



UNIVERSITÀ POLITECNICA DELLE MARCHE

DIPARTIMENTO SCIENZE DELLA VITA E DELL'AMBIENTE

Corso di Laurea Magistrale in:
Rischio Ambientale e Protezione Civile

**MINIERE URBANE: ANALISI DELLA SOSTENIBILITÀ DI UN
NUOVO IMPIANTO DI GESTIONE RAEE PER IL RECUPERO DI
MATERIE PRIME SECONDE**

**URBAN MINING: SUSTAINABILITY ANALYSIS OF A NEW WEEE
MANAGEMENT FACILITY FOR THE RECOVERY OF
SECONDARY RAW MATERIALS**

Tesi di Laurea Magistrale di:

D'Arcangelo Matteo

Relatrice:

Prof.ssa Beolchini Francesca

Correlatrice:

Prof.ssa Amato Alessia

Sessione Straordinaria
Anno Accademico 2021/2022

-Non sprecare una goccia, perché ogni goccia è preziosa

Proverbio cinese

Indice	
Introduzione	5
Capitolo primo – Un mondo Hi-Tech	8
1.1 Sete di energia	15
1.1.2 Terre rare	18
1.1.3 Non solo Terre rare	21
1.2 RAEE	26
1.2.2 Aspetti legislativi	30
1.3 Contesto Italiano	33
1.3.1 La rete RAEE	36
1.3.2 Analisi di raccolta	39
Capitolo secondo – Scopo del lavoro	45
Capitolo terzo - Materiali e metodi	47
3.1 Caratteristiche di un impianto di gestione RAEE	47
3.1.1 Impatti	50
3.1.2 Metodi di smaltimento classici	51
3.2.1 Definizione dell’obiettivo e dello scopo	58
3.2.3 Valutazione degli impatti	65
3.2.4 Analisi dei risultati	68
4.1 Caso studio	69
4.2 Impianto	73
4.2.1 Processo Tecnochimica	86
4.2.3 Processo MINT	91
4.3 Studio LCA	95
4.3.1 Dati pretrattamento	98

<i>4.3.2 Dati processo Stokkermill</i>	99
<i>4.3.3 Dati processi comuni</i>	101
<i>4.3.4 Dati processo Tecnochimica</i>	105
<i>4.3.5 Dati processo MINT</i>	107
4.4 Risultati	111
<i>4.4.1 Analisi dell’inventario</i>	112
<i>4.4.2 Caratterizzazione e classificazione</i>	115
<i>4.4.3 Normalizzazione e pesatura</i>	125
Conclusioni	130
Riferimenti	132

Introduzione

Il filosofo Emmanuel Mesthene definì la tecnologia come “l’organizzazione della conoscenza per il conseguimento di fini pratici”.

Usando queste parole potremmo immaginare di dividere la storia dell’evoluzione umana in tanti “pacchetti” di invenzioni, ognuno dei quali rappresentativo del periodo storico di riferimento, che racchiude tutta la conoscenza accumulata fino a quel momento.

Pensiamo ad esempio alla locomotiva a vapore, una scoperta tecnologica di altissimo valore per la società umana. Essa è composta da saperi primordiali come la ruota e il fuoco, insieme alla conoscenza medievale della lavorazione del ferro per costruire i binari e la motrice, uniti dall’invenzione cardine della prima rivoluzione industriale: la macchina a vapore.

Allo stesso modo, se dovessimo immaginare un’invenzione che possa racchiudere tutta la conoscenza umana accumulata fino ad oggi, questa potrebbe essere l’auto elettrica.

All’interno di questo discusso mezzo di trasporto troviamo infatti tutte le pietre miliari della storia moderna: l’automobile, gli schermi touch, il Gps, Informatica, l’intelligenza Artificiale, Internet e gli accumulatori energetici.

Se anche uno solo di questi elementi non fosse stato perfezionato, brevettato o non fossero state fatte le scoperte che ne costituiscono la teoria e la storia, la nostra società sarebbe stata diversa da come la conosciamo ora.

Per questo motivo ho deciso di iniziare il lavoro con una breve storia sulla tecnologia, analizzando le principali dinamiche e gli avvenimenti che hanno portato al mondo che conosciamo oggi: un luogo dove la tecnologia si è insediata in ogni sfumatura della nostra vita e dalla quale inconsciamente, ci lasciamo accompagnare in ogni singolo secondo della nostra giornata.

Ma gli oggetti tecnologici che utilizziamo necessitano di una catena di produzione che consuma molte risorse: da quelle più comuni, alle più complesse costituite da materiali pregiati capaci di rendere i dispositivi elettronici sempre più performanti, comportando una serie di aspetti negativi legati alla tecnologia. Andrò perciò ad analizzare i problemi derivati dal pericolo di approvvigionamento delle risorse e l'impatto ambientale che l'estrazione dei materiali utilizzati producono.

Una delle soluzioni a questi problemi è il recupero di materiali dai rifiuti, in questo caso, trattandosi di rifiuti elettrici ed elettronici, prendono il nome di RAEE e contengono una grande quantità di materiali pregiati e importanti.

Inizierò quindi a descrivere cosa sono i RAEE e perché sono così importanti, passando alla legislazione europea e italiana fino ad arrivare alle analisi di raccolta.

Il secondo capitolo spiegherà lo scopo del lavoro, ovvero uno studio di sostenibilità di un impianto di trattamento RAEE, immaginando di installarlo nella mia città natale, Chieti.

Seguirà il terzo capitolo sui metodi di gestione e smaltimento RAEE in base alle linee guida del 2007 redatte del governo italiano e l'introduzione alla metodologia LCA che sarà utilizzata per svolgere lo studio.

Infine, si passerà al quarto capitolo, dove verrà esposto il caso studio. L'analisi sarà incentrata su due processi innovativi utilizzabili per il recupero di materiali preziosi dalle schede elettroniche, ma l'impianto pensato in questo elaborato avrà altri percorsi per riuscire a sfruttare a 360° il rifiuto RAEE e far tornare ogni suo componente all'interno dell'economia.

Capitolo primo – Un mondo Hi-Tech

Ufficialmente, l'invenzione del telefono è attribuita ad Alexander Graham, che il 10 marzo 1876, rivolse le celebri parole verso il suo assistente tramite l'apparecchio da lui ideato: “Mr. Watson, venga qui, voglio vederla” (Philibin, 2003).

Ma secondo alcuni storici ci sono riferimenti al telefono già nell'opera postuma del filosofo inglese Francis Bacon “Nuova Atlantide” uscita nel 1627. L'autore parla di un lungo tubo parlante, ma è un'idea senza riscontro scientifico visto che per funzionare, un telefono, necessita di energia elettrica ed elettromagnetismo (Philibin, 2003).

La prima arrivò due secoli più tardi, mentre la seconda, indispensabile per trasmettere la voce, venne scoperta sempre negli inizi dell'800 da Micheal Faraday. Egli riuscì a far circolare una debole corrente elettrica in un filo che girava intorno ad un magnete, trasferendo energia a fili vicini e convertendo per la prima volta energia meccanica in elettrica (Philibin, 2003).

Solo a questo punto Alexander Graham aveva tutti gli strumenti per realizzare il primo telefono.

Nella primavera del 1895, su una collina di Pontecchio, vicino Bologna, un giovane inventore di nome Guglielmo Marconi effettuò la prima

comunicazione a distanza con onde Radio. L'interlocutore con cui si scambiò un codice morse si trovava a 2km di distanza e confermò la ricezione tramite uno sparo di fucile (Philibin, 2003).

Le autorità italiane non si resero conto delle potenzialità di questa scoperta, costringendo Marconi ad emigrare a Londra per continuare i suoi esperimenti. I suoi studi saranno così importanti che permetteranno all'uomo di effettuare la prima telefonata tramite un telefono cellulare, il 3 aprile 1973 (Philibin, 2003).

Nella metà del 900, Alan Turing, uno dei più grandi matematici del XX secolo, teorizzò una macchina in grado di eseguire algoritmi. All'epoca aiutò gli alleati alla costruzione di una macchina in grado di decifrare i messaggi di Enigma, macchina criptica dei Tedeschi. Si stima che grazie al suo contributo la guerra terminò con 3 anni in anticipo, risparmiando milioni di vittime e ipotetici scenari devastanti (Hodges, 1983).

Gli studi di Turing furono fondamentali per lo sviluppo dei primi computer elettronici come li conosciamo oggi.

Il primo calcolatore elettronico commercializzato fu l'UNIVAC 1 dell'omonima società nel 1951, fu un elaboratore a valvole dalle dimensioni di 100 metri quadri e un peso di 30 tonnellate. Nulla a che veder con il primo computer moderno che vent'anni dopo fu messo in commercio

dalla Sphere Corporation: Lo Sphere 1, che poteva contare su una memoria espandibile fino a 64Kb e schermo e tastiera incorporati (Adams, 2006) (Maynard, 2003).

L'unione del computer con il telefono cellulare diede vita al primo smartphone, prodotto da IBM nel 1992 e soprannominato Simon (Libi Shen, 2019).



Figura 1.1 IBM Simon

Nei primi anni gli smartphone rimasero molto macchinosi, l'intenzione era quella di riprodurre le caratteristiche del Personal Computer su un piccolo device. Questo si traduceva in strumenti poco intuitivi e di difficile utilizzo per la maggior parte delle persone.

La svolta si ebbe nel 2007 quando, da un palco del Moscone Center di San Francisco, Steve Jobs presentò il primo modello di I-Phone che rivoluzionò

il mondo degli Smartphone proponendo al pubblico un accessorio di facile utilizzo per tutti.



