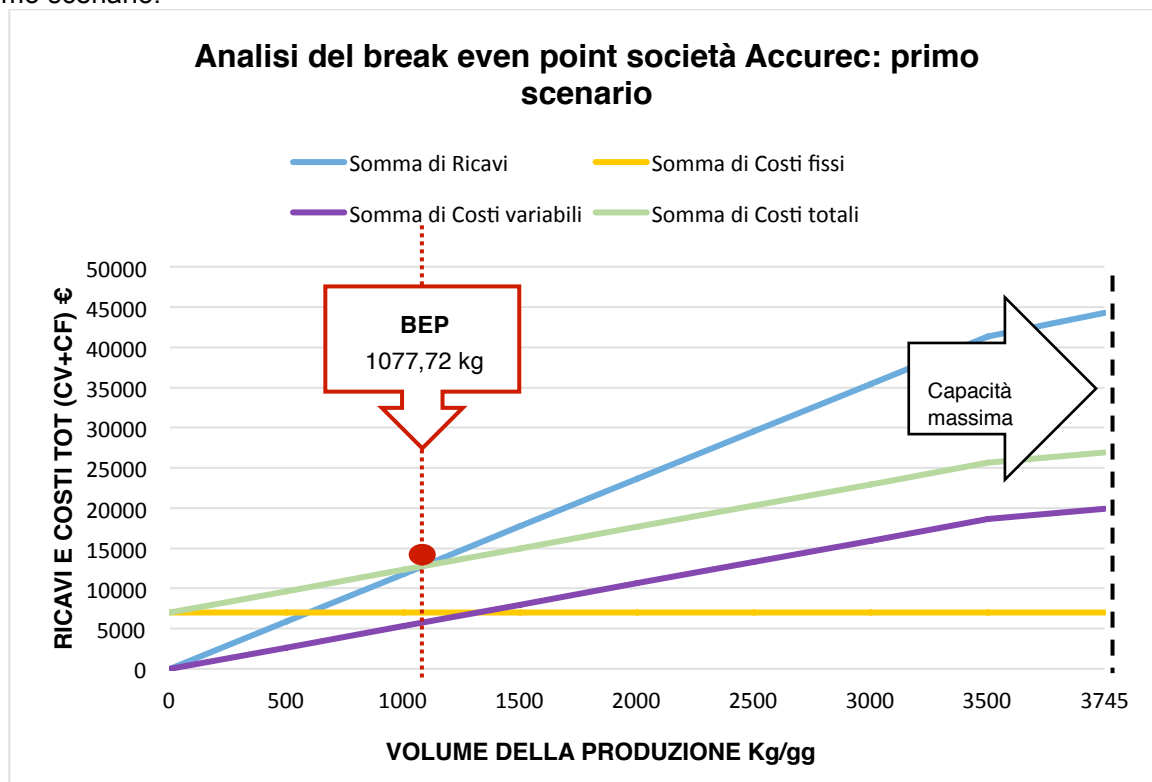


Grafico 3. Analisi del break even point della società Accurec. Fonte: Nostra elaborazione

L'azienda dichiara una capacità in grado di lavorare circa 4.000 tonnellate all'anno di batterie. Considerando che il peso del materiale catodico interno ad un modulo rappresenta circa il 34% del suo peso complessivo (peso 175 kg), si è applicata tale percentuale per inferire la quantità massima di materiale catodico riciclato giornalmente dall'azienda: 3745 kg. Il punto di pareggio tra costi e ricavi viene raggiunto con la vendita di kg di 1077,72 metalli recuperati.

Anche per questa società è emerso che la batteria più remunerativa in termini di recupero è la batteria LCO, mentre le batterie LMO e LFP sono risultate avere un'incidenza negativa sull'intera produzione. Di seguito è stato ipotizzato un secondo scenario scorporando dal comparto produttivo le batterie meno remunerative per verificarne un possibile aumento di efficienza. Il ricavo medio per kg riciclato passa da 11,82 € a 14,78 €. I ricavi giornalieri per il secondo scenario sono stati calcolati sulla base del nuovo ricavo medio, in cui non sono presenti le batterie LMO e LFP (tabella 16).

