



POLITECNICO
MILANO 1863

DIPARTIMENTO
DI MECCANICA

SOLUZIONI PER LA RIMOZIONE DI RIFIUTI DI BATTERIE E PICCOLI RAEE DAI RIFIUTI INDIFFERENZIATI: TECNOLOGIE, COSTI E DRIVER

Marco Papetti, Songshitobrota Kumar, Marcello Colledani, Laura Mascheretti, Laura Melandri

Erion
Energy

Erion
Weee

Indice

1.	Introduzione	3
1.1.	Obiettivo dell'attività	3
1.2.	Il contesto Europeo	4
2.	La filiera dell'indifferenziato.....	6
3.	Use Case (Ecologia Viterbo):.....	8
3.1.	Descrizione dell'impianto.....	8
3.2.	Descrizione del processo produttivo e bilancio di massa	8
3.3.	Soluzioni proposte.....	12
3.3.1.	Ricezione del materiale	12
3.3.2.	Ispezione e identificazione.....	13
3.3.3.	Separazione	16
3.3.4.	Configurazioni suggerite per Ecologia Viterbo.....	21
3.4.	Valutazione economica	26
3.4.1.	Sintesi economica e contestualizzazione nel modello di business	28
3.4.2.	Estensione al caso nazionale	29
4.	Conclusioni	31
5.	Ringraziamenti.....	32
	Elenco delle Figure.....	33
	Elenco delle Tabelle	33
	Bibliografia.....	35

1. Introduzione

Il miglioramento delle performance di raccolta e riciclo dei rifiuti urbani rappresenta una delle principali sfide per il raggiungimento degli obiettivi europei di economia circolare. Negli ultimi anni, l'attenzione si è concentrata soprattutto sul rafforzamento della raccolta differenziata, sulla sensibilizzazione dei cittadini e sull'ampliamento delle infrastrutture dedicate al conferimento dei diversi flussi di rifiuto. Tuttavia, una quota non trascurabile di materiali potenzialmente recuperabili continua a confluire nel rifiuto urbano indifferenziato, sfuggendo ai canali ufficiali di raccolta e rendendo più complessa la piena valorizzazione delle risorse contenute nei prodotti a fine vita.

La composizione media del Rifiuto Urbano Residuo (RUR), infatti, mostra la presenza massiva di imballaggi di plastica, tessile, legno, Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) e Rifiuti di Batterie. I RAEE e i Rifiuti di Batterie non sono tipicamente oggetto di raccolta domiciliare ma sottintendono la presenza di un sistema di raccolta visibile e capillare e la conoscenza delle opzioni di conferimento da parte del cittadino. Essi rivestono inoltre un ruolo particolarmente rilevante perché, da un lato, contengono materiali di interesse strategico – come materie prime critiche la cui dispersione comporta una perdita ambientale ed economica – dall'altro, la presenza di batterie, in particolare al litio, sfuse o contenute all'interno dei RAEE, potrebbe generare criticità operative e di sicurezza lungo la filiera di trattamento del RUR, soprattutto nelle fasi di movimentazione, triturazione e separazione meccanica.

Lo studio condotto da Erion nel 2025 *“Il potenziale inespresso nel rifiuto indifferenziato”* [1] ha permesso di stimare la presenza residua di RAEE e Rifiuti di Batterie all'interno del RUR. L'analisi, basata sui dati storici relativi ai campionamenti condotti da IPLA e integrata con 38 nuove analisi merceologiche effettuate in 15 città italiane distribuite tra Nord e Centro-Sud, ha evidenziato la presenza media di 1,98 kg/abitante/anno di RAEE e 0,12 kg/abitante/anno di rifiuti di batterie nel rifiuto indifferenziato. Tali quantitativi corrispondono rispettivamente all'1,04% e allo 0,06% in peso del flusso analizzato.

Il dato assume particolare rilevanza se confrontato con i quantitativi attualmente intercettati attraverso i canali ufficiali di raccolta. Per i raggruppamenti RAEE R4 e R5 (piccoli RAEE e sorgenti luminose), il tasso di raccolta risulta pari a circa il 17%, mentre per i rifiuti di batterie portatili si attesta intorno al 25%. Considerando la possibilità di intercettare e rimuovere le frazioni di tali rifiuti presenti nel RUR, questi valori potrebbero aumentare in modo significativo, raggiungendo rispettivamente il 37% per i RAEE e il 52% per i rifiuti di batterie portatili. Pur trattandosi di una stima, questi risultati hanno mostrato come il rifiuto indifferenziato contenga quantitativi non marginali di flussi che, se correttamente separati, potrebbero contribuire al miglioramento delle performance complessive di raccolta e gestione. Per poter aumentare i tassi di raccolta di questi due flussi di rifiuto, e avvicinarsi al target posto dall'UE (45% per i Rifiuti di Batterie e 65% per i RAEE), si può agire sia sensibilizzando e formando il cittadino riguardo ai diversi canali possibili di conferimento, sia valutando strategie complementari, capaci di intervenire a valle della raccolta, nei punti in cui il rifiuto urbano residuo viene già concentrato e trattato, attraverso tecnologie di identificazione specifica e di separazione automatica.

1.1. Obiettivo dell'attività

Il presente studio nasce con l'obiettivo di approfondire la possibilità di rimozione di Rifiuti di Batterie e piccoli RAEE dal RUR, affrontandola non solo come problema tecnologico ma anche come innovazione di filiera. In tal senso, sono stati considerati: l'accessibilità dei materiali target all'interno del flusso, la fase del processo in cui intervenire, la capacità delle tecnologie di identificare gli oggetti in un materiale stratificato e contaminato, la modalità di separazione, la qualità del flusso intercettato e la sostenibilità economica dell'investimento.

Per questa analisi, lo studio si concentra sulle possibili soluzioni applicabili in un impianto di Trattamento Meccanico Biologico (TMB), utilizzando il caso di Ecologia Viterbo come banco di prova per valutare l'applicabilità industriale di un sistema di pretrattamento dedicato e per stimare l'impatto economico di una soluzione simile.

L'analisi si focalizza sulle principali fasi necessarie alla rimozione dei flussi target: preparazione del materiale, identificazione mediante sistemi di ispezione e riconoscimento, separazione attraverso soluzioni manuali, automatiche o ibride. Le alternative tecnologiche vengono confrontate rispetto a criteri quali: efficacia di intercettazione, purezza del flusso separato, facilità di integrazione, ingombri, sicurezza e costi.

L'obiettivo finale non è proporre la sostituzione delle raccolte dedicate, che devono essere il canale preferenziale per una corretta gestione dei RAEE e dei Rifiuti di Batterie, ma valutare se, e a quali condizioni, una rimozione a valle possa rappresentare uno strumento complementare. Tale approccio potrebbe contribuire a ridurre la dispersione di rifiuti ad alto valore, migliorare la sicurezza degli impianti di trattamento e fornire elementi utili per lo sviluppo di future strategie di raccolta, monitoraggio e finanziamento dei flussi non correttamente intercettati.

1.2. Il contesto Europeo

La presenza di rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche e rifiuti di batterie nel rifiuto urbano indifferenziato non rappresenta una criticità esclusivamente italiana. In diversi Paesi europei, analisi merceologiche e studi promossi da enti pubblici o dai Consorzi (Producer Responsibility Organisations - PROs) hanno evidenziato la presenza di frazioni ad alto valore all'interno del rifiuto urbano residuo, confermando che una quota di questi flussi continua a sfuggire ai sistemi ufficiali di raccolta.

Il quadro europeo, tuttavia, risulta ancora eterogeneo. Alcuni Paesi dispongono di campagne periodiche o di indagini ricorrenti sulla composizione del rifiuto urbano indifferenziato, mentre in altri casi le informazioni derivano da studi puntuali, svolti con metodologie, frequenze e obiettivi differenti. Per uniformare la base informativa, ad esempio, all'interno del Regolamento 2023/1542, è stato introdotto un obbligo di indagini periodiche da svolgere sul rifiuto indifferenziato (Art 69 comma 5) che permetterà un confronto più attendibile e aggiornato delle prestazioni dei diversi Paesi europei. Questa disomogeneità rende, oggi, complesso un confronto diretto tra i risultati, ma consente comunque di individuare una tendenza comune: il rifiuto indifferenziato continua a contenere frazioni che, se correttamente intercettate, potrebbero contribuire al miglioramento delle performance di raccolta e recupero.

Nei Paesi Bassi, ad esempio, vengono condotte campagne annuali di campionamento finalizzate a monitorare la presenza di RAEE nel rifiuto urbano indifferenziato e a individuare possibili strategie di miglioramento della raccolta. Nel 2024, i RAEE rappresentavano lo 0,98% in peso del rifiuto urbano indifferenziato, pari a circa 1,45 kg/abitante/anno, come riassume lo studio di Stichting Open [2]. Le quantità di rifiuti di batterie risultano inferiori, ma lo studio evidenzia comunque la presenza di batterie e accumulatori, anche all'interno dei RAEE intercettati nel rifiuto residuo.

In Belgio, le analisi disponibili sulla caratterizzazione del rifiuto domestico condotte tra il 2019 e il 2021 [3] indicano che i RAEE rappresentano circa lo 0,41% in peso del flusso analizzato, pari a 0,49 kg/abitante/anno, mentre le batterie sfuse rappresentano circa lo 0,04% in peso, pari a 0,04 kg/abitante/anno. In Francia, uno studio condotto da Ecologic [4] ha stimato per il 2024 la presenza di circa 1,5 kg/abitante/anno di RAEE nel rifiuto urbano misto, corrispondente allo 0,68% in peso. In

Portogallo, Electrão [5] ha rilevato una presenza media nell'indifferenziato pari a 1,3 kg/abitante di RAEE e 0,09 kg/abitante di batterie; lo studio ha inoltre incluso l'analisi dei flussi di rifiuti di imballaggi (plastica, metallo e vetro), all'interno dei quali sono stati trovati complessivamente 0,71 kg/abitante di RAEE e 0,019 kg/abitante di batterie in media, rilevando ulteriori quantità di questi rifiuti che non sono conferiti in modo corretto.

Per altri Paesi risulta invece più complesso disporre di campagne di campionamento sistematiche e periodiche. In Romania, ad esempio, non risultano essere stati condotti studi metodologici strutturati finalizzati alla quantificazione dei RAEE presenti nel rifiuto urbano indifferenziato, ma soltanto indagini di scala limitata con ridotta rilevanza statistica. Nonostante l'assenza di dati consolidati, si ritiene che una quota rilevante dei RAEE confluisca nel rifiuto indifferenziato, considerando un tasso di raccolta stimato pari a circa il 10%. Anche in Irlanda non risultano disponibili iniziative di campionamento periodiche specificamente finalizzate alla quantificazione dei RAEE nell'indifferenziato. Tuttavia, da uno studio di caratterizzazione del rifiuto urbano domestico condotto dall'Environmental Protection Agency nel 2022 è emerso che i RAEE presenti nel rifiuto indifferenziato raccolto porta a porta rappresentano lo 0,8% in peso del flusso analizzato. Non sono invece disponibili dati relativi a studi o campionamenti della frazione di Rifiuti di Batterie in questi Paesi.

Queste esperienze mostrano come l'analisi del rifiuto urbano residuo possa fornire indicazioni utili sull'efficacia dei sistemi di raccolta e sull'esistenza di flussi non correttamente intercettati. Allo stesso tempo, l'assenza, sino ad ora, di un obbligo armonizzato a livello europeo per il campionamento periodico dell'indifferenziato ai fini dell'individuazione di RAEE e rifiuti di batterie limita la disponibilità di dati regolari e pienamente confrontabili. Ne deriva la necessità di sviluppare approcci conoscitivi e sperimentali in grado non solo di quantificare la presenza di tali flussi, ma anche di valutare possibili strategie operative per la loro intercettazione.