Figura 1.2 I-Phone EDGE

Il successo fu enorme, ma più importante fu il contributo che diede all'evoluzione tecnologica, proponendo una concezione di interfaccia utente-macchina innovativa che oggi viene utilizzata da tutti i produttori (Emílio J.M.Arruda-Filhoa, 2011).

Conquistando un pubblico più vasto, la vendita di Smartphone aumentò nel tempo portando i processi di produzione ad essere progressivamente sempre più economici, con riscontri sul prezzo finale del prodotto che divenne sempre più accessibile. Stesse sorti toccarono anche ai Personal Computer.

Basti pensare che nel 2016 c'erano più persone che avevano un cellulare che l'acqua corrente e ad oggi, nel mondo, si contano circa 6 miliardi di

utilizzatori di smartphone e il 47% della popolazione mondiale ha un computer in casa (McAfee, 2019).

L'Africa rappresenta un esempio estremo dell'importanza che stanno avendo gli smartphone nella vita delle persone e di quanto siano diventati fondamentali: solo il 60% della popolazione ha accesso all'acqua potabile, ma più del 90% ha accesso a internet (Parke P. , 2016). Nel bel mezzo del torrido deserto africano c'è più possibilità di trovare una connessione internet che una fonte di acqua pulita.

Di certo non è una brutta notizia, l'accesso a questa tecnologia, se utilizzata nel modo adeguato, potrebbe permettere ai paesi in via di sviluppo di recuperare il gap secolare di progresso tecnologico e sociale.

Ad esempio, lo smartphone più venduto in India nel 2012 è stato il Lyf Jio F90M, le sue caratteristiche sono paragonabili a quelle del laptop MacBook prodotto da Apple nel 2006. Le persone con questo dispositivo possono andare oltre il solo comunicare, hanno un'enorme potenza di calcolo e, tramite una connessione internet, accesso a tutta la conoscenza accumulata dall'umanità fino a quel momento, gratis (McAfee, 2019).

Nel 2012, l'autore e imprenditore Peter Diamandis ha osservato: “in questo momento, sul suo cellulare, un guerriero Masai nel bel mezzo del Kenya usufruisce di comunicazioni in mobilità migliori rispetto a quelle di cui

godeva il presidente (U.S.A.) venticinque anni fa. Se poi ha anche uno smartphone che utilizza Google, ha accesso a più informazioni di quelle disponibili quindici anni fa dal presidente degli Stati Uniti” (McAfee, 2019).

Nell’arco di un secolo siamo passati da teorie sulle onde radio a un mondo strettamente interconnesso, sempre più supportato dall’intelligenza artificiale e altre innovazioni.

Difatti l’onda Hi-Tech non si è fermata alle telecomunicazioni, ma ha invaso completamente la nostra vita, anche all’interno delle nostre abitazioni. La domotica sta portando all’automatizzazione di qualsiasi oggetto tra le mura domestiche, anche di quegli oggetti che fondamentalmente non necessitano di tecnologie innovative per svolgere il proprio compito, come ad esempio la macchina del caffè intelligente, la porta d’ingresso collegata allo smartphone, il frigorifero con telecamera interna, il lavavetri automatico, l’aspiratore dei fumi calibrata, il piano cottura a induzione e il robot aspirapolvere.

Le case moderne diventano sempre più avanzate e intelligenti, richiedendo sempre più energia e processori per poter funzionare.

Una volta usciti di casa la tecnologia continua ad accompagnarci lungo tutta la giornata, dal momento che prendiamo le chiavi per aprire a distanza

la nostra automobile, la stessa che possiede sistemi intelligenti di controllo e entertainment, passando per l'orologio smart che abbiamo al polso, gli occhiali con fotocamera e la mobilità sostenibile che ci circonda lungo il tragitto.

L'elettronica di consumo ha avuto un'evoluzione e una diffusione tale che nel 2021 il giro d'affari ha toccato la cifra record di 5.2 trilioni di dollari, valore che aumenta anno dopo anno (Statista.com, s.d.).



Figura 1.3-Ray-ban Stories

Oltre i prodotti di consumo e uso quotidiano, l'utilizzo di sistemi tecnologici sono diventati fondamentali per i programmi di sviluppo sostenibile dei paesi per far fronte al cambiamento climatico.

1.1 Sete di energia

Negli ultimi 150 anni le attività antropiche hanno emesso una quantità di gas serra tale da alterare le condizioni climatiche (Silvio Marta, 2021).

I gas serra sono naturalmente presenti nell'atmosfera e hanno il compito di intrappolare le radiazioni solari permettendo alla terra di raggiungere una temperatura adatta alla vita (Mann, 2022). Tuttavia, con le emissioni antropiche, che provengono da molteplici attività come l'uso di generatori, motori e industrie, ma anche dall'agricoltura e l'allevamento, si va ad aumentare la quantità di questi gas, trattenendo più radiazioni del dovuto e di conseguenza aumentando la temperatura terrestre (Plass, 1959).

Il miglior modo per limitare le emissioni di CO₂ è quello di elettrificare ciò che oggi consuma combustibile e ricavare l'energia necessaria da fonti rinnovabili, ovvero tutte quelle fonti energetiche non soggette a esaurimento o con tempo di rigeneramento inferiore al tempo di utilizzo come il solare, l'eolico, l'idroelettrico e il geotermico (IPCC).

Il grafico 1.1 ci mostra come nel mix energetico mondiale, le fonti rinnovabili avranno un ruolo sempre più importante nel futuro.

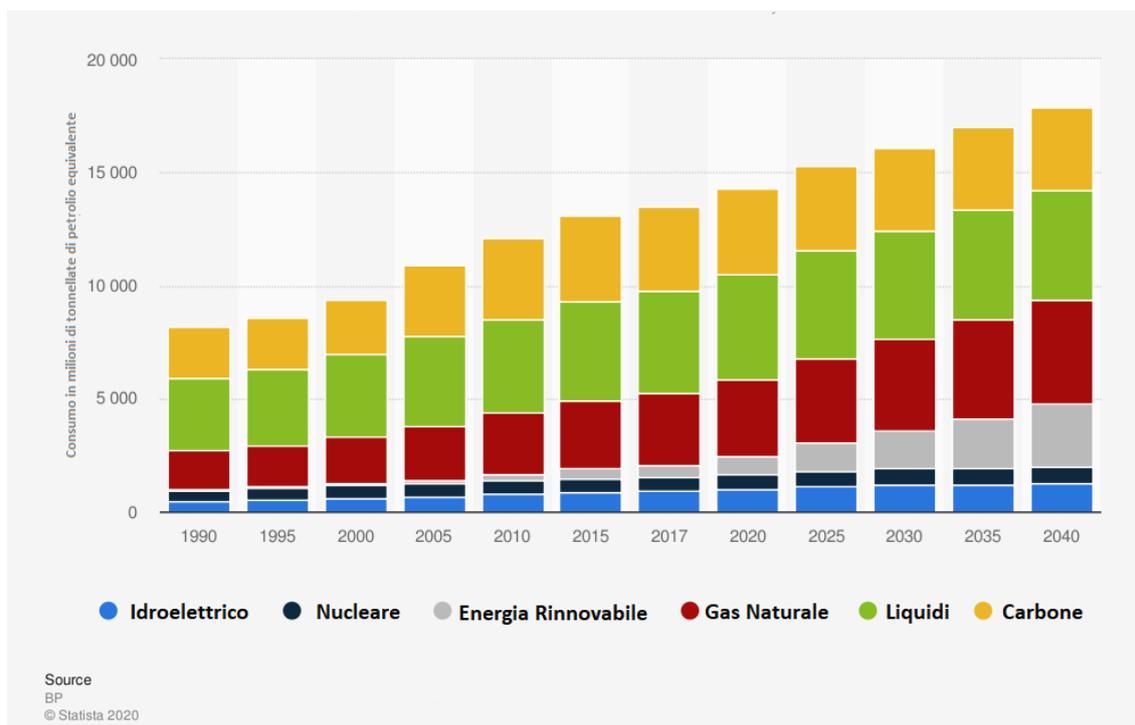


grafico 1.1 Produzione mondiale energetica dal 1990 al 2040.

Le fonti rinnovabili hanno il grave problema di non poter soddisfare la richiesta di energia 365 giorni l'anno in maniera continua, ad esempio il solare e l'eolico possono produrre solo in determinate condizioni climatiche e momenti della giornata, se non c'è il sole e non c'è il vento, non c'è energia.

L'estate appena trascorsa in Italia ci ha dimostrato che anche l'idroelettrico può avere seri problemi di discontinuità, la grave siccità ha portato in sofferenza i fiumi italiani e di conseguenza anche la produzione di energia da parte di impianti idroelettrici si è ridotta. Considerando che le future estati saranno sempre più calde e secche, il problema non può che peggiorare (Rugi, 2022).

Secondo i dati forniti da Terna, a giugno 2022 la produzione di energia da fonti idroelettriche rinnovabile è stata del -37.7% rispetto allo stesso mese dell'anno precedente, a luglio del -34% e ad agosto si è arrivati al -43.7% di produzione rispetto ad agosto 2021. Anche settembre, ottobre e novembre hanno registrato valori negativi rispettivamente di -30%, -38.6% e -17.5%.

Per compensare i periodi di bassa produzione, la soluzione più semplice e intuitiva è quella di utilizzare accumulatori energetici domestici in grado di compensare la richiesta di corrente elettrica nei momenti più critici. Stessi accumulatori che troviamo all'interno dei veicoli elettrici e tutti quei dispositivi che utilizziamo ogni giorno.