Tabella 16. Ricavi giornalieri di Accurec per il secondo scenario

Metalli recuperati (kg/gg)	Ricavi per kg di metalli venduti
500	€ 7.390,00
1000	€ 14.780,00
1500	€ 22.170,00
2000	€ 29.560,00
2500	€ 36.950,00

3000	€ 44.340,00
3500	€ 51.730,00
3745	€ 55.351,10

Fonte: Nostra elaborazione

Anche per Accurec è stata realizzata la *break even analysis* nell'ipotesi del secondo scenario.

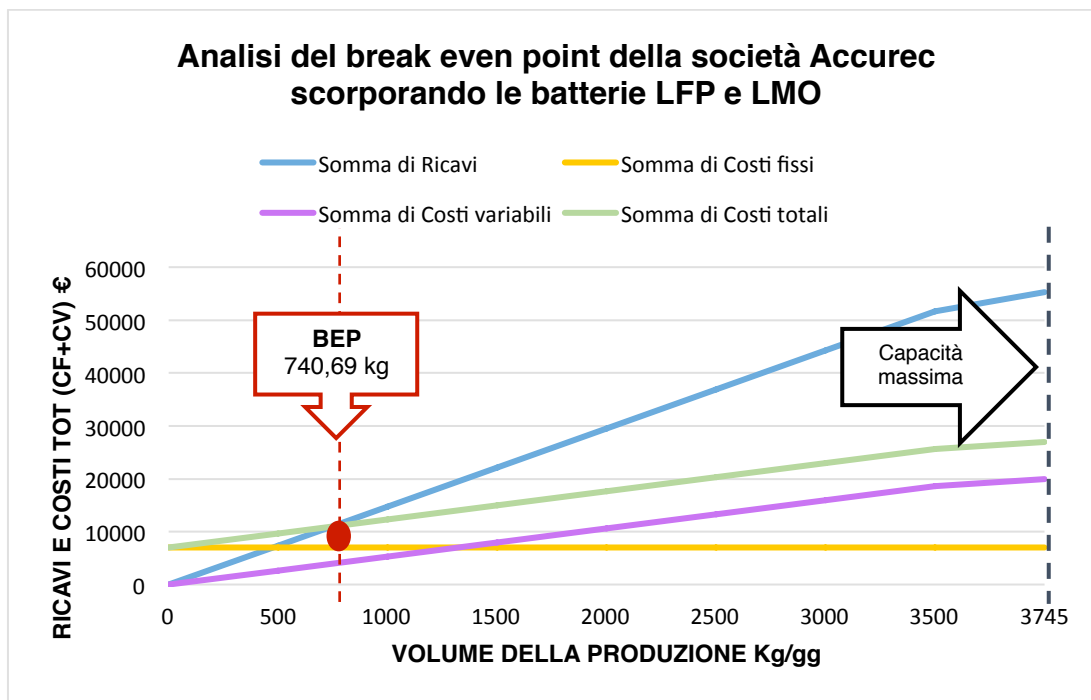


Grafico 4. Analisi del break even point della società Accurec per il secondo scenario. Fonte: Nostra elaborazione

Dai risultati di questo scenario si evince che il punto di pareggio tra costi e ricavi è raggiungibile con la vendita di 740,69 kg di metalli, rispetto ad un primo scenario, in cui l'incontro tra le due curve dei costi e dei ricavi si raggiunge ad una produzione di 1077,71 kg di metalli, con una differenza di 337 kg. Allo stesso tempo è evidenziabile un aumento di efficienza, dato dal raggiungimento del punto di pareggio ad un livello di produzione minore controbilanciato da un aumento dei ricavi.

5. RISULTATI E DISCUSSIONE

Sulla base dei dati raccolti e le ipotesi formulate nei paragrafi precedenti sono stati definiti i ricavi economici ottenibili dalle due realtà aziendali prese in esame. Nel primo scenario, i risultati dell'analisi di *break even* per le due società evidenziano come l'*America Manganese* sia in grado di raggiungere un punto di pareggio tra costi e ricavi a 844,55 kg di metalli venduti, diversamente da quanto accade per *Accurec*, il cui punto di pareggio è raggiunto dalla vendita di 1077,72 kg. Il vantaggio competitivo è spiegato dall'alta percentuale di purezza dei materiali riciclati ottenuta dalla prima, che è in grado così di vendere sul mercato a prezzi più vantaggiosi rispetto alla sua *competitor*. *American Manganese* (A.M.), al contrario della sua *competitor*, adotta infatti un processo di recupero *closing the loop*, che le permette di raggiungere una qualità più elevata di materiali riciclati che rimette direttamente all'interno del circuito produttivo delle batterie. Vediamo quindi come la tecnologia adottata da A.M., per quanto registri un livello di TRL minore (TRL 7) rispetto a quella utilizzata da *Accurec* (TRL 8), presenti un vantaggio competitivo esprimibile in tre punti così sintetizzabili:

- purezza dei materiali estratti;
- quantità di materiale catodico giornaliero lavorato;
- capacità di recupero del litio.

Particolare interesse va posto sul terzo punto in quanto il litio è stato catalogato dall'UE un materiale vicino alla soglia minima di rischio di approvvigionamento; l'incapacità della tecnologia adottata da Accurec di recuperare tale metallo comporta una perdita sostanziale sul valore dell'intera produzione.

L'analisi proposta nel presente elaborato propone una possibile strategia che possa migliorare l'efficienza produttiva di entrambe le aziende. È stato dimostrato, infatti, che nelle due società, all'interno dei flussi in entrata, sono presenti a parità di costi, batterie meno remunerative: le LMO e le LFP. La lavorazione di quest'ultime pesa negativamente sul totale dei ricavi ottenibili dall'intera produzione. Come è possibile osservare dalla seconda analisi di *break even*, scorporando dal calcolo le batterie LMO per America Manganese e le batterie LMO e LFP per Accurec, si raggiunge per entrambe il *break even point* per volumi di vendita minori. Anche in questo scenario il vantaggio competitivo di America Manganese in termini di efficienza rimane indiscusso, ma è interessante notare come Accurec possa aumentare la propria efficienza del 45%, rispetto ad un aumento del 21% di America Manganese.

Tale tendenza viene confermata altresì confrontando le due società in un'ipotesi di crescita del mercato dei VE – tra il 2019 al 2022 - ad un tasso del 20% annuo.

Possiamo rilevare (grafico 5) che il processo di recupero di America Manganese rispetto a quello di Accurec ottiene maggiori profitti, pari all'incirca a 8.056.980 euro.