2. La filiera dell'indifferenziato

La gestione del rifiuto urbano indifferenziato rappresenta ancora oggi una componente rilevante del sistema nazionale dei rifiuti urbani, nonostante la progressiva crescita della raccolta differenziata registrata negli ultimi anni. Secondo il Rapporto Rifiuti Urbani ISPRA 2025 [6], nel 2024 la produzione nazionale di rifiuti urbani si attesta a poco più di 29,9 milioni di tonnellate, in aumento del 2,3% rispetto al 2023. In particolare, la frazione di raccolta differenziata raggiunge il 67,7% della produzione nazionale, con un incremento di 1,1 punti percentuali rispetto al 2023, quando si attestava al 66,6%. Ne consegue che una quota ancora significativa dei rifiuti urbani prodotti, pari a circa un terzo del totale, continua a essere intercettata come rifiuto urbano residuo o indifferenziato.

Dal punto di vista organizzativo, la filiera dell'indifferenziato prende avvio dalla raccolta del rifiuto urbano residuo prodotto dalle utenze domestiche e non domestiche assimilabili. Il servizio è generalmente pianificato e regolato a livello comunale o d'ambito, mentre le attività operative di raccolta, trasporto e conferimento sono svolte dai gestori del servizio di igiene urbana. Una volta raccolto, il rifiuto indifferenziato viene indirizzato verso impianti di trattamento o smaltimento, secondo configurazioni territoriali che variano in funzione della disponibilità impiantistica, delle scelte di pianificazione regionale e degli assetti logistici locali.

La destinazione del rifiuto urbano residuo non è quindi univoca. Una parte viene avviata direttamente o indirettamente a incenerimento con recupero energetico, una parte a TMB e una parte, dopo i trattamenti preliminari previsti dalla normativa, a smaltimento in discarica. Il ricorso alla discarica, pur in forte riduzione nel lungo periodo, rimane ancora presente nel sistema nazionale. Nel 2024 i rifiuti urbani complessivamente smaltiti in discarica sono pari a oltre 4,4 milioni di tonnellate, corrispondenti al 14,8% dei rifiuti urbani prodotti a livello nazionale. La riduzione dello smaltimento, osservata nel periodo 2002-2024, è collegata sia alla crescita della raccolta differenziata sia alla maggiore diffusione dei trattamenti preliminari dei rifiuti urbani indifferenziati, che contribuiscono alla riduzione del peso e del volume dei rifiuti avviati a smaltimento.

Gli impianti di TMB/TM presenti in Italia sono 132 (37 al Nord, 40 nel Centro e 55 al Sud) e in totale, nel 2024, hanno gestito circa 6,7 milioni di tonnellate di RUR [6]. Solo 119 di questi trattano direttamente Rifiuto Urbano Residuo e, in particolare, 19 di questi superano ciascuno le 100 mila tonnellate di rifiuti indifferenziati all'anno, fino ad arrivare in alcuni casi anche a più di 300 mila. Essi rappresentano quindi un nodo rilevante della filiera: ricevono grandi quantità di rifiuto urbano residuo, effettuano operazioni di apertura sacchi, riduzione volumetrica e omogeneizzazione del materiale, separazione meccanica, stabilizzazione biologica della frazione organica residua e produzione di flussi in uscita destinati a recupero energetico, discarica o ulteriori trattamenti. Si configurano quindi come possibile punto privilegiato di intercettazione di frazioni che non sono state correttamente conferite a monte.

Questa evidenza è particolarmente rilevante per il presente studio. Il trattamento dell'indifferenziato è infatti prevalentemente orientato alla stabilizzazione, alla riduzione del volume, alla produzione di frazioni combustibili o alla preparazione allo smaltimento, mentre il recupero di materiali specifici e dispersi nel flusso residuo rimane limitato e fortemente dipendente dalla dotazione tecnologica degli impianti: si stima infatti che solo l'1,2% delle frazioni in uscita dai TMB sia costituita da frazioni recuperabili. Ne deriva che la presenza nell'indifferenziato di frazioni ad alto valore ambientale o critico, come Rifiuti di Batterie e piccoli RAEE, rappresenta non solo un problema di mancato conferimento corretto, ma anche un potenziale rischio gestionale e un'occasione mancata di recupero. Alla luce di questo quadro, la filiera dell'indifferenziato può essere letta non solo come la parte residuale del sistema di gestione dei rifiuti

urbani, ma come un ambito potenzialmente strategico su cui intervenire per intercettare materiali che sfuggono alle raccolte dedicate.

Il ruolo dei centri TMB nella gestione del rifiuto indifferenziato, inoltre, non è uniforme sul territorio nazionale. Nelle aree dove sono presenti termovalorizzatori progettati per trattare direttamente il rifiuto urbano residuo, soprattutto in alcune regioni del nord, il passaggio attraverso il TMB può essere meno centrale. In questi contesti, la maggiore qualità del rifiuto residuo, dovuta anche a sistemi di raccolta differenziata più performanti, e la disponibilità di impianti di recupero energetico consentono in alcuni casi di evitare il pretrattamento meccanico-biologico. In altri territori, invece, il TMB continua a rappresentare una fase essenziale della filiera; infatti, 16 dei 19 impianti che lavorano più di 100 mila tonnellate annue sono in regioni del sud. Questo avviene in particolare quando il rifiuto residuo presenta caratteristiche più eterogenee, una maggiore presenza di umido o impurità, oppure quando la capacità di recupero energetico diretto non è sufficiente.

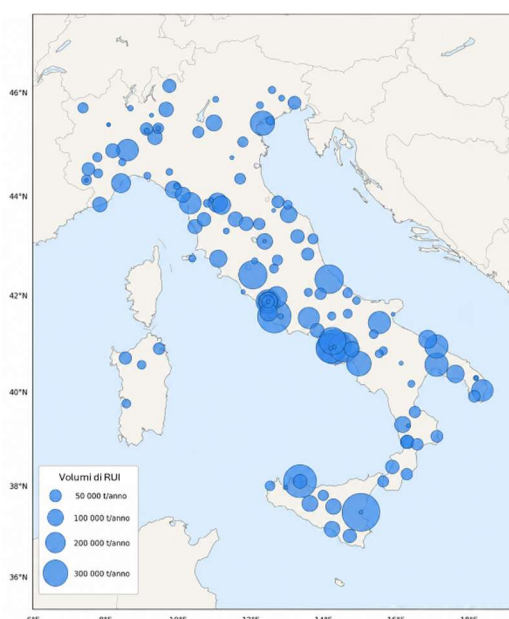


Figura 1 Gli impianti TMB in Italia classificati per volumi di RUI trattati

Alla luce del quadro descritto, il TMB può essere considerato un punto di osservazione e intervento strategico, ma non privo di limiti. Da un lato, esso concentra grandi quantità di RUR e può consentire l'intercettazione di flussi che non sono stati correttamente raccolti a monte. Dall'altro, l'eterogeneità del materiale, le portate elevate, la presenza di sacchi e la necessità di non interrompere il processo rendono complessa l'introduzione di sistemi di separazione selettiva che devono essere in grado di operare in continuo, senza compromettere la produttività dell'impianto e senza introdurre ulteriori rischi per gli operatori o per le apparecchiature. Queste considerazioni vengono trattate nei seguenti capitoli, insieme a una più dettagliata descrizione dell'impianto di Ecologia Viterbo, oggetto dello studio.

3. Use Case (Ecologia Viterbo):

3.1. Descrizione dell'impianto

Il caso oggetto dello studio è quello dell'impianto di trattamento di Ecologia Viterbo SpA, con sede in S.P. Teverina km 7,63, Viterbo (VT), Italia.

L'azienda è il principale oggetto incaricato della gestione dei rifiuti a Viterbo e nel territorio della Tuscia. L'impianto di trattamento meccanico biologico (TMB) dei rifiuti urbani, situato in località Casale, opera sin dal 1998 ed effettua la selezione e il trattamento di Rifiuti Solidi Urbani (RSU) (EER 20.XX.XX) e rifiuti speciali non pericolosi (EER 19.12.12) con produzione di Combustibile Solido Secondario (CSS) e Frazione Organica Stabilizzata (FOS). La capacità produttiva annua è di 215.000 tonnellate, distribuite su due turni di lavoro per un totale di 76 ore settimanali, corrispondenti a una portata di trattamento di circa 50 t/h. Nel periodo di ottobre – dicembre 2025 i rifiuti trattati sono così ripartiti: circa 91,19% di EER 20.03.01 circa 1,55% di EER 20.03.07 e circa 7,26% di rifiuti speciali (EER 19.12.12 – 19.12.02).



Figura 2 Ecologia Viterbo S.p.A. Impianto TMB, S.P. Teverina km 7,63 - 01100 Viterbo

3.2. Descrizione del processo produttivo e bilancio di massa

La pagina seguente riporta l'attuale sequenza di processi seguita dai rifiuti partendo dalla prima fase di ricezione, per poi giungere alle diverse sezioni di separazione (CSS, metallo e alluminio) e trattamento (frazione umida e aria).

I rifiuti conferiti all'impianto vengono inizialmente scaricati nell'area di ricezione e successivamente trasferiti a un tritatore primario. Questa apparecchiatura svolge la funzione di aprire i sacchi contenenti i rifiuti urbani, ridurre la pezzatura del materiale e favorire la miscelazione con i rifiuti speciali, creando un flusso più uniforme destinato alle successive operazioni di trattamento meccanico. Il materiale così preparato viene inviato a un primo sistema di vagliatura dotato di fori da 65 mm, che consente la separazione preliminare tra la componente prevalentemente secca e quella a maggiore contenuto organico e umido. La frazione trattenuta dal vaglio (sopravaglio) è sottoposta a processi di separazione dei metalli ferrosi e non ferrosi e viene quindi trasferita mediante nastri trasportatori all'area di raffinazione. In questa sezione, attraverso l'impiego di una valvola stellare e di un separatore aerulico, il materiale viene ulteriormente suddiviso in una componente leggera e una pesante.

La frazione leggera, destinata alla produzione di CSS, viene trattata mediante un tritatore equipaggiato con griglia da 120 mm, in modo da ottenere una granulometria compatibile con le specifiche richieste dagli impianti di valorizzazione energetica. Successivamente, il materiale attraversa un secondo vaglio con fori da 30 mm che permette di eliminare le frazioni indesiderate di dimensioni inferiori, costituite principalmente da materiali inerti, residui organici e particelle plastiche. Il CSS ottenuto può essere stoccato e trasportato sia in forma sfusa sia confezionato in balle protette da film plastico. La componente secca pesante, non idonea al recupero energetico, viene invece convogliata nelle aree di accumulo dedicate, dalle quali viene caricata sui mezzi di trasporto e destinata allo smaltimento finale in discarica.

La frazione umida derivante dalle operazioni di vagliatura, comprendente sia il sottovaglio del vaglio primario sia quello del vaglio secondario, viene trasferita a due bacini di ossidazione biologica aventi caratteristiche costruttive identiche. In tali strutture viene realizzato il processo di stabilizzazione biologica del materiale organico. L'alimentazione dei bacini avviene mediante un sistema costituito da un nastro trasportatore longitudinale (tripper) che alimenta un nastro lanciatore mobile. Quest'ultimo distribuisce il materiale in maniera uniforme lungo tutta la lunghezza della vasca grazie a un movimento continuo a velocità costante. Per favorire il processo biologico sono installati due carroponi automatici di tipo BIOMAX 3, che scorrono su rotaie disposte parallelamente ai lati maggiori delle vasche. Ogni macchina è equipaggiata con due coclee che garantiscono il rivoltamento e l'avanzamento del materiale, assicurando un'adeguata ossigenazione della massa in trattamento. Durante la permanenza nei bacini, il rifiuto viene mantenuto in condizioni controllate di umidità e aerazione per promuovere l'attività di batteri e microrganismi responsabili della degradazione della sostanza organica. Il processo biologico, di tipo aerobico e termofilo, consente la progressiva stabilizzazione del materiale attraverso un periodo di maturazione durante il quale viene effettuata, quando necessario, l'aggiunta di acqua. Al termine della fase biologica, il materiale stabilizzato viene inviato nuovamente alla sezione di raffinazione, dove un sistema di vagliatura finale separa due correnti distinte: la FOS e gli scarti di raffinazione. Le operazioni di stabilizzazione e mantenimento dell'umidità generano un refluo liquido denominato condensa. Tale liquido viene raccolto in un'apposita vasca e riutilizzato per l'irrigazione dei bacini di trattamento. L'eventuale eccedenza viene successivamente conferita, mediante trasporto con autocisterne autorizzate, a impianti esterni specializzati nel trattamento dei reflui.