Ci sono elementi in comune tra gli accumulatori energetici, i computer, lo smartphone, l'aspirapolvere intelligente, la turbina eolica, i pannelli solari e lo schermo dell'automobile che sono estremamente importanti grazie alla loro caratteristiche chimico-fisiche:

Le “Terre rare” o REE “Rare-earth elements”.

1.1.2 Terre rare

Le terre rare sono 17 elementi chimici molto importanti per il settore informatico e tecnologico grazie alle loro uniche caratteristiche. Comprendono il gruppo dei lantanidi, lo scandio (Sc) e l'ittrio (Y). Nel dettaglio, il gruppo dei lantanidi è composto da 15 elementi con numero atomico che va dal 57 al 71 suddiviso in tre raggruppamenti:

- Terre rare leggere, con peso atomico da 57 a 62:
lantano (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd),
promezio (Pm), samario (Sm)
- Terre rare medie, con peso atomico dal 63 al 66:
europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy)
- Terre rare pesanti, con peso atomico dal 67 al 71:
olmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), itterbio (Yb) e lutezio (Lu)

Applicazioni	Batterie	Illuminazione ai fosfori	Turbine	Magneti permanenti e e-mobility
Terre rare usate	Sc, La, Ce, Nd e Pr	Y, La, Ce Eu Gd e Tb	Y, Nd, Pr e Dy	Nd, Pr, Dy, Gd e Tb

La loro importanza deriva dalle caratteristiche chimico-fisiche che, riportando le parole di Daniel Cordier, scienziato della U.S. Geological Survey, << aiutano tutto a funzionare meglio e hanno caratteristiche uniche, in particolare in termini di magnetismo, resistenza alla temperatura e alla corrosione >>. La proprietà più importante sta nella capacità di esercitare un magnetismo resistente alle alte temperature.

Nonostante il nome possa trarre in inganno, questi materiali non sono per niente rari. Al contrario, secondo la United States Geological Survey, sulla terra sono presenti circa 120 milioni di tonnellate di terre rare, abbastanza per coprire la richiesta attuale mondiale per 3-4 secoli. Ad esempio, il tulio e il lutezio, i meno abbondanti delle terre rare, sono 200 volte più comuni dell'oro (Bagatti, 2015).

Il nome fa quindi riferimento non alla quantità, ma alla difficoltà di estrazione di questi materiali. Infatti, le concentrazioni nei giacimenti, essendo molto basse, rendono i processi di ricerca e recupero molto dispendiosi con un elevato impatto ambientale. L'alto costo di ricerca ed estrazione possono essere compensati solo in due modi: sussidi statali o mano d'opera a basso costo (Yatim, 2022).

Per poter ottenere le terre rare dai giacimenti vengono utilizzate tre tecniche principali: la pirometallurgia, l'elettrometallurgia e

l'idrometallurgia. Queste utilizzano, rispettivamente il principio di calore, l'elettromagnetismo e i solventi acidi per estrarre terre rare, spesso producendo gravi impatti ambientali nel sito di trattamento.

Molti dei terreni dove avvengono queste operazioni hanno infatti un tasso di inquinamento così elevato che ci vorranno secoli prima che le condizioni torneranno ai livelli ambientali (Moccia, 2021).

La Cina, come può mostrarci nel grafico 1.1.1, è il maggior produttore di terre rare, possedendo il 37% delle riserve mondiali, inclusa la più grande miniera di terre rare, situata nella Mongolia interna, chiamata Bayan Obo. Qui nel 2005 si estraeva il 45% della produzione mondiale e, da sola, costituisce attualmente il 50% della produzione cinese (Lawrence J.Drewa, 1990).

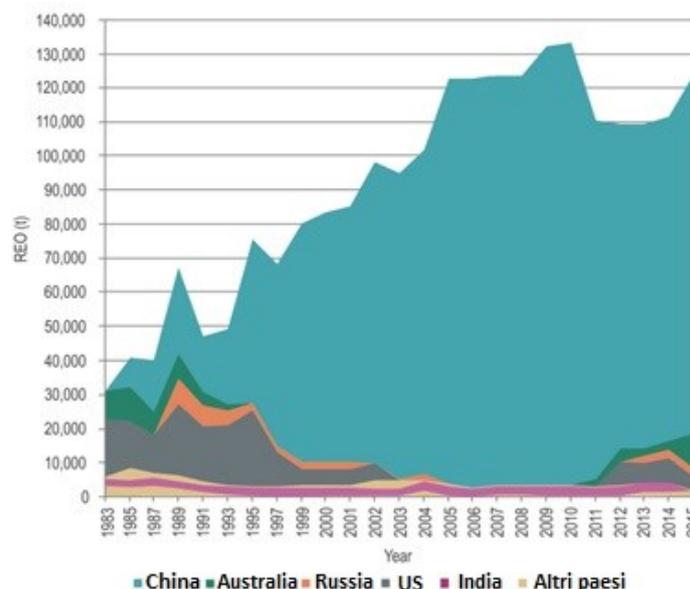


Grafico 1.1.1 Produzione globale di terre rare 1983-2015 (Machacek and Kalvig, 2016). ©NERC

1.1.3 Non solo Terre rare

Chiaramente, le apparecchiature elettroniche non sono composte solamente da terre rare, ma vi troviamo anche elementi più comuni, come plastica e alluminio, e altri meno comuni, che sono contenuti, insieme alle terre rare, in un elenco che viene aggiornato costantemente dalla commissione europea.

Essi sono definiti con l'appellativo di “materie prime critiche” - Raw Materials - e devono questo nome al loro alto rischio di fornitura. L'ultimo aggiornamento della lista, nel 2020, conta 30 elementi, tutti molto importanti per lo sviluppo industriale dell'Europa.

La crisi generata dalla Guerra in Ucraina di quest'anno ci ha mostrato che essere dipendenti dall'importazione di risorse essenziali può mettere a dura prova l'intero apparato industriale di un paese. Poter coprire autonomamente la domanda interna può dare un vantaggio nella scacchiera mondiale economica e favorire lo sviluppo del paese (Giacomo Cucignatto, 2022).

Infatti, la Russia è partner fondamentale per l'importazione di 4 materie prime critiche: Palladio (35%), Rodio (33%), Platino (28%) e Alluminio primario (11%) (Neri, 2022). Queste sono materie indispensabili per il settore dell'automotive, nell'odontoiatria e per la produzione di gioielli

contribuendo alla generazione di 106,7 miliardi di euro. Il 15% della produzione industriale italiana e il 6,1% del PIL (nel calcolo del contributo sono stati considerati anche i semilavorati che rientrano nel processo industriale e non esclusivamente i volumi importati) (Lorenzo Tavazzi, 2022).

Il settore industriale italiano dipende dalle materie prime critiche per circa 564 miliardi di euro ed è il secondo paese europeo per dipendenza di questi elementi coprendo il 32% del PIL. Il primo paese è la Germania, con una dipendenza che genera 1000 miliardi di euro e il 28% del PIL nazionale. (Lorenzo Tavazzi, 2022)

Le materie prime critiche, oltre all'importanza per il settore industriale, sono fondamentali per la transizione ecologica e porteranno nuove sfide alla sicurezza energetica, come mostrato dal grafico 1.1.2, sono fondamentali per la costruzione di impianti per la produzione di energia rinnovabile e per le auto elettriche.

Secondo la Commissione europea, "l'UE potrebbe avere bisogno fino a 18 volte più di litio e cinque volte più di cobalto nel 2030 per le batterie dei veicoli elettrici e lo stoccaggio di energia." Ogni anno l'Europa importa materie prime per un valore di 31 miliardi di euro e la transizione

energetica verso fonti rinnovabili, richiederà grandi quantità di terre rare, facendo aumentare la spesa annuale.

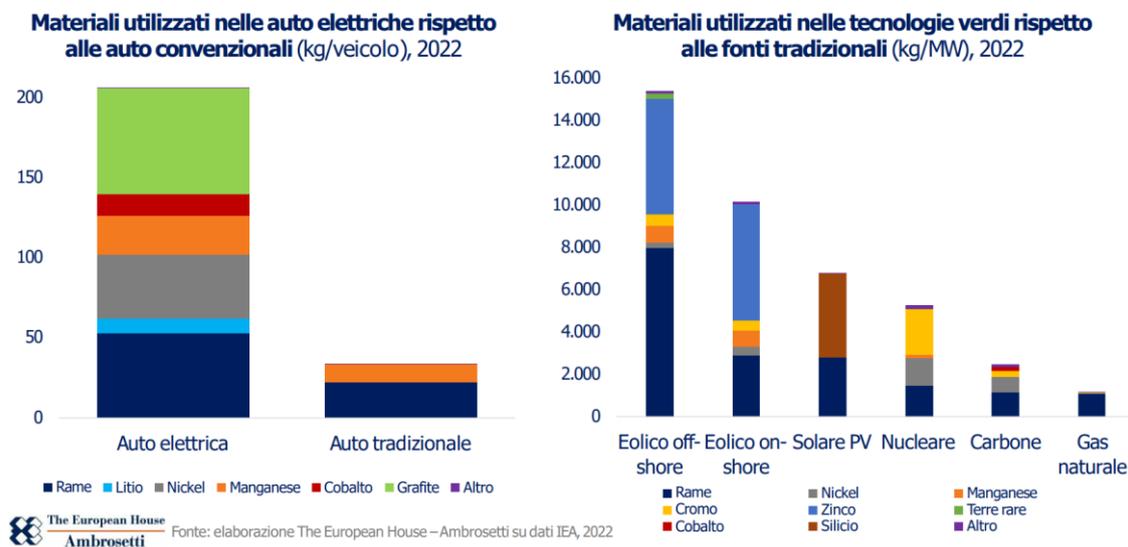


Grafico 1.1.2 - Utilizzo materie prime critiche

La dipendenza da Paesi terzi potrebbe porre dei problemi in termini di sicurezza dell'approvvigionamento. Secondo lo studio “Critical raw materials in EU external policies” dell’EPRS, ci sono due blocchi di paesi. Un primo gruppo è formato dai Paesi ricchi di materie prime critiche, e spesso sono Paesi in via di sviluppo. Un secondo gruppo è invece composto dai Paesi più sviluppati, che sono però poveri di giacimenti, e cercano di soddisfare la propria domanda crescente a prezzi vantaggiosi. Questa netta divisione ha portato numerose controversie nel commercio mondiale e la concorrenza è destinata ad essere sempre più competitiva.