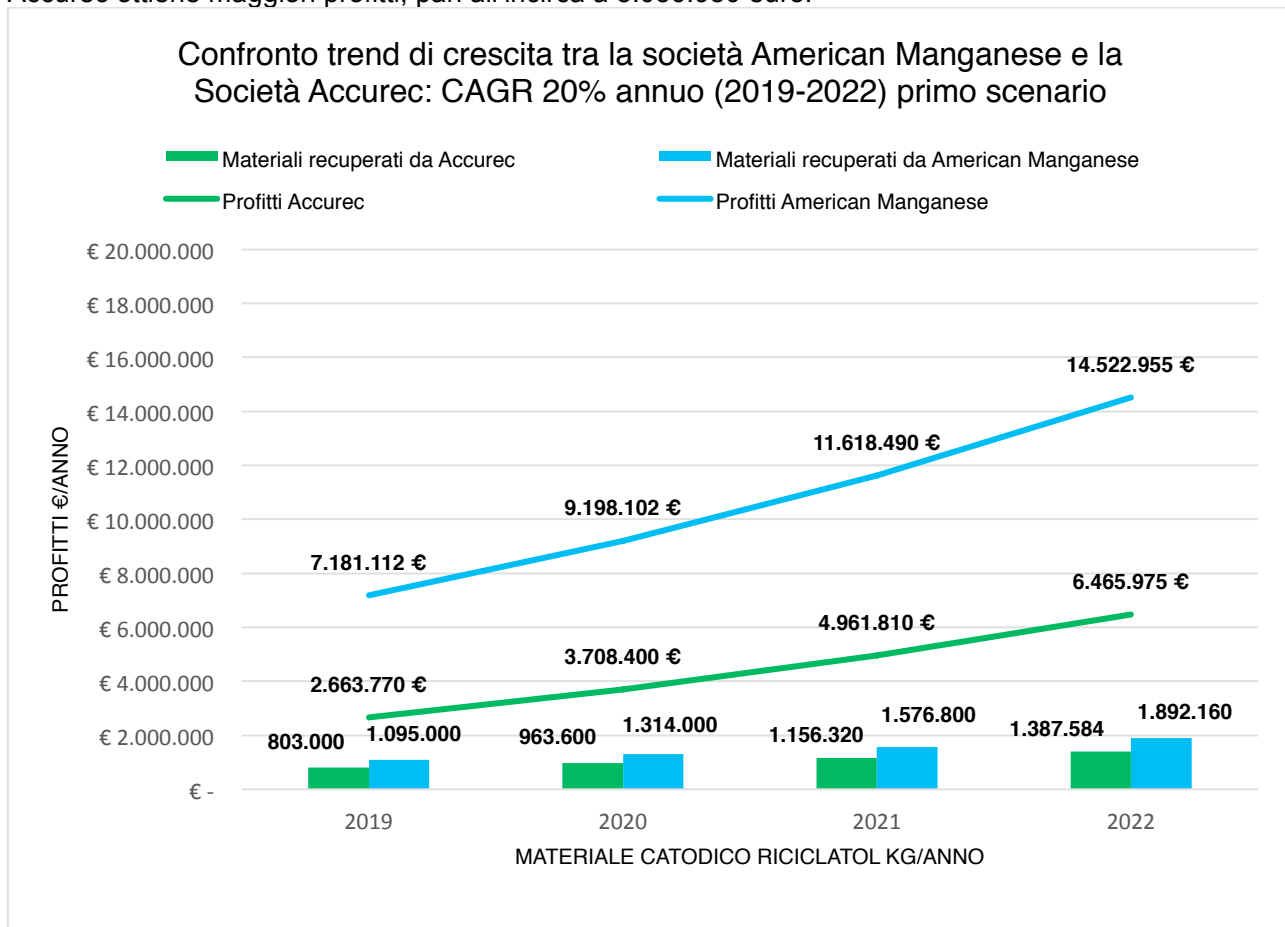


Grafico 5. Confronto della crescita dei profitti tra American Manganese ed Accurec, in base alla crescita del mercato dei VE: primo scenario. Fonte: Nostra elaborazione

Nel secondo scenario (grafico 6) è possibile osservare che la differenza tra le due società si riduce al 2022 all'incirca a 7.147.500 euro grazie ad una maggiore efficienza realizzata da Accurec.