Nel corso delle diverse fasi di lavorazione, i materiali trasportati dai nastri sono sottoposti a sistemi di separazione magnetica e a correnti indotte per il recupero dei metalli ferrosi e non ferrosi, in particolare ferro e alluminio. I materiali recuperati vengono successivamente inviati a impianti dedicati al loro trattamento e recupero.

I materiali in uscita dall'impianto possono essere gestiti in due differenti modalità:

1. materiale sfuso, destinato prevalentemente allo smaltimento in discarica;
2. materiale imballato mediante pressatura, destinato agli impianti di recupero, quali termovalorizzatori per il CSS e impianti di recupero dei metalli.

Di seguito viene riportato il bilancio di massa dell'impianto, relativo ai quantitativi in ingresso e in uscita registrati nel periodo ottobre–dicembre 2025 per le attività di trattamento finalizzate alla produzione di CSS.

Tabella 3.1: Distribuzione rifiuti in ingresso.

Rifiuti in ingresso	%
EER 20.03.01 - Rifiuti Urbani Indifferenziati	91,19
EER 20.03.07 - Rifiuti Ingombranti	1,55
EER 19.12 – (Solo matrice urbana)	7,26
Totale	100

Tabella 3.2: Distribuzione rifiuti prodotti in uscita.

Rifiuti prodotti in uscita	%
EER 19.12.10 – CSS	26,05
EER 19.05.03 – Compost fuori specifica	10,65
EER 19.05.01 – Scarti raffinazione	17,20
EER 19.12.12 – Rifiuti di scarto	35,10
EER 19.12.02 - Metalli ferrosi	2,28
EER 19.12.03 - Metalli non ferrosi	0,01
Perdita di processo/smaltimento	8,71
Totale	100

Tra i vari stadi precedentemente presentati, la frantumazione primaria rappresenta lo stadio più critico dal punto di vista della sicurezza: la frantumazione di batterie – in particolare quelle al litio – può infatti innescare principi di incendio. Secondo i dati raccolti da Ecologia Viterbo nel periodo tra gennaio e maggio 2026 si sono verificati 15 principi di incendio; 11 di questi sono direttamente riconducibili alla frantumazione di batterie al litio, 2 a fumogeni e i restanti ad altre cause. Ogni episodio comporta l'interruzione della produzione e, oltre a provocare danni – per quanto generalmente contenuti – all'impianto, riduce la quantità di materiale processato e incide negativamente sulla valutazione del rischio incendi dell'azienda. Nel periodo precedentemente indicato, questi fenomeni hanno comportato l'interruzione dell'impianto per un tempo totale di 2 ore e 35 minuti, corrispondenti circa a 130 tonnellate circa di materiale non processato.

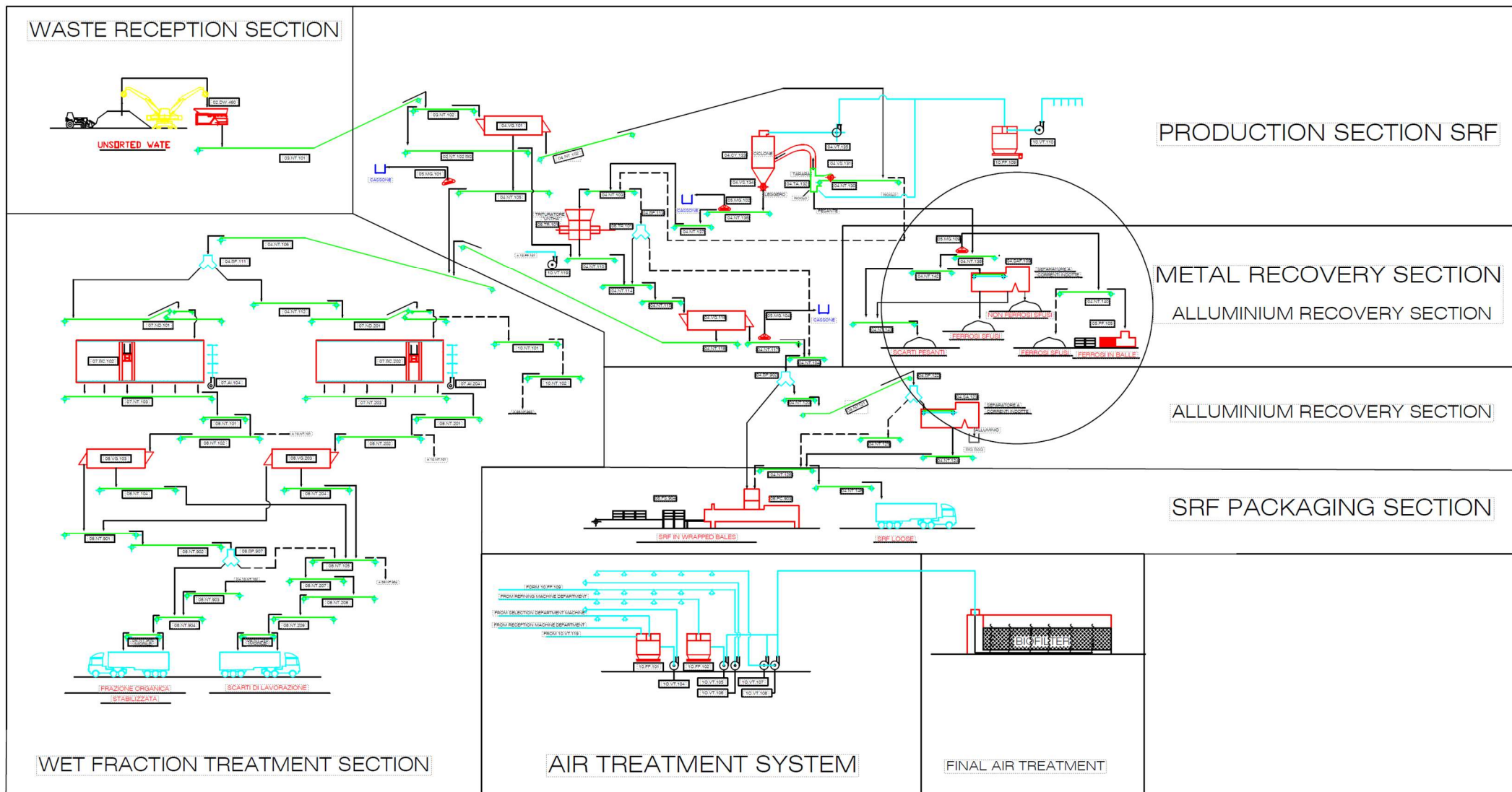


Figura 3 Diagramma del flusso dei rifiuti dell'impianto di TMB di Ecologia Viterbo.

Queste premesse, unitamente a quanto precedentemente esposto riguardo le soglie target di raccolta richieste dalla normativa vigente, sono da considerarsi i principali incentivi allo sviluppo di un sistema di pretrattamento in grado di individuare e rimuovere batterie e piccoli RAEE dal flusso di rifiuti trattato. L'obiettivo primario di questo lavoro consiste nella rimozione dal flusso di rifiuti principale dei piccoli RAEE e delle batterie (per queste, senza distinzione per tipologia di chimica). È inoltre bene precisare che la soluzione presentata nelle successive sezioni è particolarmente adatta al caso studio preso in esame; tuttavia, tutte le tecnologie presentate, così come le considerazioni emerse dall'analisi economica, sono da considerarsi punti di partenza comuni per lo sviluppo di tali sistemi di pretrattamento del flusso RSU.

3.3. Soluzioni proposte

Il processo di rimozione delle batterie e dei piccoli RAEE è da considerarsi composto da tre fasi: ricezione e preparazione dei rifiuti, ispezione e identificazione, separazione. Di seguito sono presentate le principali metodologie applicabili in ciascuno stadio del processo; con esse sono riportati anche una breve descrizione del funzionamento, i principali produttori, il range di prezzo, la potenza, la portata e l'ingombro indicativo.

3.3.1. Ricezione del materiale

L'ipotesi di effettuare la rimozione delle batterie e dei piccoli RAEE dal flusso di RUR senza che questi vengano prima estratti dai sacchi risulta, allo stato attuale, altamente inverosimile. Ad oggi, questo procedimento avviene in concomitanza con il primo stadio di frantumazione in cui il trituratore uniforma le dimensioni del materiale processato provvedendo al tempo stesso all'apertura dei sacchi e al rilascio dei rifiuti contenuti all'interno. Come già anticipato, questo risulta però essere lo stadio più critico dell'impianto dal momento che la frantumazione involontaria delle batterie, sfuse o contenute in RAEE, può dare origine a principi di incendio. Ne deriva quindi la necessità di individuare tecnologie in grado di prevenire, o quantomeno ridurre significativamente, tale rischio. Le tecnologie in questione devono disporre di velocità di rotazione molto basse –per limitare la forza di impatto con il materiale – e di sufficiente spazio tra i coltelli e i controcoltelli – così da evitare lo schiacciamento delle batterie. Tecnologie a flagelli/martelli o frantumatori primari sono quindi fortemente sconsigliate e non verranno prese in analisi nelle successive fasi.

Oltre a effettuare l'apertura dei sacchi, in questo stadio è necessario predisporre il rifiuto per le successive fasi del processo, specialmente per la parte di separazione. La scelta dell'attuatore implica infatti determinati vincoli riguardo la disposizione del materiale sul nastro. Ad esempio, l'adozione di un robot pick-and-place o di getti d'aria richiede che il rifiuto sia distribuito su un singolo strato per poter accedere con precisione al materiale target. Viceversa, le medesime precauzioni non sono strettamente necessarie nel caso in cui si valutasse una separazione manuale o attraverso deflettori o pistoni. Questo processo può avvenire in vari modi: regolando il flusso in uscita attraverso una tramoggia, variando la velocità del nastro o disponendo il materiale su nastri vibranti. Nel caso in analisi, la gestione del flusso attraverso la regolazione del nastro sembra essere la soluzione più ragionevole; pertanto, le opzioni di tramogge e/o nastri vibranti non verranno ulteriormente analizzate.

Di seguito si riporta la sintesi dei macchinari per l'apertura sacchi più adatti al caso in esame.

Tabella 3.3: Tabella riassuntiva sistema di apertura sacchi.

Sistema di apertura sacchi



I sistemi di apertura sacchi processano alti volumi di rifiuti racchiusi in diverse tipologie di packaging. Adottano velocità di rotazione molto lente (5-15 rpm) e presentano ampi spazi tra i coltelli e i controcoltelli (fino a 200 mm) per garantire l'apertura dei sacchi senza danneggiarne il contenuto.

Produttori	BHS Bag Breaker®, SPR Bag Opener, MSW TECHNOLOGY (Bag Opener or Feeder + Bag Opener)
CAPEX range [€]	140.000 € - 300.000 €
Potenza [kW]	8 - 20
Portata [t/h]	Fino a 40
Dimensioni approssimative (L x P x H) [mm]	4100 x 2500 x 2500

3.3.2. Ispezione e identificazione

La fase di ispezione e identificazione costituisce la parte centrale del processo. In questo stadio è necessario adottare tecnologie che sappiano effettuare l'attività in maniera rapida ed efficace riuscendo però ad adattarsi alla variabilità presente nel settore di applicazione. L'elevata eterogeneità tra i rifiuti target risulta essere la complicazione principale. Le differenti proprietà elettrochimiche e fisiche mostrate da batterie quali Litio Nickel Manganese e Ossido di Cobalto (NMC), Litio e Ossido di Cobalto (LCO), Litio Ferro Fosfato (LFP), e Litio Ossido di Manganese (LMO) complicano significativamente il processo di riconoscimento tramite una singola tecnologia [7].