L'Eurocamera propone quindi di diversificare le fonti di approvvigionamento, puntando principalmente sul recupero di questi materiali dai prodotti elettronici a fine vita, che vengono classificati con la denominazione RAEE (Rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche) o WEEE (Waste from Electrical and Electronic Equipment).

Considerando la grande quantità di Raw Materials presenti negli apparecchi elettronici, è di cruciale importanza riuscire ad aumentare gli sforzi per la raccolta e il recupero di questi particolari materiali.

Lo stesso parlamento ammette che il solo recupero dai RAEE non sarà abbastanza per soddisfare le richieste future. Per far fronte a questo problema, l'UE ha finanziato il progetto EURARE, iniziato nel 2013 e concluso nel 2017, che ha gettato le basi per un'industria estrattiva sostenibile in territorio europeo.

Il progetto ha avuto lo scopo di identificare i giacimenti presenti sul territorio e ricercare le più innovative e sostenibili tecniche di estrazione e trattamento. In una prima analisi, l'apertura di nuovi giacimenti potrebbe portare 700 mila posti di lavoro in più. Ma riuscirà l'Europa ad essere competitiva con paesi dove i regolamenti ambientali sono inesistenti e la mano d'opera ha un costo irrisorio? E si potrà davvero conciliare l'estrazione con l'ambiente?

Sono domande che continueranno a porsi nei dibattiti a Bruxelles, nel frattempo la strategia del recupero dei RAEE è la favorita con risultati che migliorano di anno in anno anche grazie ai target dettati dall'unione europea.

1.2 RAEE

Le apparecchiature elettroniche, come qualsiasi altro oggetto, hanno un ciclo di vita che giungerà inevitabilmente ad una fine. Nel momento in cui il proprietario di un dispositivo elettronico decide di sbarazzarsene in quanto guasto, inutilizzabile o obsoleto, il dispositivo diventa un rifiuto, e diventerà tale ogni suo singolo componente e materiale. Questa tipologia di rifiuti prende il nome di RAEE (Rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche) o WEEE (Waste of electric and electronic equipment) e devono essere gestiti con una particolare filiera di recupero dedicata.

I RAEE si distinguono in due tipologie principali: RAEE domestici e RAEE professionali.

I primi, sono tutti quei rifiuti elettronici originati all'interno dei nuclei domestici e di origine commerciale, industriale, istituzionale e altre tipologie analoghe che rispecchiano le caratteristiche dei rifiuti generati da nuclei domestici. Questi si dividono in 5 raggruppamenti, definiti all'Allegato I del regolamento 185 del 25 settembre 2007:

- R1 (freddo e clima), ovvero frigoriferi, congelatori e climatizzatori
- R2 (grandi bianchi), per esempio lavatrici, lavastoviglie, forni a microonde ecc.
- R3 (TV e monitor), come schermi LCD, tubo catodici ecc..

- R4 (elettronica di consumo), per esempio smartphone, stampanti, computer, frullatori ecc..
- R5 (sorgenti luminose), ovvero ogni tipo di lampade, tubi fluorescenti e led

I RAEE professionali, invece, sono tutti quei rifiuti elettronici diversi dai nuclei domestici e si differenziano anch'essi in cinque categorie:

- Categoria 1, apparecchiature per lo scambio di temperatura
- Categoria 2, schermi e monitor
- Categoria 4, apparecchiature di grandi dimensioni
- Categoria 3, apparecchiature di piccole dimensioni
- Categoria 6, piccole apparecchiature informatiche e strumentazioni per le telecomunicazioni.

Solo nel 2019 sono stati prodotti 53,6 milioni di tonnellate di rifiuti elettronici nel mondo, circa 7 kg per ogni abitante della terra. Una quantità che equivale a mille laptop buttati ogni singolo secondo (Vanessa Forti, 2020).

Nel momento della stesura di questo testo, 10 febbraio 2023, la popolazione mondiale ha prodotto 5.750.651 tonnellate di RAEE da inizio anno.

Il grafico 1.2.1 ci mostra l'andamento del mercato delle Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (AEE) in Europa e possiamo notare due aspetti importanti.

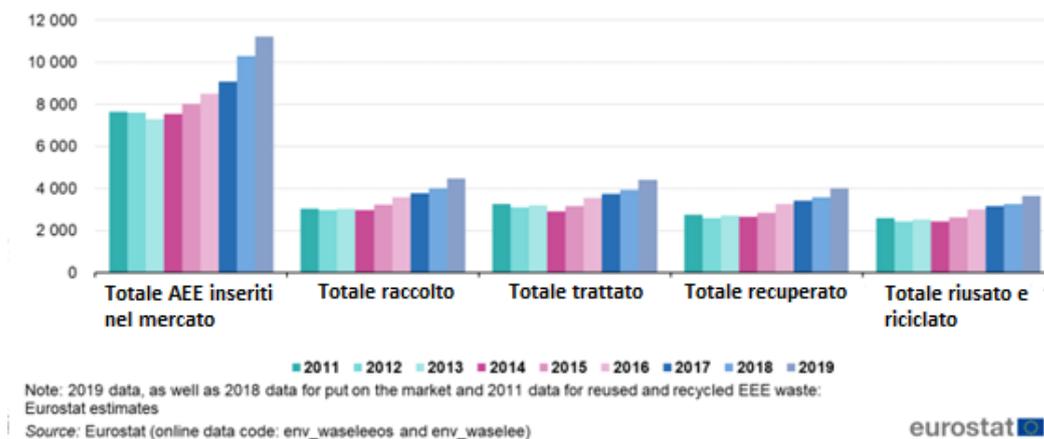


Grafico 1.2.1 - Analisi Gestione AEE in Europa dal 2011 al 2019

Il primo riguarda il trend nelle vendite degli AEE che è in costante aumento. Esso è un fattore indice dello sviluppo economico. Con l'urbanizzazione e l'industrializzazione, aumentano i redditi pro capite e aumentano di conseguenza anche i consumi, inclusi quelli di apparecchiature elettroniche, che produrranno RAEE.

Il secondo riguarda la raccolta, il trattamento e il recupero che aumentano insieme all'immissione di AEE ma con un tasso minore, segno che la maggior parte degli apparecchi sostituiti da nuovi non raggiungono la filiera dedicata e vengono o persi, o gestiti come altro rifiuto o destinati a mercati paralleli.

1.2.1 Gestione

In linea generale, possiamo formulare quattro scenari diversi di gestione dei RAEE a livello mondiale.

Scenario 1 – RAEE formalmente raccolti:

i rifiuti RAEE vengono raccolti e gestiti in base alla normativa di riferimento e vengono trattati presso impianti specifici per il recupero di materie prime seconde.

Scenario 2 – RAEE raccolti con la frazione indifferenziata:

non c'è un recupero di materiale che verrà perso in discarica con possibili impatti ambientali.

Scenario 3 – RAEE gestiti con sistema informale in paesi con sistema di gestione sviluppati:

RAEE vengono gestiti da aziende che si occupano di gestione e riciclaggio esportando il rifiuto all'estero.

Scenario 4 – RAEE gestiti con sistema informale in paesi in via di sviluppo:

scenario più impattante e pericoloso dove i RAEE vengono raccolti e smaltiti manualmente senza norme di sicurezza e dispositivi di protezione.

I RAEE sono la tipologia di rifiuto che più di tutte sta crescendo a livello mondiale e che comporta più problemi di gestione. Al loro interno si trovano componenti che presentano sostanze tossiche e non biodegradabili che devono subire un corretto trattamento, spesso con costi molto alti (Commissione Europea).

Di conseguenza si è creato un mercato parallelo di compravendita di RAEE tra paesi industrializzati e paesi in via di sviluppo, producendo delle vere e proprie tratte dello smaltimento illegale.

Secondo Legambiente tra Europa e Stati Uniti solo il 17% dei RAEE viene trattato in loco. È stato calcolato che in un paese africano possono arrivare anche 500.000 dispositivi elettronici da gestire in un mese (Ifesinachi Okafor-Yarwood, 2020).

1.2.2 Aspetti legislativi

L'Unione Europea attua una ferrea politica in difesa dell'ambiente con il fine di conseguire gli obiettivi per lo sviluppo sostenibile, basando i propri regolamenti sui principi di precauzione, prevenzione, correzione e del "chi inquina paga". Il quadro giuridico che regola la gestione dei rifiuti fa capo alla legislazione europea che ci permette di definire tutte le operazioni che ruotano attorno ai rifiuti iniziando con la prima classificazione,

passando alla raccolta, al trasporto, al recupero e infine allo smaltimento e riutilizzo.