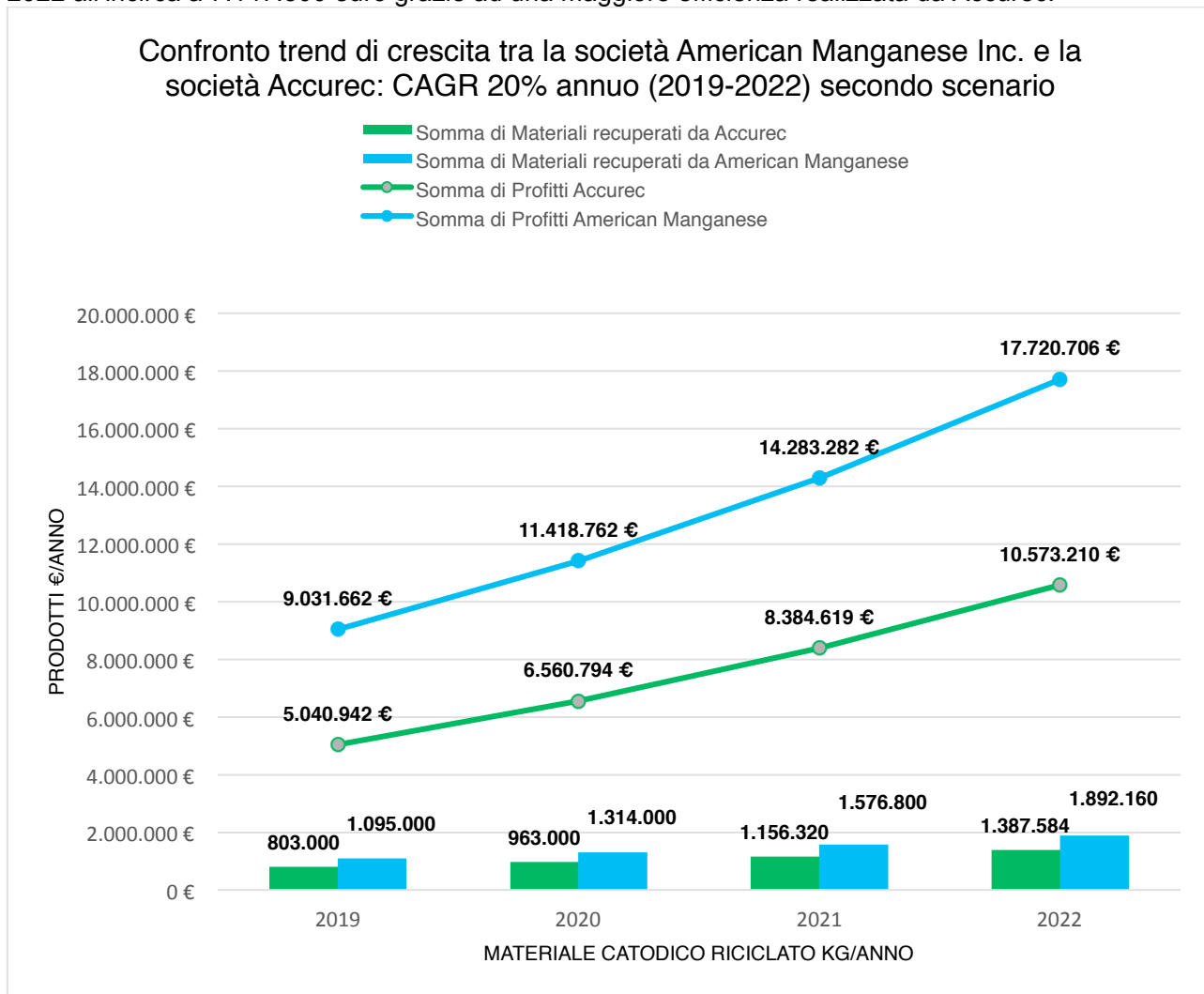


Grafico 6. Confronto della crescita dei profitti tra American Manganese ed Accurec, in base alla crescita del mercato dei VE: secondo scenario. Fonte: Nostra elaborazione.

Le società impegnate nel riciclo dei materiali ricevono sovvenzioni e agevolazioni fiscali da parte dello stato, il quale richiede di seguire linee guida sia sui criteri di recupero e sia sui quantitativi di materiali recuperati, in modo da raggiungere gli obiettivi prefissati all'interno del Piano d'azione per l'economia circolare e gli obiettivi stipulati all'interno degli accordi a livello globale. L'analisi si pone, quindi, l'obiettivo di indagare su un possibile futuro scenario, in cui il mercato dei VE dopo una grande fase di crescita su lungo periodo arriverà a un punto di saturazione e potrà permettersi di autosostenersi. Nel secondo scenario ipotizzato le aziende hanno la possibilità di approvvigionarsi delle batterie più remunerative e scorporare dalla produzione le batterie che incidono negativamente sul totale dei ricavi. Questo evidenzia che all'interno del sistema produttivo delle batterie agli ioni di litio siano presenti batterie meno remunerative come le batterie LMO e LFP e batterie che garantiscono livelli di ricavi maggiori come le batterie LCO.

Questo viene spiegato, in quanto, gli impianti di riciclo delle batterie sono progettati per recuperare determinati metalli per un carico specifico, se tali batterie non contengono o contengono in percentuali non significative i metalli per cui la tecnologia è stata creata, questo comporta una perdita di efficienza sulla produzione complessiva.

Va inoltre posto l'accento su un aspetto non trascurabile: quasi il totale dei ricavi ottenuti in entrambi gli scenari considerati è costituito da proventi legati al cobalto e al nickel, rispettivamente 55% e 34%, per un peso complessivo dell'89% sull'insieme dei ricavi. Data la presenza molto elevata di cobalto e nickel nelle tecnologie NMC, NCA e LCO, viene giustificato il loro riciclo dal punto di vista economico e di efficienza. Mentre le batterie LMO e LFP prive di questi metalli, non sono economicamente convenienti, per cui si propone un loro scarto dal processo di riciclaggio.