Una classificazione basata su sistemi ottici consente di estrarre informazioni dal materiale in modo non invasivo. Possibili targets sono etichette, barcodes o simboli identificativi, geometria del pezzo e condizioni superficiali. Tuttavia, sia le tradizionali tecniche con camere RGB (che catturano immagini a colori standard) che quelle che adottano spettroscopi e camere iperspettrali operanti nell'infrarosso si

sono dimostrate insufficienti. La presenza di più strati di rifiuti impedisce l'identificazione di batterie e piccoli RAEE mediante questi sensori. Tali tecnologie offrono infatti solo una classificazione dello strato più esterno, e non hanno modo di fornire una classificazione trasversale del flusso ispezionato. Inoltre, le performance possono deteriorarsi quando le etichette non sono presenti o sono oscurate da sporco, altri rifiuti o usura meccanica. Sulla base di diversi studi si sono però dimostrati ottimi sensori complementari.

Per queste ragioni, la classificazione ottica è spesso associata con scanner a raggi X. Ad oggi, questa è la tecnologia più promettente e in grado di soddisfare i requisiti richiesti. Questi scanner hanno la possibilità di visionare attraverso i rifiuti e, soprattutto quando associati con modelli di riconoscimento basati su intelligenza artificiale, di fornire una classificazione dell'intera stratigrafia analizzata. La loro applicazione ha raggiunto stadi molto avanzati in sistemi di scanning – specialmente quelli adottati per il controllo bagagli negli aeroporti – e in letteratura esistono vari studi che li validano anche per il riconoscimento delle batterie [8], [9]. I raggi X si sono dimostrati utili per definire la struttura chimica delle batterie, dando la possibilità di riconoscere varie tipologie quali ad esempio NMC e LFP [7]. I sensori a raggi X si possono suddividere in due principali categorie: quelli basati sui raggi X trasmessi (X-ray transmission) e quelli basati sulla fluorescenza a raggi X (X-ray fluorescence o XRF); se è vero che questi ultimi sono gli unici in grado di fornire informazioni sulla chimica delle batterie, il fatto che forniscano la possibilità di ispezionare solo lo strato esterno li rende inadatti a questa applicazione. Di seguito verranno quindi approfonditi solo gli scanner basati sui raggi X trasmessi.

Sul mercato sono presenti vari sistemi di riconoscimento e separazione di batterie, ma ciascuno di questi si limita a classificare flussi misti di batterie, senza considerare di ricevere in input un più generico flusso di RUR. Un caso studio che si avvicina a quello investigato è la collaborazione tra Smiths Detection, VITO e Sortbat per lo sviluppo di Xbat.ai, una joint venture per la separazione semi-automatica di batterie che utilizza raggi X trasmessi per determinare la densità e quindi la natura dei rifiuti. Più recentemente GRINNER (Horizon Europe, ID 101070321) si è occupato dell'identificazione ed estrazione di RAEE contenenti batterie in un impianto pilota in scala di laboratorio. In questo caso, un robot pick and place era incaricato della separazione dei rifiuti sulla base della combinazione degli output forniti da uno scanner a raggi X e da un sensore ottico.

Tabella 3.4: Tabella riassuntiva camera RGB

Camera RGB con riconoscimento AI integrato



Una telecamera RGB ad alta risoluzione acquisisce in continuo immagini del materiale sul nastro. Un processore di visione integrato esegue algoritmi di deep learning, addestrati su una libreria di batterie

e RAEE, che classificano l'oggetto in base alle sue caratteristiche visive (forma, colore, dimensione, texture superficiale) e ne restituiscono le coordinate spaziali sul nastro in tempo reale.

Produttori	Cognex, Keyence, Omron
CAPEX range [€]	5.000 € - 20.000 €
Potenza [kW]	n.d. (tipicamente < 0,1 kW)
Portata [t/h]	8 – 60 (dipende dalla velocità del nastro su cui è installata)
Dimensioni approssimative (L x P x H) [mm]	100 x 100 x 100

Tabella 3.5: Tabella riassuntiva scanner a raggi X.

Scanner a raggi X



I raggi X trasmessi passano attraverso il materiale sul nastro e vengono attenuati in maniera differente a seconda della densità del materiale. Il ricevitore misura i raggi X attenuati e classifica il materiale in base all'assorbimento stimato.

Produttori	Smiths Detection, TOMRA Sorting Solutions (AUTOSORT con sensore X-TRACT), Steinert (XSS T – Versione EVO 5.0), REDWAVE (Linea XRT), Comex Group (Serie CRX)
CAPEX range [€]	280.000 € - 500.000
Potenza [kW]	3 – 4
Portata [t/h]	15 – 20
Dimensioni approssimative (L x P x H) [mm]	6300 x 2200 x 2700

3.3.3. Separazione

Una volta che la batteria o il piccolo RAEE viene identificato è necessario definire il miglior modo per rimuoverlo dal flusso di rifiuti. Se nella parte di identificazione il principale ostacolo è la variabilità a livello di composizione, in questa fase lo sono le dimensioni e le forme dei prodotti target; le significative differenze di geometria, involucro e ingombro tra celle cilindriche, prismatiche, a bottone e pouch rendono infatti difficile la standardizzazione di questo processo per le batterie [7], mentre per i piccoli RAEE la varietà di design è ampliata dalla varietà di prodotti considerati. Dati questi fattori e la portata target dell'impianto, emerge quindi la necessità di individuare soluzioni versatili in grado di operare rapidamente e senza interrompere il flusso dei rifiuti.

Prima di addentrarsi nella trattazione, è bene precisare che in alcuni casi la fase di separazione può avvenire anche simultaneamente a quella di identificazione. Esempi sono i processi basati sulle caratteristiche fisiche del materiale quali dimensioni, massa, forma, risposta magnetica o conducibilità elettrica. Nel caso di Ecologia Viterbo stadi di vagliatura (menzionato anche in [10] per la separazione delle batterie), separazione aeraulica, magnetica e con correnti parassite sono già distribuiti lungo tutto il percorso seguito dal rifiuto. Essi permettono di intercettare buona parte delle batterie non intaccate dalla prima frantumazione evitando che queste entrino erroneamente in altri flussi. Tuttavia, pensare a una loro applicazione prima dello stadio di frantumazione risulta complesso per due principali ragioni: l'inomogeneità nelle dimensioni di RAEE e/o della composizione delle batterie che rende difficile l'utilizzo di una singola tecnologia e l'elevato volume in ingresso che ne limita l'efficacia. Per queste ragioni, l'illustrazione di sistemi di separazione è limitata a quelli compatibili con le esigenze dell'impianto e con i sistemi di identificazione definiti in precedenza.

La prima possibilità riguarda la separazione manuale. Questo rimane uno dei metodi più comuni in uno stadio di pre-separazione, soprattutto in realtà di piccole dimensioni e in centri di raccolta. Qui l'esperienza dell'operatore è usata sia per identificare e rimuovere le batterie in base alle loro dimensioni, forme, etichette e al loro aspetto, sia per separare i piccoli RAEE dal flusso principale. In alcuni casi puntatori luminosi o laser possono essere adottati come ausilio per guidare l'operatore nell'individuazione del prodotto target da rimuovere al fine di aumentare l'efficacia del processo. Sebbene questo approccio consenta anche di separare batterie che contengono sicuramente ioni di litio dalle altre, esso presenta evidenti limiti. I risultati sono poco consistenti e dipendono in maniera significativa dall'esperienza dell'addetto e dalle sue condizioni di affaticamento. Inoltre, il contatto diretto con le batterie genera problematiche legate alla sicurezza dell'operatore; maneggiare batterie potrebbe esporre il personale incaricato a rischi chimici, di incendio e di natura elettrica, che rendono gli approcci manuali progressivamente meno sostenibili all'aumentare delle capacità di trattamento richieste. Nel caso di Ecologia Viterbo, è verosimile che questa soluzione possa essere usata in un primo impianto pilota o su una frazione marginale del flusso come ultimo controllo, ma non sul principale flusso di rifiuti. Quando i volumi processati aumentano è infatti necessario considerare soluzioni alternative.

Per le esigenze di scala dell'impianto sono state quindi considerate diverse tecniche di separazione automatica, che è opportuno classificare in quattro famiglie secondo il meccanismo con cui l'attuatore agisce sul rifiuto target: deviazione, impulso, eiezione e prensione. Per ciascun meccanismo la fonte di potenza dell'attuatore (pneumatica, idraulica o elettrica) costituisce una dimensione progettuale indipendente, di cui si dà conto dove rilevante ai fini della scelta.

Gli attuatori a deviazione (deflettori a paletta) e quelli a impulso (attuatori lineari) agiscono entrambi per contatto fisico diretto con il bersaglio, deflettendolo o spingendolo fuori dal flusso. Rappresentano la soluzione più economica e robusta per la rimozione di oggetti pesanti o ingombranti, ma presentano una

bassa selettività spaziale, elevati tempi ciclo, e una corsa spesso limitata, che li portano a generare un flusso secondario a purezza ridotta che necessita di un'ulteriore fase di selezione, plausibilmente manuale. Questi aspetti, sebbene comuni ad entrambe le tipologie di attuatori, pesano in misura diversa sui due meccanismi. Gli attuatori a deviazione risultano particolarmente critici, al punto da renderli inutilizzabili nell'impianto di Ecologia Viterbo; quelli a impulso incidono in modo più contenuto, consentendone l'applicabilità, seppur verosimilmente in un ruolo ausiliario più che come attuatore principale. Il meccanismo dell'impulso, in particolare, può essere azionato indifferentemente per via pneumatica, idraulica o elettrica; l'azionamento idraulico risulta però poco adatto al caso in esame a causa dei tempi di risposta – lenti rispetto al ritmo richiesto dal sorting sensor-based – e delle forze per cui è tipicamente progettato. Queste ultime risultano di ordini di grandezza superiori al necessario, dal momento che la maggioranza delle batterie presenti nel flusso RSU è costituita da pile consumer (AA, AAA, a bottone) e celle da dispositivi portatili con masse tipicamente inferiori a 100 g, e determinerebbero un inutile sovradimensionamento sia in CAPEX sia in OPEX (centralina idraulica, olio, raffreddamento). Gli attuatori a eiezione (barre a getti d'aria) agiscono invece per impulso aerodinamico, senza contatto fisico, allontanando il bersaglio dal flusso tramite un getto d'aria temporizzato. Offrono velocità elevate e assenza di parti meccaniche a contatto, ma sono efficaci soprattutto su oggetti leggeri e di piccola taglia, e la loro precisione si degrada al crescere della massa e dell'ingombro del bersaglio. Diversamente, gli attuatori a prensione (bracci Delta o articolati mossi da servomotori AC che posizionano end-effector dedicati in qualsiasi punto dell'area di lavoro) afferrano fisicamente l'oggetto per rimuoverlo dal flusso, offrendo il miglior compromesso tra velocità, precisione, payload e versatilità geometrica per oggetti di taglia media (RAEE, pacchi batteria, smartphone, tablet). Tuttavia, sebbene la separazione automatica mediante bracci robotici sia di per sé matura in molti ambiti industriali, questo non è propriamente vero se si considera la loro applicazione nel settore delle batterie. [11] e [12] hanno dimostrato, in scala da laboratorio, come Delta robot e robot articolati possano essere usati per separare singole celle (in particolare piccole celle a bottone e AA), senza però testarli su un flusso di materiale misto. Il progetto GRINNER precedentemente menzionato adotta un robot pick-and-place per la loro rimozione dal flusso, mentre all'interno di PERMANET – un altro progetto finanziato da Horizon Europe – robot delta gripper sono usati per la selezione di RAEE e piccoli magneti. L'unica vera eccezione dal punto di vista dell'applicazione commerciale, e particolarmente rilevante per il caso d'uso di Ecologia Viterbo, è rappresentata dalla soluzione automatizzata per la selezione dei rifiuti Wexobot, sviluppata dall'azienda svedese Byte Motion. Tale sistema combina un sistema di visione basato su AI con un robot articolato di ABB per identificare e separare le batterie all'interno di un flusso misto di rifiuti trasportato su nastro. L'impianto è stato implementato presso l'azienda norvegese di gestione dei rifiuti IVAR, mostrandosi in grado di gestire rifiuti di diverse natura, forma e dimensioni, con un'accuratezza di rilevamento superiore al 95%. In generale, è possibile affermare che la principale criticità nell'impiego di robot per la selezione delle batterie non sia quindi di natura tecnica, bensì economica e commerciale. Un ulteriore aspetto che incide sui costi di investimento riguarda la progettazione di appositi organi di presa; è infatti verosimile ipotizzare la necessità di un sistema multi-utensile, o di più robot disposti in serie lungo il nastro trasportatore, per poter gestire agevolmente la variabilità in ingresso.