L'obiettivo principale dell'UE è quello di ridurre la produzione di rifiuti e di aumentare il riciclo. Gli impegni degli ultimi anni sono orientati ad incoraggiare l'utilizzo di materie prime seconde derivati da prodotti di recupero, ampliare le strategie di prevenzione, e incitare un uso più consapevole delle risorse.

Si incoraggia inoltre il produttore a realizzare prodotti di facile smontaggio per facilitare il recupero delle componenti e eventuale sostituzione.

Con la direttiva 2012/19/UE, entrata in vigore il 13 agosto 2012, l'unione europea regola la gestione dei rifiuti RAEE, imponendo ai paesi membri l'incoraggiamento della cooperazione tra produttori e responsabili dello smaltimento RAEE, in modo da favorire la progettazione degli AEE che possono essere facilmente smontabili, recuperabili e smaltiti.

La riduzione dello smaltimento RAEE come rifiuto urbano misto è punto fondamentale insieme all'imposizione di un tasso annuale minimo di raccolta sempre più elevato. Questo permette di migliorare l'efficienza di raccolta e smaltimento dei singoli paesi.

Forza di quest'ultimo concetto è quello di consentire ai nuclei domestici e ai distributori di restituire i RAEE gratuitamente.

L'UE, a seguito dell'emanazione del decreto, pone continui target che i vari paesi membri devono raggiungere. Dal 2016 c'è l'obbligo di raccogliere 45 tonnellate di RAEE per ogni 100 tonnellate di AEE prodotti e, dal 2019, l'obiettivo è di raggiungere il 65% di raccolta. Questa percentuale è intesa come rapporto tra i RAEE dell'anno di riferimento e la media di AEE immessi sul mercato nel triennio precedente.

1.3 Contesto Italiano.

La direttiva Europea 2012/19/UE venne recepita in Italia con il D.lgs. del 14 marzo 2014 n.49 che andò a sostituirsi al Decreto Legislativo 151 del 25 novembre 2005.

All'interno troviamo indicazioni per la gestione dei RAEE lungo tutto la filiera, partendo dalla raccolta fino allo smaltimento.

Per prima cosa vengono definiti i criteri di categorizzazione dei RAEE (R1, R2, R3, R4 e R5). Con l'articolo 6 vengono fornite le priorità di gestione che puntano al riutilizzo delle componenti recuperabili e smaltimento delle componenti non recuperabili in base all'articolo 18.

L'articolo 8 indica gli obblighi del produttore di AEE, che deve conseguire obiettivi di recupero e riciclaggio.

Dall'articolo 15 all'articolo 18 vengono definiti i criteri di ritiro presso centri di raccolta e distributori, il trasporto e il trattamento.

Nello specifico, l'articolo 18 indica come i RAEE debbano essere raccolti separatamente, sottoposti ad un trattamento adeguato che includa almeno l'eliminazione di tutti i liquidi, e subire un trattamento selettivo effettuato in impianti conformi alle disposizioni vigenti in materia, nonché ai requisiti tecnici e alle modalità di gestione e di stoccaggio. A tal fine i produttori istituiscono sistemi per il trattamento adeguato dei RAEE, utilizzando le

migliori tecniche di trattamento, di recupero e di riciclaggio disponibili come dettato dalle linee guida del 2007 prodotte dal Ministero dell'Ambiente.

Negli allegati VII e VIII vengono infine definite le modalità di gestione dei RAEE negli impianti di trattamento e i requisiti di quest'ultimi.

Per *produttore* di AEE si intende la persona fisica o giuridica che fabbrica, rivende e immette AEE sul mercato nazionale. I Produttori adempiono alle disposizioni dettate dal Decreto tramite i sistemi individuali o collettivi operanti sul territorio nazionale.

I *distributori* rappresentano l'interfaccia tra il produttore e il cliente finale, sono obbligati a ritirare gratuitamente i RAEE domestici del cliente che intende disfarsene nel momento in cui viene consegnata un'apparecchiatura nuova, a patto che sia di tipo equivalente. Ha inoltre l'obbligo di dover informare della gratuità del ritiro. I distributori possono provvedere ad organizzare luoghi di raggruppamento tramite un soggetto terzo e/o organizzati da altri distributori, dove avverrà il ritiro da parte dei Sistemi Collettivi, secondo le modalità indicate nel DM 8 marzo 2010 n.65.

Il *luogo di raggruppamento* diverso dal punto vendita può essere un magazzino, un deposito, o un locale di proprietà privata o gestito da conto

terzi. Deve essere un luogo idoneo coperto e pavimentato, con il divieto di ingresso ad estranei.

Il *trasporto* può essere svolto direttamente dal distributore o da un trasportatore, i mezzi utilizzati devono essere registrati con il rispettivo limite di capacità e il documento di trasporto.

Fasi di gestione RAE

Raccolta RAEE:

- Consegna da parte del cliente direttamente al punto vendita del distributore.
- Ritiro dal cliente e rientro nel punto vendita del distributore con deposito proprio.
- Ritiro dal cliente e rientro nel luogo di raggruppamento diverso dai locali di vendita.
- Ritiro dai punti vendita e rientro presso luoghi di raggruppamento diversi dal punto vendita.

Trasporto RAEE:

- Trasporto dal luogo di raggruppamento al centro di raccolta.
- Trasporto dal cliente al centro comunale di raccolta.
- Trasporto direttamente dal cliente all'impianto o centro di raccolta.

1.3.1 La rete RAEE

In base D.lgs. del 14 marzo 2014 il sistema RAEE è costituito da tre elementi principali: centro di coordinamento, sistemi collettivi e impianti di trattamento.

Il **centro di coordinamento** (regolamentati dagli articoli 33 e 34) si occupano di ottimizzare la raccolta, il ritiro e la gestione dei RAEE. È l'organismo centrale del sistema RAEE sul territorio italiano.

È un consorzio con personalità giuridica privata composto da tutti i sistemi collettivi e sistemi individuali di gestione RAEE domestici e professionali sotto la supervisione del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e del Ministero dello Sviluppo Economico.

Predisporre un elenco di tutti gli impianti di trattamento RAEE e assicura il ritiro dei RAEE di nuclei domestici e di attività commerciali, industriali e istituzionali. Inoltre, si impegna per incrementare la raccolta nei territori comunali.

I sistemi individuali e collettivi che gestiscono RAEE domestici hanno l'obbligo di iscrizione, mentre i sistemi individuali e collettivi che gestiscono RAEE professionali non hanno l'obbligo di iscrizione.

I **sistemi collettivi** (regolamentati dall'articolo 10), sono consorzi senza fini di lucro costituiti dai produttori di AEE. Hanno il compito di garantire

il ritiro di RAEE dai centri comunali di raccolta di tutto il territorio nazionale. Devono aderire ai sistemi collettivi quei produttori che non adempiono ai propri obblighi mediante un sistema individuale.

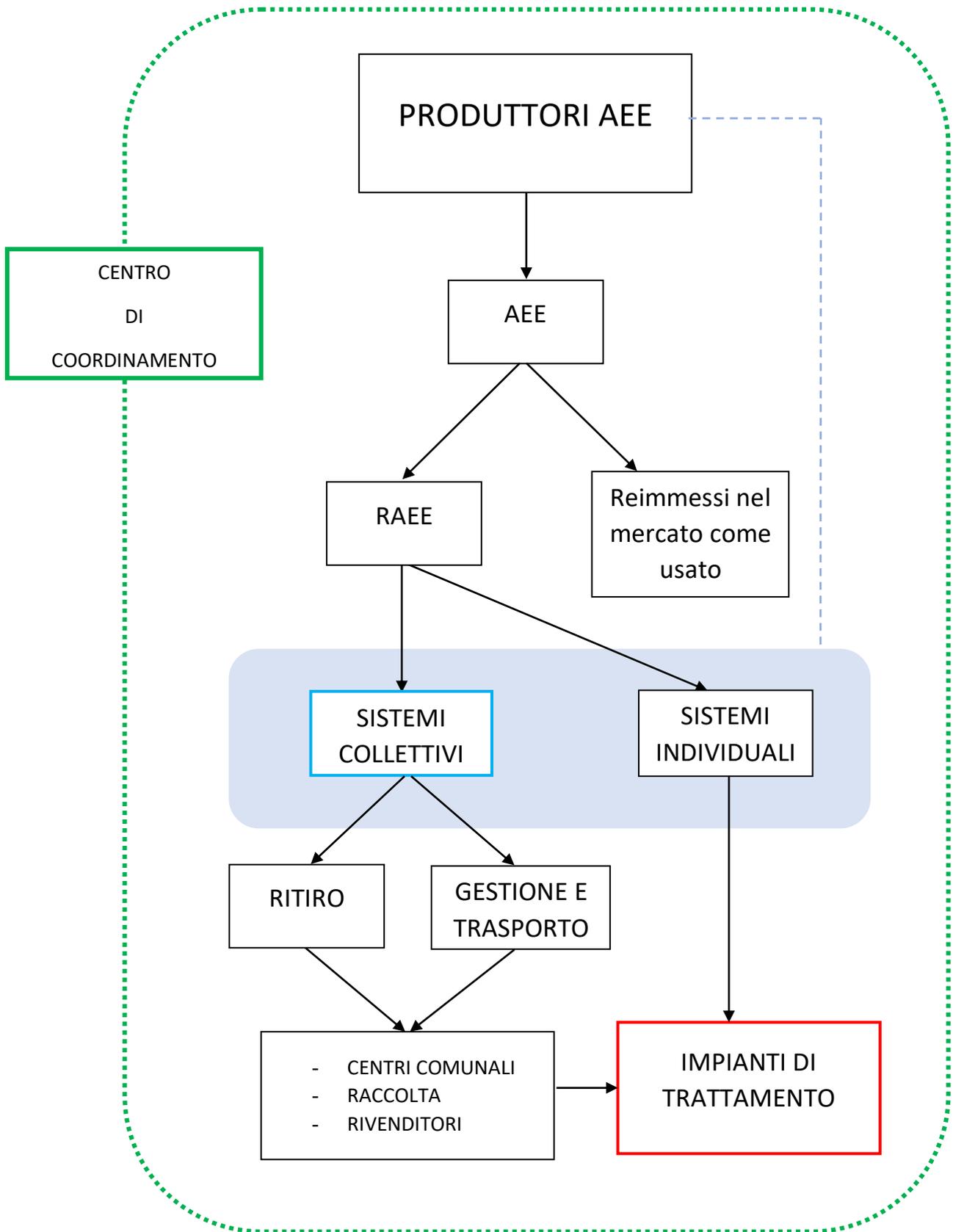
Tramite questi sistemi vengono finanziati le operazioni di raccolta, trattamento, recupero e smaltimento dei RAEE domestici.