Infine, da quanto osservato nello studio realizzato e nell'eventualità che il cobalto continui ad essere metallo principale contenuto all'interno delle batterie agli ioni di litio, in uscita dallo *stock* delle miniere urbane, questa materia prima critica rappresenterà l'elemento trainante dell'intera filiera di riciclaggio.

6. CONCLUSIONI E SVILUPPI FUTURI

In questo studio sono state poste a confronto la società americana *American Manganese Inc.* e la società europea *Accurec*. Le due società hanno sviluppato al loro interno diverse tecnologie per il riciclaggio dei flussi di materie estraibili dai moduli contenuti nelle batterie di trazione: il processo pirometallurgico e idrometallurgico. Questi diversi processi sono stati analizzati e in seguito confrontati ipotizzando due scenari: il primo tiene conto che vengano recuperate tutte le batterie esauste, come dichiarato dalle società prese in esame ed il secondo scorpora dal processo di riciclaggio le batterie risultanti meno remunerative (LMO e LFP). Tale analisi è stata realizzata applicando il calcolo del *break even point* per entrambi i due scenari. Infine lo studio è stato arricchito con un'analisi previsionale del *trend* di crescita dei profitti delle due società in oggetto, prendendo a riferimento la crescita del mercato dei VE dal 2019 al 2022 (crescita annua del 20% CAGR).

Lo studio si designa come strumento di supporto alle decisioni per individuare la fattibilità e la profittabilità ad intraprendere un'attività di recupero nel settore delle batterie elettriche di trazione, e di poter individuare il processo che ad oggi garantisce di raggiungere il maggiore valore aggiunto, a parità di costi.

Dall'analisi del *break even point* è risultato come la società *American Manganese Inc.* sia in grado di raggiungere il punto di pareggio tra la curva dei costi e la curva dei ricavi ad una produzione minore (844,55 kg) rispetto alla società *Accurec* (1077,71 kg), sia nel primo che nel secondo scenario.

In relazione, quindi, agli obiettivi della ricerca di indagare quali fra le tecnologie prese in esame sia in grado di raggiungere le migliori prestazioni sia in termini di vantaggio competitivo sia di maggiore efficienza, è possibile concludere che il processo idrometallurgico di ultima generazione implementato dall'*American Manganese Inc.* sia quello che restituisce migliori risultati. Questo risultato positivo è verificabile sia per il primo che per il secondo scenario. Prendendo a riferimento la crescita dei volumi di produzione per entrambe le due società in relazione alla crescita del mercato dei VE, la società *American Manganese Inc.*, risulta raggiungere nel lungo periodo profitti maggiori della sua *competitor*, distanziandosi nel primo scenario, di 8.056.970 € al 2022.

A fronte del raggiungimento degli obiettivi di riduzione di CO₂ in atmosfera stipulati dalle Nazioni durante la COP 21 e degli investimenti effettuati dalle più grandi case automobilistiche, nel corso dei prossimi anni si assisterà ad un incremento senza precedenti dei veicoli elettrici. Tale incremento, si tradurrà in un aumento degli *stock* di materie prime conservate negli autoveicoli elettrici, le quali a fine vita rientreranno in circolo nel mercato delle materie seconde. I veicoli elettrici, quindi, possono considerarsi una preziosa fonte di ricchezza di risorse secondarie come cobalto, nichel, litio, manganese, per quei Paesi che dipendono dall'esterno per il loro approvvigionamento. L'andamento positivo di crescita delle batterie di trazione, immagazzinate all'interno di miniere urbane in circolazione, permetterà di accrescere e assicurare volumi elevati di produzione per le due società prese in esame. Entrambe le aziende, come stimato nel presente lavoro, vedranno aumentare i loro profitti con una crescita lineare, fino a raggiungere la massima capacità installata nell'anno 2022.

È comunque difficile prevedere cosa accadrà dopo il 2022, molto dipenderà dagli ulteriori sviluppi delle tecnologie e dalle modifiche che verranno apportate alla composizione chimica delle batterie.

Nella tecnologia di ultima generazione, la batteria NMC 811 (8 parti di Nichel, 1 parte di Manganese e 1 di Cobalto), si evidenzia una tendenza a ridurre la presenza di cobalto (materia prima critica) all'interno della stessa. Come si evince dallo studio, il cobalto costituisce il 55% dei ricavi ottenibili dal sistema di riciclaggio in questo settore e la diminuzione di questo metallo rappresenterà una problematica non indifferente per le società che vi hanno investito, in quanto attualmente rappresenta l'elemento trainante.