Alla luce di quanto esposto, è chiaro come non vi sia un meccanismo di attuazione migliore in termini assoluti: ciascuno di quelli proposti risulta infatti particolarmente adatto nella gestione di specifiche categorie di rifiuti. Questo anticipa quanto verrà successivamente presentato nella sezione 3.3.4 in merito alle configurazioni consigliate per Ecologia Viterbo, ovvero che la soluzione ottimale debba verosimilmente comprendere una combinazione di più meccanismi di attuazione disposti in sequenza. La separazione manuale verrà anche presa in considerazione, ma solo ed esclusivamente nei termini

già specificati: nella fase di test dell'impianto, oppure per una separazione dei materiali target da un flusso di rifiuti secondario.

Tabella 3.6: Tabella riassuntiva Delta robot.

Delta robot	
	
I Delta robot (o grippers) hanno 3 (o 4) bracci articolati che convergono in un end-effector dotato di gripper a ventose o a dita. La struttura adottata nella loro costruzione li rende rapidi e precisi, mantenendo un costo di implementazione ridotto.	
Produttori (e modelli, ove disponibili)	Omron (X Delta 3 + 1), ABB (IRB 360), Delta - X (XS), KUKA (KR DELTA),
CAPEX range [€]	30.000 € – 60.000 €*
Potenza [kW]	0,5 – 2 (sola elettronica delle valvole); 15 – 30 aggiuntivi per il compressore d'aria dedicato.
Portata [picks/min]	80 - 130
Carico utile [kg]	2 - 6
Dimensioni approssimative (L x P x H) [mm]	3.000 x 3.000 x 3.000 (intera cella di lavoro, completa di portale e gabbia di sicurezza)

*solo braccio, sensori ausiliari e integrazione esclusi

Tabella 3.7: Tabella riassuntiva robot articolato.

Robot articolato	
	
I robot articolati sono bracci robotici con 3 giunti rotanti. Il numero di giunti presenti nel robot determina il suo grado di libertà di movimento e, nella maggior parte dei casi, consente di raggiungere qualsiasi punto all'interno del proprio spazio di lavoro, in modo analogo al braccio umano.	
Produttori (e modelli, ove disponibili)	FANUC (LR Mate 200iD/4S), ABB (IRB 1100), Epson (CX4-A), KUKA (KR 16), FANUC (M-20iD)
CAPEX range [€]	40.000 € – 100.000 €*
Potenza [kW]	0,5 – 2 (sola elettronica delle valvole); 15 – 30 aggiuntivi per il compressore d'aria dedicato.
Portata [picks/min]	10 - 30
Carico utile [kg]	< 35
Dimensioni approssimative (L x P x H) [mm]	4.000 x 3.000 x 3.000 (intera cella di lavoro, completa di portale e gabbia di sicurezza); braccio nudo 1.500 x 800 x 1500.

*solo braccio, sensori ausiliari e integrazione esclusi

Tabella 3.8: Tabella riassuntiva separatore a getti d'aria.

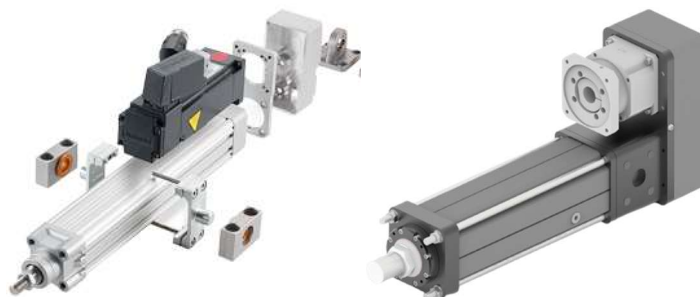
Separatore a getti d'aria


Una batteria di valvole elettropneumatiche ad alta velocità emette brevi impulsi di aria compressa, sincronizzati con il passaggio dell'oggetto target identificato dai sensori a monte. Ciascun impulso devia il rifiuto bersaglio verso una corsia di scarto dedicata, separandolo dal flusso principale.

Produttori	EarthTechnica, Matrix Pneumatics (forniscono solo i moduli, questi vanno poi integrati nella linea)
CAPEX range [€]	15.000 € – 50.000 € (modulo di eiezione completo, per metro di larghezza)
Potenza [kW]	0,5 – 2 (sola elettronica delle valvole); 15 – 30 aggiuntivi per il compressore d'aria dedicato.
Portata [t/h]	5 – 25 per metro di larghezza barra (dipendente da velocità nastro e densità batterie nel flusso)
Perssione ugelli [bar]	2 - 8
Dimensioni approssimative (L x P x H) [mm]	1.500 x 200 x 300

Tabella 3.9: Tabella riassuntiva attuatori lineari.

Attuatori lineari



Gli attuatori lineari producono un movimento rettilineo dell'asta lungo un singolo asse. Ciascuna estensione spinge, per contatto diretto, il materiale target fuori dal flusso principale.

Produttori	Curtiss-Wright (Exlar FTX), Siemens (CASM – 32)
CAPEX range [€]	2.000 € - 5.000 €
Potenza [kW]	0,2 – 2
Tempo Ciclo [ms]	150 - 400
Corsa utile [mm]	50 – 1.200
Dimensioni approssimative (L x P x H) [mm]	1.700 x 200 x 200 (con corsa da 1200 mm)

3.3.4. Configurazioni suggerite per Ecologia Viterbo

In questa sezione sono presentate le configurazioni che meglio rispecchiano i vincoli e le necessità del caso studio di Ecologia Viterbo. I criteri decisionali adottati sono entità dell'investimento, ingombro e facilità di integrazione nell'impianto esistente, purezza del flusso di RAEE e batterie raccolto (*purity*), ed efficienza del recupero (*recovery*). Ciascuno di questi fattori sarà valutato secondo una scala "basso/a", "medio/a", "alto/a", e la scelta sarà determinata dalle definizioni di seguito riportate.

Tabella 3.10: Definizioni per la determinazione dei valori dei criteri decisionali adottati.

Costo dell'investimento		
BASSO	MEDIO	ALTO
Investimento limitato, auto-sostenibile in un periodo di tempo ragionevole.	Investimento importante, ripagabile con l'implementazione di incentivi esterni limitati.	Investimento significativo, non auto-sostenibile e ripagabile unicamente considerando l'implementazione di importanti incentivi esterni.

Facilità di integrazione nell'impianto esistente		
BASSA	MEDIA	ALTA
Installazione significativa che richiede importante ampliamento dell'impianto esistente.	Installazione rilevante che richiede parziale ampliamento dell'impianto esistente.	Installazione contenuta che non richiede alcun ampliamento dell'impianto e può essere integrata nella linea esistente.

Purity		
BASSA	MEDIA	ALTA
< 80%	$80\% \leq \text{Purity} < 95\%$	$\geq 95\%$

Recovery		
BASSO	MEDIO	ALTO
< 90%	$90\% \leq \text{Recovery} < 95\%$	$\geq 95\%$

Per completezza si riportano anche le formule usate per la definizione di purity e recovery:

- $\text{Purity} = \text{True Positive} / (\text{True Positive} + \text{False Positive})$
- $\text{Recovery} = \text{True Positive} / (\text{True Positive} + \text{False Negative})$

Poiché un singolo scanner a raggi X ha una capacità nominale insufficiente a garantire portata target di 50 t/h, si è ritenuto necessario parallelizzare lo stadio di identificazione. Tutte e tre le configurazioni proposte condividono quindi la seguente architettura di partenza:

- N. 1 Sistema di apertura sacchi (BHS Bag Breaker® o simili) dimensionato con la portata di 50 t/h. La fase di apertura sacchi si rende necessaria in ciascuno degli scenari ipotizzati per far uscire batterie e RAEE dai sacchi e renderle accessibili agli attuatori.
- N. 1 distributore a tre vie e N. 3 Nastri di accelerazione paralleli, ciascuno destinato a portare ~17 t/h verso uno scanner dedicato.
- N. 3 scanner a raggi X trasmessi in parallelo. L'ispezione a raggi X deve fornire sia una vista laterale che superiore del nastro, al fine di permettere una ricostruzione accurata dell'ingombro e della forma del pezzo. Tali informazioni risultano l'input per l'attuatore, che provvederà alla rimozione del rifiuto e al suo posizionamento nell'apposito contenitore di raccolta.

A questa, per ciascuna configurazione, sono aggiunti in maniera modulare ulteriori stadi di riconoscimento e/o separazione.

Come già anticipato, ogni soluzione identificata è contestualizzata all'impianto di Ecologia Viterbo, e il numero di macchinari proposti, nonché la loro disposizione, potrebbe variare con la portata dell'impianto in analisi. Restano valide però tutte le considerazioni relative a benefici e limitazioni delle diverse configurazioni. Inoltre, il presente report si limita ad indicare le portate indicative processabili da ciascuno stadio del processo; specifiche tecniche legate al dimensionamento dell'impianto (es. tipologia, larghezza e velocità del nastro, configurazione delle diverse macchine, disposizione, etc.) andranno valutate separatamente attraverso un'analisi di dettaglio.

Configurazione 1

La prima configurazione proposta è la più semplice tra le tre. Essa è composta dall'architettura base precedentemente descritta, e adotta due delta grippers per ciascuna delle tre linee (si veda Figura 4): di questi, uno monta un utensile adatto alla raccolta di batterie di piccola dimensione (AA, AAA, a bottone), l'altro è pensato invece per RAEE di taglia medio-piccola (smartphone, piccole fotocamere, spazzolini elettrici, etc.). In alternativa, sarebbe possibile optare per un unico delta gripper installando un organo di presa multi-utensile per la gestione della variabilità del materiale trattato; sebbene questo secondo approccio richieda minori spazi di installazione, garantirebbe una portata minore ed elevati costi dell'utensile, ed è pertanto sconsigliato.

Premettendo che in un periodo iniziale l'architettura base potrebbe anche essere testata implementando una separazione manuale basata sugli input del sistema di riconoscimento a raggi X, questa linea di pretrattamento risulta già abbastanza completa: ha la potenzialità di garantire tasso di recupero (*recovery*) buono (per quanto inferiore al 90%) e purezza (*purity*) discreta, mantenendo il costo dell'investimento limitato. I principali svantaggi sono da ricondursi all'inaccessibilità delle batterie rimaste all'interno di un sacco non completamente aperto e alla difficoltà nella rimozione dal flusso di RAEE di dimensione medio-grande. Anche se in questo caso non è previsto, la prima di queste controindicazioni può essere risolta integrando una camera RGB in grado di stabilire l'accessibilità della batteria – eventualmente comunicando al robot con payload maggiore la necessità di rimuovere il sacco contenente residui indesiderati nel flusso principale – la seconda invece rappresenterebbe un problema piuttosto

importante nel momento in cui batterie al litio fossero presenti in rifiuti di dimensioni maggiori di quelle gestibili dai delta grippers (es. pacchi batterie o rifiuti elettronici con geometrie e ingombri non standard).