Si occupano infine del trasporto dai centri di raccolta agli impianti di trattamento accreditati.

Gli **impianti di trattamento** infine, rappresentano il luogo dove giunge il materiale raccolto per essere smaltito con eventuale recupero dei materiali.

Per svolgere l'attività di recupero bisogna essere autorizzati ed iscritti, in forma gratuita, al registro del centro di coordinamento RAEE indipendentemente dal tipo di RAEE trattato. Gli impianti che vogliono trattare i RAEE accreditandosi al centro di coordinamento devono dimostrare di avere i requisiti previsti per il corretto trattamento dei RAEE.

Schema della rete di gestione RAEE



1.3.2 Analisi di raccolta.

Il decreto legislativo 49/2014, negli articoli 33 e 34, obbliga gli impianti di trattamento a iscriversi all'apposito registro messo a disposizione dal Centro di Coordinamento RAEE e di comunicare, entro il 30 aprile di ogni anno, i volumi di RAEE gestiti nell'anno precedente.

In base ai dati forniti dal Centro di Coordinamento RAEE, gli impianti che hanno dichiarato i volumi di rifiuti sono passati da 907 del 2016 a 1050 nel 2020, ma questi rappresentano solo il 76% dei soggetti iscritti al registro. Ne deriva che più di 300 aziende non hanno effettuato la dichiarazione annuale. Le ragioni potrebbero essere molteplici: potrebbero aver cambiato la propria attività o ragione sociale, o semplicemente hanno cessato l'attività senza aver aggiornato la propria posizione nel registro.

La maggior parte degli impianti si trova in Nord Italia (circa 739) mentre nel sono molto meno quelli al Centro (144) e al sud (175). Dati collegabili ai livelli di volumi raccolti, segno che dove c'è più produzione di rifiuti, esistono anche più impianti.

Tuttavia, c'è da sottolineare che non sempre la dichiarazione di raccolta di un area rappresenta la reale produzione di rifiuti. I flussi di RAEE, infatti, possono registrare spostamenti tra province e regioni dovuto al numero

degli impianti e ai limiti della capacità di trattamento degli stessi oppure da scelte economico-commerciale.

Come ci mostra il grafico 1.3.1, il 2021 è l'ultimo di una serie di anni positivi per la raccolta italiana, registrando 510.367 tonnellate di RAEE raccolti, il 6.59% in più rispetto al 2020. Di questi, l'aumento maggiore l'ha registrato la categoria R3 (TV e monitor), complice anche il bonus TV erogato dallo Stato, mentre il raggruppamento che segna una riduzione è l'R4 (Elettronica di consumo) a causa della raccolta ancora limitata e dispersiva.

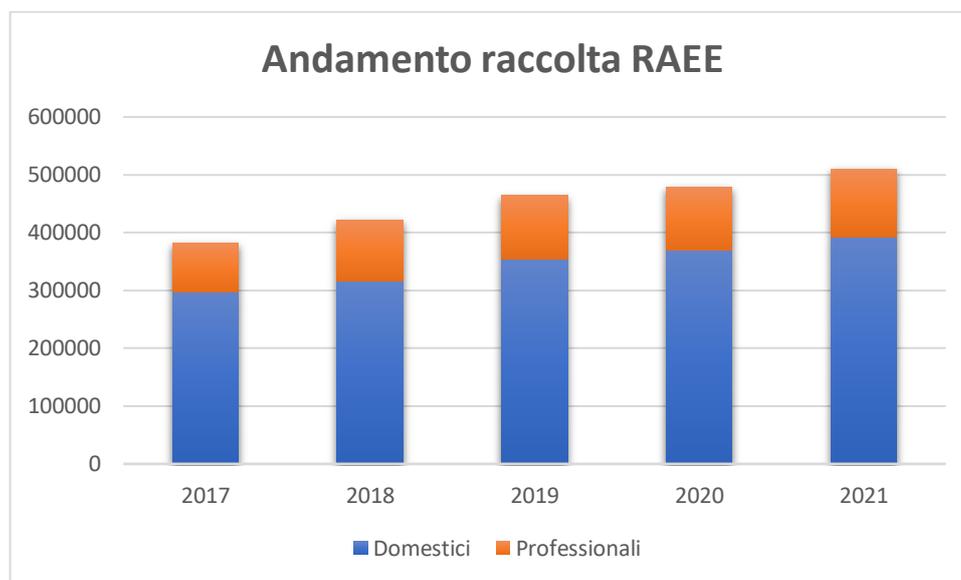


Grafico 1.3.1 Raccolta RAEE nazionale 2017-2021

Per il 76,88% si tratta di RAEE proveniente da nuclei domestici, mentre il restante, pari al 23,12%, ha origine professionale.

L'andamento è correlato anche con l'immissione di AEE nel mercato che ha visto un aumento continuo, tranne che nel 2019, a causa della pandemia, dove c'è stata una riduzione (grafico 1.3.2).

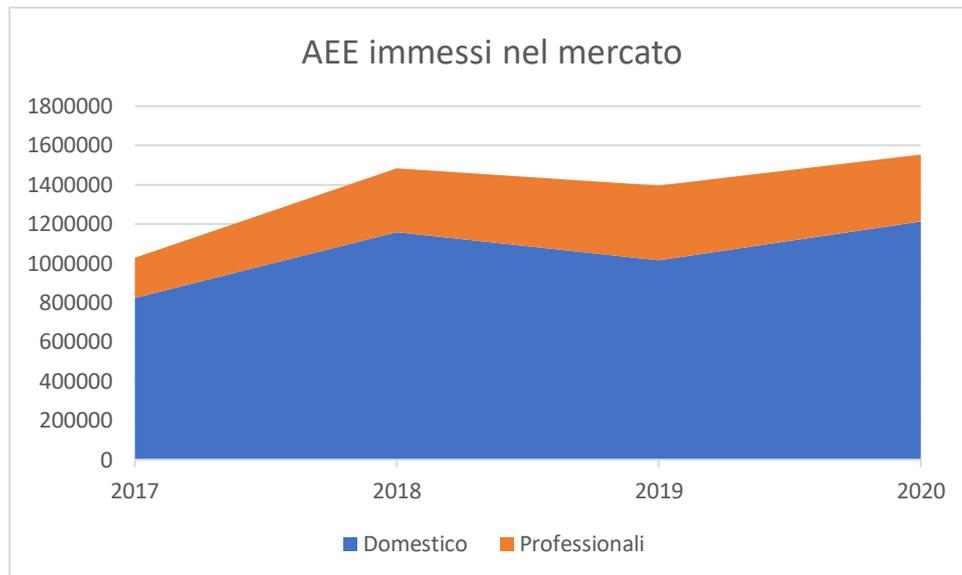


Grafico 1.3.2 AEE immessi nel mercato in Italia. 2017-2020

Nonostante i numeri siano aumentati nel tempo, la percentuale di raccolta, che viene calcolata sul tasso annuo di recupero rispetto al consumo del triennio precedente, rimane lontana dal target dettato dall'unione europea. Questo infatti impone un 65% di raccolta, quasi 30 punti in più rispetto alla media Italiana.

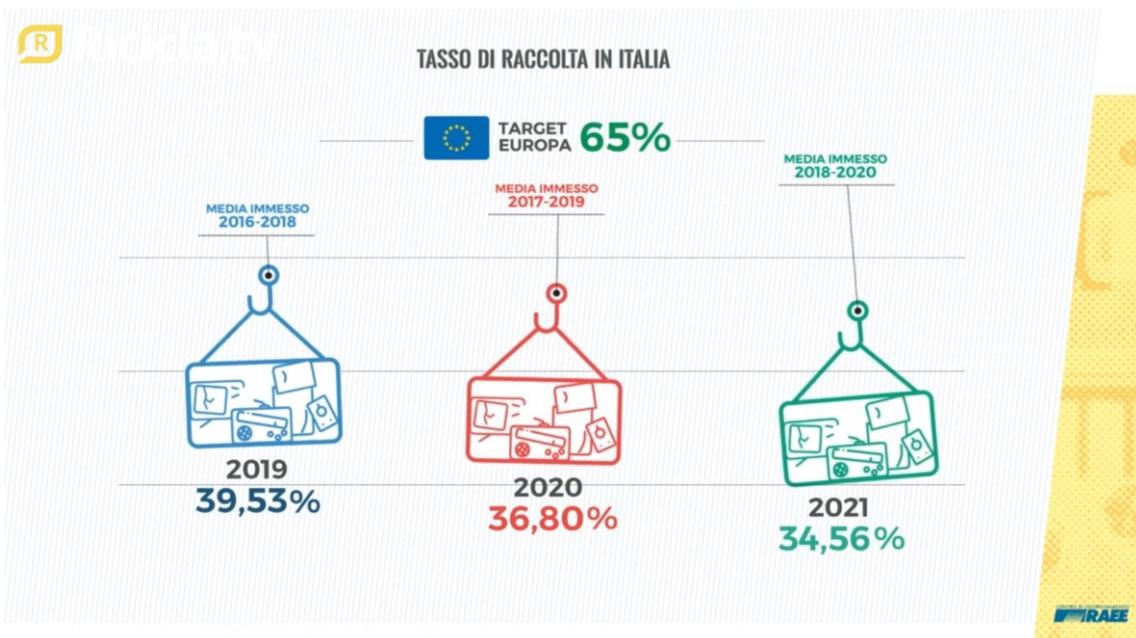


Figura 1.3.1 Tasso di raccolta in Italia dal 2019 al 2021, Cdc RAEE

Come ci suggerisce l'infografica, il tasso di raccolta RAEE in Italia è diminuito dal 2019 al 2021. Questo andamento è stato causato da diversi fattori, e tra questi c'è sicuramente un sistema non ancora adatto a intercettare tutti i RAEE generati rispetto alla mole di AEE che vengono immessi nel mercato, in aumento ogni anno.