È importante sottolineare, inoltre, che la quasi totalità dei giacimenti di cobalto sono allocati nella Repubblica Democratica del Congo, Paese con diverse problematiche di instabilità politica e mancanza di leggi sullo sfruttamento del lavoro. Queste problematiche sono comuni anche ad altri metalli presenti nelle batterie.

Lo scenario presentato tiene conto solamente di una risoluzione del problema a valle: sviluppare le migliori tecnologie che si adattino al meglio ai cambiamenti repentini per aumentare le economie di scala e ridurre al minimo i rischi di inquinamento ambientale provenienti da una cattiva gestione dei materiali nei sistemi di raccolta e di smantellamento delle batterie esauste. Dall'analisi di tali problematiche si vuole proporre una visione differente di approccio al problema, che prenda in considerazione una soluzione alternativa, riprogettando il sistema partendo dalle origini, non solo cercando di limitare i danni, ma seguendo un approccio di *life cycle thinking*, in cui viene ripensata l'intera filiera produttiva. Partendo dal primo anello della *value chain*:

- il *design* delle batterie andrebbe riprogettato in modo da facilitarne il loro recupero, fornendo allo stesso tempo la possibilità a fine vita di recuperare con minore complessità più materiali possibili con un sistema standardizzato, che non richieda grossi investimenti o elevati costi di processo;
- migliorare il sistema di raccolta delle batterie a fine vita, per facilitarne a livello logistico l'approvvigionamento;
- fornire una maggiore chiarezza sulla normativa dei rifiuti, la raccolta e il riciclo dei materiali;
- favorire la creazione e lo sviluppo di un mercato delle materie prime seconde stabile, affinché sia realizzabile una contrattazione delle materie secondarie recuperate trasparente e soggetta a leggi standardizzate a livello europeo;
- potenziare a livello sia nazionale che europeo la nascita di una industria di produzione delle batterie agli ioni di litio, competitiva a livello internazionale e che al contempo, possa dare la spinta per la nascita di una domanda interna di tali materie prime e la crescita e lo sviluppo dell'intera filiera circolare.

In conclusione quindi un'azione in questa direzione per il futuro, sarà necessaria in vista della crescita del mercato dei VE, che richiederà l'apporto sempre maggiore di quantità di metalli, estraendo le risorse non più solamente dalle *fixed stocks*, ma anche dalle *anthropogenic stocks*, collocate all'interno dei nostri confini. Favorendo in questo modo l'*urban mining* di materie prime e CRM secondarie delle batterie agli ioni di litio, una possibile azione di policy in un'ottica di economia circolare finalizzata a ridurre il rischio di approvvigionamento di alcune materie prime fondamentali per la nostra economia.

REFERENCES

Alibaba, 2019.

https://www.alibaba.com/trade/search?fsb=y&IndexArea=product_en&CatId=&SearchText=acciaio+inox. Ottobre 2019.