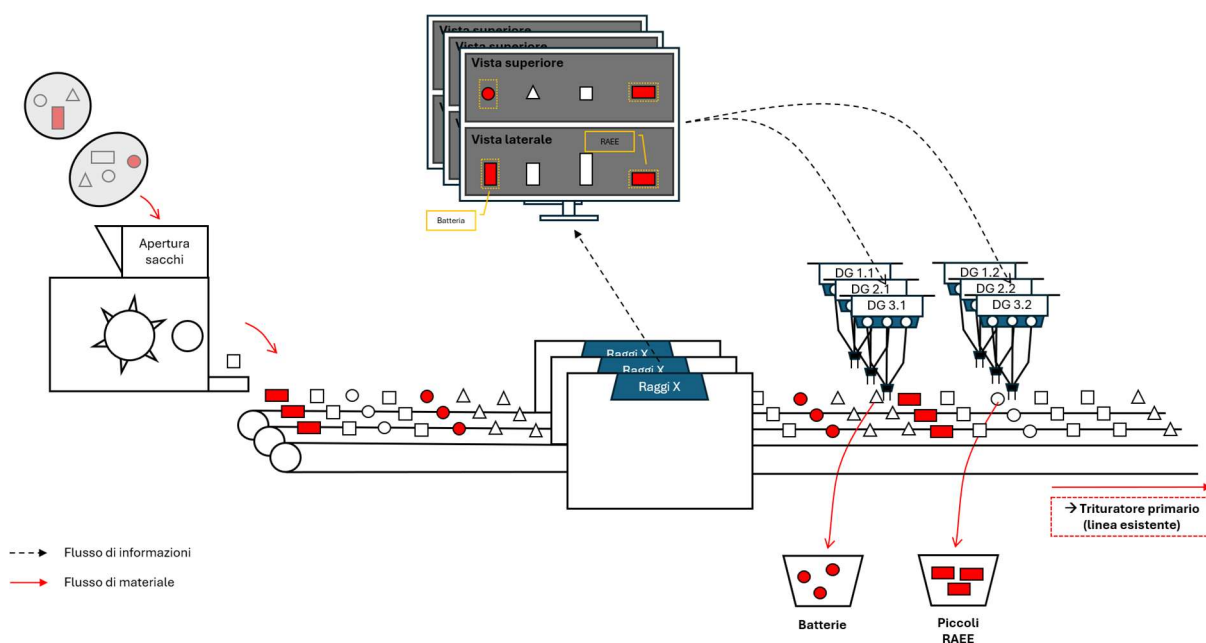


Figura 4 Configurazione 1 - Schema riepilogativo semplificato.

Tabella 3.11: Configurazione 1 – Tabella riassuntiva investimento.

Costo dell'investimento	Integrazione	Purity	Recovery
MEDIO	MEDIA	ALTA	BASSO

Configurazione 2

La seconda configurazione mira a ridurre le difficoltà del setup precedente nella gestione dei rifiuti medio-grandi, aumentando quindi il numero di rifiuti target recuperati dal processo. Per fare questo viene previsto un attuttore aggiuntivo in grado di garantirne la rimozione dal flusso principale. Così come per i delta grippers, anch'esso riceve in input la posizione e le dimensioni dei rifiuti dallo scanner a raggi X e procede con la loro rimozione.

Il componente aggiuntivo per la configurazione 2 consiste in un attuttore lineare. Questa scelta permette di mantenere un livello di investimento ragionevole a fronte di un significativo incremento nella *recovery*. L'attuttore in questione è da posizionare prima dei due delta grippers, già presenti nella configurazione 1 e incaricati della rimozione di batterie e RAEE di dimensioni medio-piccole, e consente la gestione dei rifiuti di maggiori dimensioni talvolta presenti nel flusso e difficilmente estraibili con i bracci robotici installati.

Il principale svantaggio di questo setup risiede nella riduzione della purezza del flusso di batterie data dall'attuttore lineare: spingendo il rifiuto target, il pistone trascina con sé anche tutto ciò che si trova lungo la sua traiettoria, contaminando il flusso di batterie secondario. Tale limitazione può essere gestita

posizionando un operatore a controllo del flusso separato dall'attuatore lineare qualora lo si ritenesse necessario.

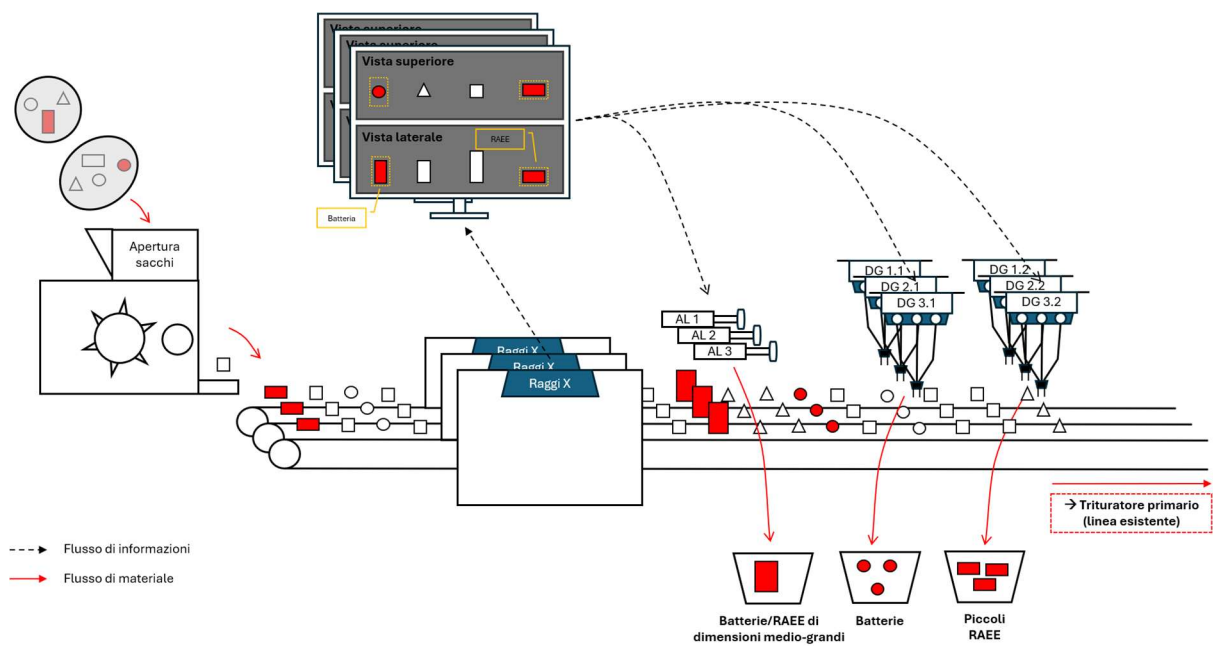


Figura 5 Configurazione 2 - Schema riepilogativo semplificato.

Tabella 3.12: Configurazione 2 – Tabelle riassuntive investimento.

Costo dell'investimento	Integrazione	Purity	Recovery
MEDIO	MEDIA	MEDIA	ALTO

Configurazione 3

Quest’ultima configurazione è da considerarsi una versione avanzata della precedente. In questo caso vengono installati sia una camera RGB dotata di un sistema di elaborazione AI per il riconoscimento, sia un braccio robotico articolato per una più precisa gestione dei rifiuti di dimensioni medio-grandi. Inoltre, l'installazione di un sistema di visione integrato con AI è da considerarsi un significativo valore aggiunto; esso offrirebbe le garanzie già illustrate in precedenza riguardo la determinazione del livello di accessibilità della batteria/RAEE, fornendo inoltre all'attuatore designato alla rimozione dei rifiuti medio-grandi maggiori dettagli su geometria, posizione e ingombro degli stessi.

È sicuramente lo scenario che comporta il maggiore investimento iniziale, ma è da considerarsi la soluzione più completa tra le proposte in termini di purezza del flusso delle batterie/RAEE e tasso di recupero. Il principale driver di scelta da adottare per valutare quale tra questa e la seconda configurazione sia la più adatta all'impianto è sicuramente il numero di RAEE e pacchi batterie processati. Occorrenze basse renderebbero il precedente layout più che sufficiente per la gestione della fase di pretrattamento dei rifiuti; viceversa, la presente proposta andrebbe considerata – consapevoli del maggiore CAPEX necessario alla sua implementazione.

Anche adottando questo design, è verosimile ipotizzare che il problema della gestione delle batterie non isolate o coperte da altri rifiuti non possa considerarsi pienamente risolto, e rimane probabilmente la principale limitazione dell'impianto. Una possibile soluzione potrebbe essere quella di valutare l'adozione di nastri vibranti come sistema per incrementare la distribuzione e lo spazio tra i rifiuti sul nastro. Tuttavia, la valutazione dettagliata dell'implementazione – e della sua necessità – è lasciata ad un eventuale successivo stadio di progetto.

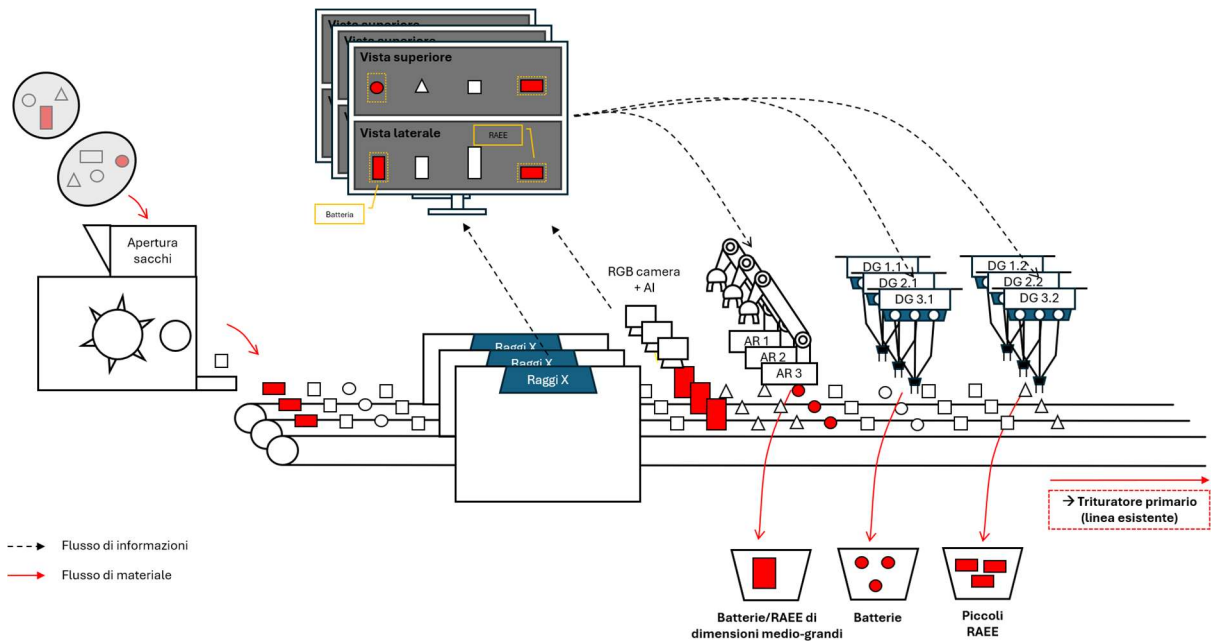


Figura 6 Configurazione 3 - Schema riepilogativo semplificato.

Tabella 3.13: Configurazione 3 – Tabella riassuntive investimento.

Costo dell'investimento	Integrazione	Purity	Recovery
ALTO	ALTA	ALTA	ALTO

Per completezza è bene precisare che l'impossibilità di avere una suddivisione per tipologia chimica delle batterie è da ritenersi intrinseca alla natura dei rifiuti trattati (flusso non di sole batterie e contaminato), oltre che del sistema di identificazione adottato, e non è pertanto mai stato menzionato nella valutazione delle diverse configurazioni. Questo risulta tuttavia di minore rilevanza per l'impianto in esame, che comunque può conferire le batterie esauste miste ad impianti di selezione e cernita della filiera dei rifiuti di batterie.