Come riferito dal direttore generale del Centro di Coordinamento Fabrizio Longoni, molti RAEE non arrivano a destinazione per il semplice fatto che non vengono classificati come tali. Adoperando una classificazione superficiale (semplice rifiuto metallico) vengono gestiti da enti che si occupano di recuperare solo i metalli presenti, perdendo tutto il resto.

Un'altra possibile causa del basso tasso di raccolta italiano è che gli ambienti domestici sono spesso luoghi dove si accumula RAEE,

abbandonati in cantine o soffitte. Bisognerebbe spronare la cittadinanza a portare presso i centri di raccolta le apparecchiature obsolete, così da poter recuperare i materiali di cui sono composte.

Accanto a questi problemi, c'è anche il mercato parallelo dei RAEE con smaltimento illegale approssimativo e pericoloso atto solo al recupero di ferro e metalli che si attesta a circa **70% del totale** (Lorenzo Tavazzi, 2022).

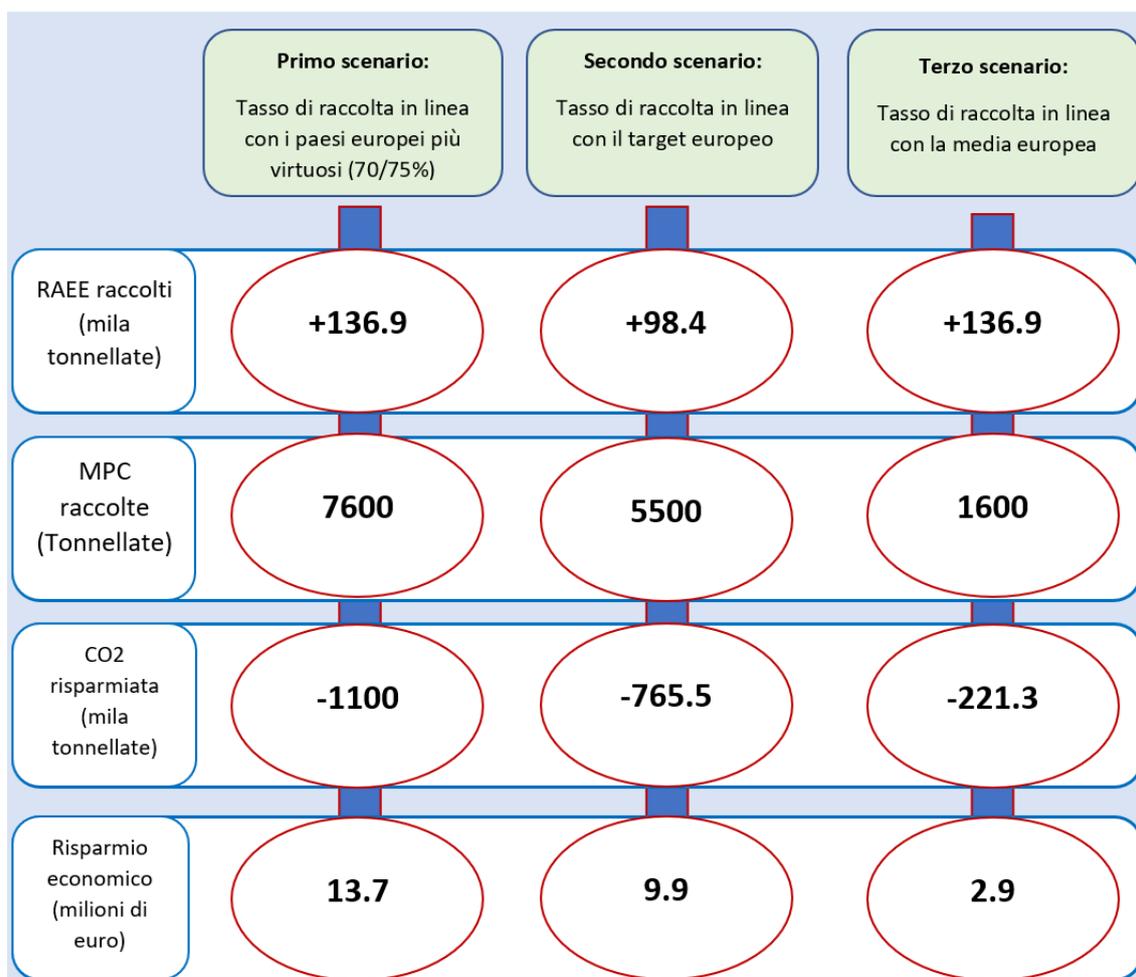
In questi casi, quello che rimane, ovvero la parte più complicata da estrarre che contiene elementi pericolosi per la salute umana e l'ambiente, ma anche con il più alto valore di recupero, viene buttato in discarica o spedito altrove.

L'agenzia di consulenza "The European House – Ambrosetti" ha elaborato tre possibili scenari per quantificare i benefici derivanti da un miglioramento del tasso di raccolta rifiuti RAEE.

Gli scenari, come mostrato nello schema 1.3.1 fanno riferimento a differenti tassi di raccolta a cui l'Italia potrebbe arrivare.

Il primo scenario prevede un tasso di raccolta uguale a quello dei paesi europei più virtuosi (ed è anche il più alto dei 3), con circa il 70-75% di raccolta.

Il secondo scenario uguaglia il tasso di raccolta dettato dall'unione europea, da cui l'Italia è distante circa di 31 punti. Infine, nell'ultimo scenario, si prende come riferimento il tasso medio dell'Unione Europea, circa il 46%.



Schema 1.3.1 Scenari di sviluppo della raccolta RAEE

I benefici analizzati nei diversi scenari riguardano la sfera ambientale, calcolando la quantità di CO2 risparmiata grazie al riciclo dei RAEE, e il risparmio economico, che deriva dalla mancata importazione delle materie prime critiche.

Capitolo secondo – Scopo del lavoro

In base ai dati analizzati e alle informazioni date nei precedenti capitoli si intuisce come le nostre città sono diventate delle vere e proprie miniere e la nostra capacità di poter estrarre materiali riutilizzabili possa dare un vantaggio per l'approvvigionamento nazionale, seguendo i principi dell'economia circolare.

Un esempio su tutti è l'oro, uno dei materiali più ricercati che diede il via alla storica corsa all'oro del diciannovesimo secolo: ne possiamo trovare in maggior quantità in una Tonnellata di schede elettroniche (0,24 Kg/ton) rispetto a una tonnellata di minerale aurifero (e 0,010 Kg/ton).

Oltre all'oro troviamo altri materiali recuperabili da una scheda elettronica, e sommandoli si arriva ad un valore di mercato di circa 10mila euro per ogni tonnellata di schede elettroniche recuperate (ENEA).

I RAEE però non sono composti solo da schede elettroniche. Sono costituiti soprattutto da altre componenti, in primis dalle strutture esterne che contengono tutta la parte elettronica, che nella maggior parte dei casi è fatta in alluminio o in plastica. Poi troviamo il resto dell'elettronica costituita da processori, schermi, componenti meccanici, tubi ecc.

Ad esempio, nella figura 2.1 possiamo osservare quanti materiali sono presenti all'interno di un semplice smartphone.