Accurec Recycling GmbH, 2020. <https://accurec.de/>

- Accurec Recycling GmbH, 2017. Abschlussbericht zum Verbundvorhaben. Demonstrationsanlage für ein kostenneutrales, ressourceneffizientes Processing ausgedienter Li-Ionen Batterien aus der Elektromobilität. EcoBatRec. Förderkennzeichen: 16EM1002. American Manganese Inc., 2018. Company business plan. A Critical Metals Company Focused on Recycling Electric Vehicle Lithium-ion Batteries. Updated: March 23, 2018. https://americanmanganeseinc.com/wp-content/uploads/2018/04/AMY_Business_Plan-March2018.pdf
- American Manganese Inc., 23 Marzo 2018a. A critical metals company focused on recycling electric vehicle lithium-ion batteries. https://americanmanganeseinc.com/wp-content/uploads/2018/04/AMY_Business_Plan-March2018.pdf
- American Manganese Inc., 2019b, Company Business Plan. https://americanmanganeseinc.com/wp-content/uploads/2019/10/AMY_BP-8_28_2019.pdf.
- American Manganese Inc., 2019c, *Making Lithium-ion Last Forever*, Presentation. https://americanmanganeseinc.com/wp-content/uploads/2019/08/AMY_Pitch_Deck-1.pdf.
- American Manganese Inc., 2020d. <https://americanmanganeseinc.com/>
- Battery University, 2019, Types of Lithium-ion. https://batteryuniversity.com/learn/article/types_of_lithium_ion.
- Cossu R. e Williams I.D., 2015, *Urban mining: Concepts, terminology, challenges*. Waste Management (45) 1-3.
- Cossou, R. Stergmann R., 2018, *Solid Waste Landfilling: Concepts, Process, Technology*.
- CM Solutions, 2015. <http://www.sagreenfund.org.za/wordpress/wp-content/uploads/2015/07/Lithium-Battery-Recycling-Literature-Review-CM-Solutions.pdf>. Settembre, 2019.
- European Commission, 2015. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS Closing the loop - An EU action plan for the Circular Economy. COM/2015/0614 final
- European Commission, 2017a. Study on the review of the list of critical raw materials. Final report. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/08fdb5f-9766-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en>
- European Commission, 2017b. Study on the review of the list of critical raw materials. Non-critical raw materials factsheets. <https://op.europa.eu/en/publication-detail/-/publication/6f1e28a7-98fb-11e7-b92d-01aa75ed71a1/language-en>
- European Commission, 2018. Report on Critical Raw Materials and the Circular Economy. http://publications.europa.eu/resource/cellar/d1be1b43-e18f-11e8-b690-01aa75ed71a1.0001.01/DOC_1
- European Commission, 2020. COMMUNICATION FROM THE COMMISSION TO THE EUROPEAN PARLIAMENT, THE COUNCIL, THE EUROPEAN ECONOMIC AND SOCIAL COMMITTEE AND THE COMMITTEE OF THE REGIONS A new Circular Economy Action Plan For a cleaner and more competitive Europe. COM/2020/98 final. <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/EN/TXT/?qid=1583933814386&uri=COM:2020:98:FIN>
- Cutaia L., La Monica M., Scagliarino C., Massacci G., Nania F. 2018. Analisi dei flussi e studio dei mercati reali e finanziari delle materie prime presenti negli autoveicoli elettrici e nelle colonnine di ricarica 2018. Report RdS/PAR2017/253.
- Cutaia L., Chiavetta C., Porta P.L., Brunori C., Coronidi M., Creo C., Andriola L., 2018. Mobilità elettrica sostenibile. Valutazione sostenibilità tecnologiche. Scenari di recupero di materie prime e CRM delle batterie per veicoli elettrici. Report RdS/PAR2017/525.
- London Metal Exchange, Nickel, 2019. <https://www.lme.com/en-GB/Metals/Non-ferrous/Nickel#tabIndex=0>. Ottobre 2019.
- Mano Mano, 2019. <https://www.manomano.it/ricerca/alluminio>. Ottobre 2019.
- Mordor Intelligence, 2019. Electric vehicle market outlook – growth, trends, and forecast (2019 – 2024). <https://www.mordorintelligence.com/industry-reports/electric-vehicle-market-outlook>.
- Kushnir, D., 2015, Lithium Ion battery recycling technology 2015, Chalmers University of Technology. http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/230991/local_230991.pdf
- Pricepedia, Prezzi del litio su livelli da record, 2019.

<http://www.pricepedia.it/magazine/article/2019/05/29/prezzi-del-litio-su-livelli-da-record/>. Novembre 2019.

Recharge, 2018. The advanced Rechargeable & Lithium Batteries Association, The Batteries Report RecycLiCo Patented Process, 2020. <https://recyclico.com/>

Sicurauto.it, 2019, *Smaltimento batterie auto elettriche e ibride: modalità e costi*.

https://www.sicurauto.it/ricambi-e-accessori/tecnica-e-manutenzione/smaltimento-batterie-auto-elettriche-e-ibride-modalita-e-costi/?refresh_ce-cp. Ottobre, 2019.

Squicciarino, V., 2020. Economia Circolare e Urban Mining: Analisi costi-benefici del recupero di materie prime critiche attraverso tecnologie per il riciclaggio delle batterie agli ioni di litio dei veicoli. Elettrici. Tesi di Laurea magistrale in Tecnologie e gestione dell'innovazione, Facoltà di Economia, Università degli Studi di Roma "La Sapienza".