3.4. Valutazione economica

Il presente capitolo fornisce una stima economica di massima delle apparecchiature e dei principali costi di integrazione associati a ciascuna delle tre configurazioni descritte nel capitolo 3.3.4. L'analisi è volutamente focalizzata sulle voci hardware e di integrazione tecnico-impiantistica, escludendo le voci di costo accessorie quali opere civili e adeguamenti strutturali dell'edificio esistente, licenze software ricorrenti e attività di commissioning e training del personale, che dipendono fortemente dalla situazione specifica del singolo impianto e dalle scelte gestionali del committente. La stima è di tipo parametrico, e va intesa come riferimento di prima approssimazione da consolidare in fase di sviluppo progettuale tramite offerte vincolanti dei fornitori.

Per ciascuna configurazione il CAPEX è scomposto in tre componenti: (i) le apparecchiature principali, quotate per categoria tecnologica sulla base di prezzi di listino e di prassi di mercato del periodo 2025-2026, con un'incertezza legata a configurazione, sconti di volume e fluttuazioni dei prezzi delle materie prime; (ii) l'integrazione meccanica, elettrica e di automazione; (iii) le voci specifiche non riconducibili a listino, in particolare il database di addestramento del classificatore AI per il flusso del committente. Le tre configurazioni condividono l'architettura di parallelizzazione su tre linee descritta nel capitolo precedente; le voci comuni – bag breaker, distributore a tre vie con i relativi nastri di accelerazione, e tre scanner a raggi X – costituiscono il front-end di pretrattamento. Le differenze in CAPEX derivano interamente dalle scelte effettuate sulle fasi di separazione e di identificazione complementare.

Configurazione 1

La prima configurazione è quella con il minor numero di apparecchiature installate. Il costo unitario del Delta gripper riportato in tabella è da intendersi inclusivo del braccio, del sistema di visione di base e del gripper custom; tale fascia è una stima conservativa di prima approssimazione, dato che i prezzi puntuali dei sistemi commerciali variano in modo significativo in base all'utensile installato e al modello di business del fornitore. Le voci di costo sono riassunte nella tabella che segue.

Tabella 3.14: Configurazione 1 – Voci di costo.

Voce di costo	Q.tà	Costo unitario [k€]	Subtotale [k€]
Bag breaker (BHS o equivalente)	1	280 - 400	280 - 400
Sistema di movimentazione meccanica	1	80 - 100	80 - 150
Scanner a raggi X (Smiths Detection)	3	280 - 450	840 - 1.350
Delta gripper con visione di base e gripper custom	6	30 - 60	180 - 360
Subtotale apparecchiature			1.380 - 2.260
Database addestramento AI	-	-	30 - 80
Integrazione meccanica, cablaggio e PLC	-	-	100 - 150
TOTALE CONFIGURAZIONE 1			1.510 - 2.490

Il valor medio della stima si attesta intorno a 2,0 milioni di euro. La quota dominante è attribuibile ai tre scanner a raggi X, che da soli pesano per circa il 60% del subtotale delle apparecchiature; il bag breaker contribuisce per un ulteriore 19% circa, i sei Delta gripper per circa il 15% e il sistema di movimentazione meccanica per il restante 6%. La voce di integrazione – intesa come cablaggio elettrico, montaggio in linea, configurazione del PLC e sincronizzazione dei sensori con gli attuatori – è dimensionata come quota aggiuntiva rispetto al valore delle apparecchiature.

Configurazione 2

La seconda configurazione mantiene integralmente l'architettura della precedente e aggiunge un attuttore lineare (pistone pneumatico guidato) su ciascuna delle tre linee per la deflessione di rifiuti di dimensioni medio-grandi non gestibili dai Delta gripper. Il costo incrementale rispetto alla Configurazione 1 è modesto in termini assoluti, dato il costo unitario contenuto del pistone e dei relativi accessori; una buona parte della spesa aggiuntiva si concentra nell'integrazione di sincronismo con il sistema di tracking dei rifiuti.

Tabella 3.15: Configurazione 2 – Voci di costo.

Voce di costo	Q.tà	Costo unitario [k€]	Subtotale [k€]
Architettura base e Delta gripper (come in configurazione 1)			1.380 - 2.260
Pistone pneumatico guidato	3	2 - 5	6 - 15
Subtotale apparecchiature			1.386 - 2.275
Database addestramento AI	-	-	30 - 80
Integrazione meccanica, cablaggio e PLC	-	-	105 - 165
TOTALE CONFIGURAZIONE 2			1521 - 2510

Anche in questo caso il valor medio della stima si attesta a poco più di 2,0 milioni di euro, con un incremento marginale rispetto alla precedente soluzione (circa 15 mila euro). Tale incremento è trascurabile a fronte di un beneficio rilevante in termini di recovery: il pistone consente la cattura di pacchi batteria e RAEE di dimensioni fuori dal range di payload dei Delta gripper, che altrimenti transiterebbero verso il frantumatore primario con relativo rischio di innesco incendio.

Configurazione 3

La terza configurazione introduce due elementi di maggior costo: una camera RGB con sistema di elaborazione AI da integrare allo scanner a raggi X, e un braccio robotico articolato per ciascuna linea. I costi adottati per i moduli AI-driven sono stime conservative coerenti con l'ordine di grandezza dei sistemi commerciali oggi disponibili nel settore della separazione dei rifiuti (quotazioni indicative ricavate

da listini accessibili e cataloghi di produttori industriali). L'aggiunta della camera RGB richiede inoltre un database di addestramento esteso per gestire la classificazione multi-classe.

Tabella 3.16: Configurazione 3 – Voci di costo.

Voce di costo	Q.tà	Costo unitario [k€]	Subtotale [k€]
Architettura base e Delta gripper (come in configurazione 1)			1.380 - 2.260
RGB camera	3	5 - 20	15 - 60
Robot articolato	3	40 - 100	120 - 300
Subtotale apparecchiature			1.515 - 2.620
Database addestramento AI	-	-	50 - 100
Integrazione meccanica, cablaggio e PLC	-	-	120 - 180
TOTALE CONFIGURAZIONE 2			1685 - 2900

Il valor medio della stima si attesta intorno a 2,3 milioni di euro, con un incremento di circa il 14% rispetto alla Configurazione 2. Tale aumento è giustificato dal duplice salto di prestazione: la camera RGB con AI riduce drasticamente i falsi positivi grazie alla classificazione multi-sensore, mentre il braccio articolato consente la rimozione selettiva dei rifiuti di dimensioni medio-grandi senza la perdita di purity associata al pistone pneumatico.

3.4.1. Sintesi economica e contestualizzazione nel modello di business

Il confronto sintetico tra le tre configurazioni mostra investimenti di CAPEX nell'ordine di 1,5-2,9 milioni di euro, valori coerenti con la scala dell'intervento e con l'ordine di grandezza generalmente riportato in letteratura per linee di separazione integrate in impianti TMB/MRF [13].

Per inquadrare correttamente la sostenibilità economica di tali investimenti, occorre considerare che il modello di gestione degli impianti TMB non è uniforme sul territorio nazionale. In alcuni contesti, il servizio di trattamento dei rifiuti urbani residui può essere affidato tramite gare pubbliche bandite dagli Enti di Governo d'Ambito (EGATO) o da altri soggetti competenti, attraverso le quali viene individuato l'impianto destinato a servire uno specifico bacino. In altri casi, come per Ecologia Viterbo, gli impianti e i relativi flussi sono individuati dalla pianificazione regionale: i conferimenti non derivano quindi, in via ordinaria, da una libera scelta dell'impianto o da procedure competitive periodiche, ma dagli assetti definiti dalla Regione. La remunerazione dell'impianto avviene tramite tariffe regolate dall'Autorità di Regolazione per Energia Reti e Ambiente (ARERA), che con la Deliberazione 397/2025/R/RIF ha approvato il nuovo Metodo Tariffario Rifiuti MTR-3 per il quadriennio 2026-2029. Tale schema sottopone le tariffe di accesso a specifici vincoli di crescita e consente il riconoscimento nel Piano Economico Finanziario dell'impianto riguardante i costi efficienti di esercizio e di investimento, purché adeguatamente documentati. Nella

determinazione tariffaria vengono inoltre considerati i ricavi imputabili all'impianto, inclusi quelli derivanti dalla valorizzazione dei materiali e dell'energia recuperati. La sostenibilità dell'investimento dipende quindi dalla possibilità di includerne i costi ammissibili nella predisposizione tariffaria e dalla loro successiva validazione, e non da un recupero automatico attraverso la tariffa. All'interno di questo schema, l'investimento in una linea di pretrattamento per la rimozione delle batterie e dei RAEE dal flusso indifferenziato presenta una problematica strutturale: non genera ricavi sufficienti a coprirne autonomamente l'ammortamento. Il valore di mercato delle frazioni recuperate (batterie miste al litio non classificate per chimica, piccoli RAEE) è modesto rispetto al CAPEX, e i benefici principali – riduzione del rischio incendi, minore contaminazione del CSS, conformità a obblighi normativi prospettici – hanno natura prevalentemente di mitigazione del rischio e di adempimento, non di generazione diretta di ricavo. Di conseguenza, anche gli investimenti relativamente contenuti stimati nelle tre configurazioni non risultano profittevoli di per sé nel quadro tariffario attuale, e richiedono verosimilmente uno strumento di policy esterno per essere sostenibili.

Lo strumento può assumere due forme. La prima è quella degli incentivi pubblici diretti (bandi nazionali o regionali, fondi PNRR, contributi a fondo perduto); in questo scenario una porzione del CAPEX viene coperta da risorse pubbliche, ma il modello presenta una criticità importante per il caso d'uso in esame. L'investimento incentivato introduce tipicamente un disallineamento di incentivi tra finanziatore e operatore: il gestore può essere portato a installare l'apparecchiatura per accedere al finanziamento senza un vero interesse strategico al suo funzionamento continuativo, perché qualora l'apparecchiatura sia poco efficiente o costosa da mantenere, l'operatore non subisce un danno proporzionato. Il rischio è di realizzare impianti spot funzionanti solo nominalmente, che non contribuiscono al raggiungimento dei target nazionali di recupero su scala sistemica. La seconda forma – più coerente con l'obiettivo di sistema – è quella dell'obbligo normativo: l'introduzione per via legislativa di un requisito di pretrattamento per la rimozione di batterie e RAEE dal flusso indifferenziato, applicato a tutti gli impianti TMB operanti sul territorio nazionale. In questo scenario il costo dell'intervento entra uniformemente nei piani economico-finanziari di tutti i gestori e, attraverso le gare d'appalto successive, si traduce in un incremento omogeneo dell'offerta economica presentata all'EGATO da tutti i partecipanti. Il maggior costo viene quindi assorbito dalla tariffa regolata, ma poiché tutti i competitor lo sostengono in misura analoga, non si genera alcuno svantaggio competitivo: il mercato rimane equilibrato e l'adeguamento avviene a regime su scala sistemica, garantendo che gli impianti di pre-selezione siano effettivamente dimensionati per la portata di esercizio e mantenuti in condizioni operative.

3.4.2. Estensione al caso nazionale

Per stimare l'impatto economico complessivo nazionale dell'introduzione di un sistema di identificazione e separazione di batterie esauste e RAEE, la valutazione economica fino ad ora esposta è stata estesa a tutta la rosa degli impianti TMB presenti in Italia. Per garantire una stima coerente dell'investimento complessivo è stata analizzata la composizione del campione di TMB italiani, prendendo in considerazione la portata annuale, la portata oraria e l'attuale composizione delle frazioni in uscita.

Come già anticipato nella sezione 2, in Italia sono presenti 119 impianti di TMB che trattano direttamente RUR, ma una buona parte di questi, specialmente al nord, tratta pochi volumi di rifiuti relativamente al totale nazionale anche in virtù delle peculiarità della filiera e della maggior produzione di rifiuto differenziato.

L'investimento totale a livello nazionale è stato quindi stimato per due diversi scenari e, in entrambi i casi, l'investimento del singolo impianto è stato calcolato a partire dalle considerazioni riportate in questa

sezione per Ecologia Viterbo considerando un numero di linee congruo alla portata dell'impianto. Lo Scenario 1 considera che l'installazione di identificazione e separazione del rifiuto venga effettuata in tutti gli impianti TMB presenti in Italia, con l'obiettivo di recuperare più materiale possibile. Lo Scenario 2, invece, applica la nuova configurazione solo agli impianti che complessivamente trattano l'80% del RUI totale, aggiungendo un ulteriore vincolo di copertura del territorio, prevedendo quindi almeno un impianto per regione.

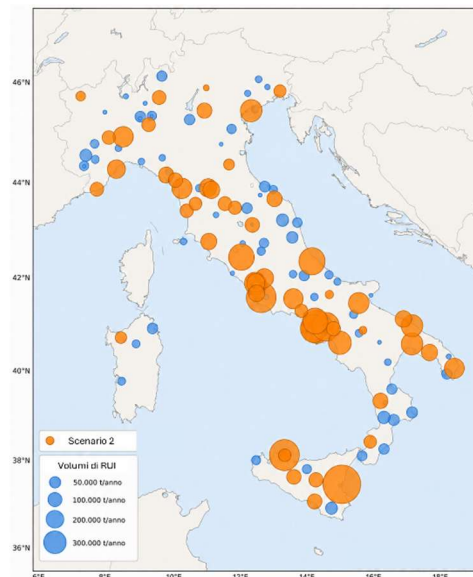


Figura 7 Impianti TMB italiani, selezionati con criterio di Pareto

Tabella 17 Investimento totale e volumi di batterie esauste e RAEE potenzialmente recuperabili da tutto il RUR italiano. Per la stima dei volumi di RAEE e RB sono state utilizzate le stime dello Studio Erion 2025 [1].

	Numero di impianti	Portata oraria media (t/h)	Investimento totale (M€)	RUI trattato (kt/y)	Batterie esauste potenzialmente recuperabili (ton)	RAEE potenzialmente recuperabili (ton)
Scenario 1	119	13	114 - 207	6 697	4 018	69 652
Scenario 2	57	24	65 - 114	5 547	3 328	57 689

4. Conclusioni

Il mancato raggiungimento dei tassi di raccolta imposti a livello europeo ha incentivato l'indagine dei flussi in uscita dagli impianti TMB e le relative analisi merceologiche. I risultati emersi da tali analisi hanno evidenziato come il contenuto di alcune categorie di rifiuti – in particolare RAEE e Rifiuti di Batterie– sembri essere superiore nel flusso di RUR rispetto a quello raccolto tramite i canali dedicati. Da qui l'obiettivo del presente lavoro: progettare una linea di pretrattamento per impianti TMB in grado di individuare e rimuovere batterie e piccoli RAEE dal flusso principale di rifiuti solidi urbani. L'esigenza risponde a due bisogni complementari: il primo, di natura strategica e particolarmente rilevante per gli attori a monte della *value chain*, riguarda l'intercettazione di queste due tipologie di rifiuti al fine di avvicinarsi ai tassi di raccolta richiesti a livello europeo; il secondo, di natura operativa, proviene direttamente dagli impianti di trattamento, esposti a un rischio incendio significativo per effetto delle batterie e dei RAEE impropriamente conferiti nel flusso indifferenziato.

Il progetto ha portato alla definizione di tre configurazioni alternative, valutate su quattro criteri: costo dell'investimento, facilità di integrazione in impianti esistenti, tasso di recupero garantito (*recovery*) e purezza del flusso raccolto (*purity*). Il dimensionamento della linea è stato calibrato sui dati dell'impianto di Ecologia Viterbo, ma le tecnologie proposte restano applicabili – con le opportune riparametrizzazioni sul numero e sulla portata dei singoli macchinari – a impianti TMB di qualsiasi taglia. Il costo dell'investimento stimato per una singola linea è compreso tra 1,5 e 2,9 milioni di euro a seconda della configurazione scelta. Questi risultano essere valori coerenti con quanto riportato in letteratura per interventi di analogo perimetro tecnologico e nell'ordine di grandezza degli investimenti effettuati da un impianto delle dimensioni e delle caratteristiche operative di Ecologia Viterbo. Estendendo il ragionamento alla scala nazionale, ipotizzando l'implementazione di tali soluzioni sugli impianti TMB che complessivamente coprono l'80% del flusso di RUR generato annualmente in Italia – un insieme dell'ordine di 60 impianti tra quelli con maggiore capacità di trattamento, coerentemente con la distribuzione degli impianti censiti dall'ISPRA – l'investimento complessivo si collocherebbe indicativamente nel range di 65 - 114 milioni di euro. È una cifra significativa in valore assoluto, ma contenuta a fronte dei benefici attesi (riduzione del rischio incendi, aumento dei tassi di recupero, minore contaminazione del CSS) e in relazione alla dimensione economica complessiva del settore. Il suo assorbimento andrebbe inoltre distribuito su più anni e ripartito tra gli operatori, secondo le logiche discusse al capitolo 3.4.

È tuttavia opportuno precisare che l'implementazione di un sistema di separazione a valle del ciclo di vita del rifiuto non rappresenta la soluzione primaria al problema. La questione va prima di tutto affrontata a monte, al livello del consumatore e del cittadino, attraverso campagne di sensibilizzazione mirate, una maggiore capillarità dei sistemi di raccolta differenziata e strumenti che facilitino il corretto conferimento di batterie e piccoli RAEE. Le tecnologie di pretrattamento come quelle proposte in questo lavoro costituiscono una componente essenziale ma complementare a una strategia più ampia, nella quale prevenzione a monte e recupero a valle devono operare in sinergia per raggiungere gli obiettivi di circolarità posti a livello europeo.

5. Ringraziamenti

Si ringrazia Ecologia Viterbo per la disponibilità, la collaborazione e il supporto fornito durante lo svolgimento dello studio. Il contributo dei referenti e degli operatori dell'impianto, attraverso la condivisione di informazioni tecniche, l'accesso alle strutture e il confronto sulle esigenze operative, è stato fondamentale per sviluppare un'analisi aderente alle reali condizioni di funzionamento dell'impianto e per valutare concretamente l'applicabilità delle soluzioni proposte.

Elenco delle Figure

<i>Figura 1 Gli impianti TMB in Italia classificati per volumi di RUI trattati</i>	<i>7</i>
<i>Figura 2 Ecologia Viterbo S.p.A. Impianto TMB, S.P. Teverina km 7,63 - 01100 Viterbo.....</i>	<i>8</i>
<i>Figura 3 Diagramma del flusso dei rifiuti dell'impianto di TMB di Ecologia Viterbo.....</i>	<i>11</i>
<i>Figura 4 Configurazione 1 - Schema riepilogativo semplificato.</i>	<i>23</i>
<i>Figura 5 Configurazione 2 - Schema riepilogativo semplificato.</i>	<i>24</i>
<i>Figura 6 Configurazione 3 - Schema riepilogativo semplificato.</i>	<i>25</i>
<i>Figura 7 Impianti TMB italiani, selezionati con criterio di Pareto.....</i>	<i>30</i>

Elenco delle Tabelle

<i>Tabella 3.1: Distribuzione rifiuti in ingresso.</i>	<i>10</i>
<i>Tabella 3.2: Distribuzione rifiuti prodotti in uscita.....</i>	<i>10</i>
<i>Tabella 3.3: Tabella riassuntiva sistema di apertura sacchi.....</i>	<i>13</i>
<i>Tabella 3.4: Tabella riassuntiva camera RGB</i>	<i>14</i>
<i>Tabella 3.5: Tabella riassuntiva scanner a raggi X.</i>	<i>15</i>
<i>Tabella 3.6: Tabella riassuntiva Delta robot.....</i>	<i>18</i>
<i>Tabella 3.7: Tabella riassuntiva robot articolato.</i>	<i>19</i>
<i>Tabella 3.8: Tabella riassuntiva separatore a getti d'aria.....</i>	<i>19</i>
<i>Tabella 3.9: Tabella riassuntiva attuatori lineari.....</i>	<i>20</i>
<i>Tabella 3.10: Definizioni per la determinazione dei valori dei criteri decisionali adottati.</i>	<i>21</i>
<i>Tabella 3.11: Configurazione 1 – Tabella riassuntiva investimento.</i>	<i>23</i>
<i>Tabella 3.12: Configurazione 2 – Tabelle riassuntive investimento.</i>	<i>24</i>
<i>Tabella 3.13: Configurazione 3 – Tabella riassuntive investimento.</i>	<i>25</i>
<i>Tabella 3.14: Configurazione 1 – Voci di costo.....</i>	<i>26</i>
<i>Tabella 3.15: Configurazione 2 – Voci di costo.....</i>	<i>27</i>
<i>Tabella 3.16: Configurazione 3 – Voci di costo.....</i>	<i>28</i>
<i>Tabella 17 Investimento totale e volumi di batterie esauste e RAEE potenzialmente recuperabili da tutto il RUR italiano. Per la stima dei volumi di RAEE e RB sono state utilizzate le stime dello Studio Erion 2025 [1].....</i>	<i>30</i>

Bibliografia

- [1] Erion, “Il potenziale inespresso nel rifiuto indifferenziato.” Accessed: Jul. 15, 2026. [Online]. Available: <https://erion.it/it/studi-e-proposte/potenziale-inespresso-nel-rifiuto-indifferenziato/>
- [2] Stichting OPEN, “E-Waste in het huishoudelijk restafval, jaar 2024,” 2024. Accessed: Jul. 15, 2026. [Online]. Available: <https://www.stichting-open.org/en/knowledge/>
- [3] Recupel, “Sorting analysis household waste 2019-2021,” 2021, Accessed: Jul. 15, 2026. [Online]. Available: www.ovam.be
- [4] Ecologic, “Remove WEEE and batteries from mixed municipal waste,” 2026. Accessed: Jul. 15, 2026. [Online]. Available: www.ecologic-france.com
- [5] Electrao, “Collection of Small Electrical and ICT Equipment, Lamps, and Batteries in Municipal Waste”. Dato non pubblicato, analisi interna, 2025.
- [6] ISPRA, “Rapporto Rifiuti Urbani Edizione 2025,” 2025, Accessed: Jul. 15, 2026. [Online]. Available: <https://www.isprambiente.gov.it/it/pubblicazioni/rapporti/rapporto-rifiuti-urbani-edizione-2025>
- [7] X. C. A. Chacon, G. Cappuccino, and R. A. Lu, “Smart sorting systems of spent lithium batteries: Challenges and pathways to industrial adoption,” *J. Energy Storage*, vol. 153, p. 120971, Apr. 2026, doi: 10.1016/j.est.2026.120971.
- [8] T. Ueda, S. Koyanaka, and T. Oki, “In-line sorting system with battery detection capabilities in e-waste using combination of X-ray transmission scanning and deep learning,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 201, p. 107345, Feb. 2024, doi: 10.1016/j.resconrec.2023.107345.
- [9] W. Sterkens, D. Diaz-Romero, T. Goedemé, W. Dewulf, and J. R. Peeters, “Detection and recognition of batteries on X-Ray images of waste electrical and electronic equipment using deep learning,” *Resour. Conserv. Recycl.*, vol. 168, p. 105246, May 2021, doi: 10.1016/j.resconrec.2020.105246.
- [10] S. T. Lau *et al.*, “Removal of batteries from solid waste using trommel separation,” *Waste Management*, vol. 25, no. 10, pp. 1004–1012, Jan. 2005, doi: 10.1016/j.wasman.2005.04.009.
- [11] A. S. A. S. Hamidreza Karbasi, “Robotic Sorting of Shredded E-waste_ Utilizing Deep Learning - ProQuest,” in *Proceedings on the International Conference on Artificial Intelligence*, 2018.
- [12] F. Mistry and J. Prasetyo, “RoBatt: Battery Sorting Robot using Epson VT6 and YOLO v8,” *Journal of Applied Science and Advanced Engineering*, vol. 3, no. 1, pp. 20–26, Mar. 2025, doi: 10.59097/jasae.v3i1.53.
- [13] C. Cimpan, A. Maul, H. Wenzel, and T. Pretz, “Techno-economic assessment of central sorting at material recovery facilities – the case of lightweight packaging waste,” *J. Clean. Prod.*, vol. 112, pp. 4387–4397, Jan. 2016, doi: 10.1016/j.jclepro.2015.09.011.