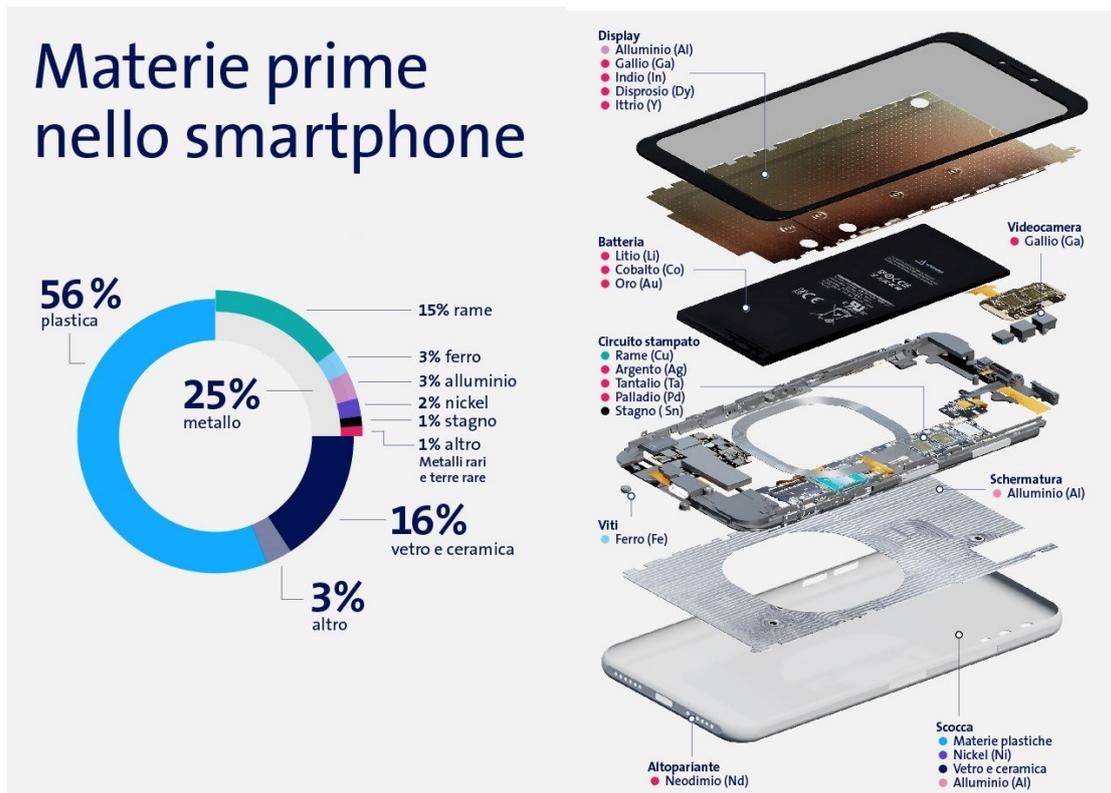


Figura 2.1 Componenti di uno smartphone

Con questo lavoro si cercherà di individuare la soluzione migliore per il recupero di più componenti possibili dai RAEE, senza tralasciare quelle di difficile estrazione e maggior valore, al fine di analizzare un ipotetico impianto per la raccolta e lo smaltimento RAEE nella mia città di origine, Chieti.

Capitolo terzo - Materiali e metodi

La gestione dei rifiuti, regolamentata a livello europeo, permette il recupero di materiali e di conseguenza ci fornisce un risparmio energetico derivante dalla mancata produzione di materie vergini.

Per questo motivo, parallelamente all'utilizzo della raccolta differenziata, si stanno sviluppando tecnologie impiantistiche sempre più efficienti per il raggiungimento di tale scopo.

3.1 Caratteristiche di un impianto di gestione RAEE

Il processo di smaltimento dei RAEE permette il recupero di diversi materiali quali, ad esempio: plastica, metalli ferrosi, metalli non ferrosi, terre rare ed elementi preziosi.

Le attività svolte negli impianti possono essere raggruppate in diverse fasi, alcune di queste azioni sono comuni a tutte le categorie RAEE, mentre altre si distinguono in base alla tipologia del rifiuto elettronico.

Di seguito si andrà ad evidenziare gli elementi comuni a tutte le apparecchiature RAEE per ogni fase, come indicato dalle linee guida redatte dal ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare in collaborazione con il ministero dello sviluppo economico e della salute

(Linee guida per l'individuazione e l'utilizzazione delle migliori tecniche, 2007).

Raccolta, conferimento e messa in riserva

La raccolta inizia presso i centri predisposti dove il privato cittadino o ente può conferire gli oggetti elettrici ed elettronici guasti o inutilizzati.

Dai punti di raccolta i RAEE vengono trasportati verso i centri di smaltimento e recupero con automezzi. Giunti all'impianto i rifiuti elettronici vengono scaricati su pavimento a raso, subiscono una prima divisione per categoria (R1, R2, R3, R4 e R5) e vengono messi in riserva in attesa del trattamento.

Pretrattamento e messa in sicurezza

Consiste in quelle azioni atte alla messa in sicurezza delle apparecchiature, eliminando le parti che possono costituire un pericolo durante il trattamento. Tra queste troviamo eventuali parti mobili (sportelli, cablaggi, guarnizioni..) e materiali o sostanze classificati come pericolose (CFC, tubi catodici, schede elettriche..).

Smontaggio e recupero componenti

Fase di smontaggio richiede un approccio manuale per garantire l'identificazione e il recupero di tutte quelle componenti riutilizzabili dal

punto di vista tecnico-economico. L'utilizzo di sistemi automatizzati può avvenire entro certi limiti.

Le parti recuperate verranno poi ricondizionate da ditte specializzate che applicheranno una marcatura ben visibile che ne garantisca garanzia e tracciabilità.

Frantumazione e selezione materiali

In questa fase avviene la frantumazione e la selezione dei materiali da avviare al recupero (metalli ferrosi e non, plastiche...). Qui troviamo l'utilizzo di soluzioni automatizzate e un grande dispiego energetico.

Tutte le fasi di demolizione devono avvenire in locali predisposti a garantire la sicurezza, con contenimento statico e il mantenimento di opportune depressioni. Fondamentale è la presenza di un sistema di aspirazione di gas e polveri.

Recupero materiali ed energia

I materiali recuperati vengono reintrodotti nei cicli produttivi.

Smaltimento

Rifiuti prodotti dalle attività di bonifica e trattamento sono avviati a smaltimento nel rispetto della normativa vigente.

3.1.1 Impatti

Le linee guida del ministero ci offrono soluzioni anche per limitare gli impatti che questi processi possono generare:

- Emissioni di gas nocivi in lavorazione
- Produzione di rifiuti pericolosi
- Generazione di rumore da parte dell'impianto

La gestione di eventuali rifiuti prodotti deve seguire gli stessi standard e regolamenti della gestione dei RAEE ricevuti presso lo stabilimento.

Perciò bisogna stocarli in luoghi al chiuso con pavimentazione in calcestruzzo impermeabilizzato, devono essere presenti sistemi di aspirazione e sistemi di raccolta di eventuali percolati o liquidi.

Nel caso in cui ci sia la necessità di effettuare movimentazioni all'interno dello stabile per mano di un operatore su pala meccanica ragno o gru ponte, la cabina di manovra dovrà essere chiusa, climatizzata e deve possedere un sistema di filtrazione adeguato.

Gli impianti meccanici devono essere realizzati in maniera tale da ridurre al minimo la presenza di operatori all'interno delle aree di trattamento, e a tal fine devono essere previsti sistemi di controllo da remoto quali telecamere, sensori di rotazione, pesatura automatica, segnali di allarme e controlli remoti di regolazione velocità e riempimento.

Tutte le macchine devono essere dotate di sistemi per ridurre la rumorosità come da regolamentazione. I livelli sonori medi sulle 8 ore non deve superare gli 80db misurate alla quota di 1,6m dal suolo e a distanza di 1m da ogni macchinario.

Le apparecchiature che superano i limiti devono essere insonorizzate. I livelli di rumorosità esterni all'impianto devono rispettare i limiti della zonizzazione comunale, solitamente inferiori a 60db.

3.1.2 Metodi di smaltimento classici

Analizziamo ora nel dettaglio alcune metodologie utilizzate per particolari rifiuti RAEE.

R1 – Clima

Nei congelatori e frigoriferi domestici bisogna porre molta attenzione sui CFC.

I CFC sono tra i maggiori responsabili della riduzione dello strato di ozono e del riscaldamento globale (Molina e Rowland, 1974). Questi gas sono stati ampiamente utilizzati a livello industriale fino agli inizi degli anni 90,

momento in cui si è deciso di procedere ad una loro graduale eliminazione alla luce degli effetti ambientali che causano (M. Sansotera, 2012).

Ad oggi all'interno dei RAEE di categoria R1 realizzati dopo il 1994, anno in cui è entrata in vigore la normativa di regolamentazione CFC, troviamo gas HCFC quali l'R134A al posto del CFC (CDC RAEE).

Considerando però che questa tipologia di oggetti è spesso di lunga durata, negli stabilimenti di smaltimento possiamo ancora trovare R1 con all'interno CFC.

Per queste ragioni, il processo di smontaggio e smaltimento di questa tipologia di RAEE deve essere fatta con estrema attenzione. Sempre seguendo le Linee guida ministeriali del 2007, si parte dalla messa in sicurezza delle apparecchiature R1 andando a intercettare e recuperare i gas e gli olii di refrigeramento che devono essere stoccati in una zona sicura, in recipienti mobili idoneamente chiusi, con dispositivi adatti alla movimentazione e riempimento in sicurezza.

I gas e gli olii recuperati verranno inviati a ditte specializzate per lo smaltimento.

Dopo la messa in sicurezza si procede con lo smontaggio e divisione dei materiali quali:

- separazione cavi, parti PVC, ecc.
- separazione parti elettriche
- separazione compressori
- separazione serpentine di scambio termico
- cernita e collaudo dei componenti recuperabili (compressore, elettroventilatori, serpentine di condensazione ed evaporazione)
- separazione guarnizioni

R 2 – Grandi bianchi

Le operazioni di messa in sicurezza di questa categoria corrispondono alla separazione delle parti mobili ed eventuali condensatori in PCB che devono essere stoccate in modo idoneo. I composti PCB andranno in contenitori protetti dai raggi solari ed in grado di garantire la corretta conservazione dei rifiuti.

Al fine del reimpiego di componenti e materiali, sarà necessario separare cavi e parti in PVC, motori, pompe e cestello con successivo collaudo per il recupero di componenti funzionanti.

Alla fine del processo di recupero, previa frantumazione della carcassa e separazione materiali, otterremo metalli ferrosi, metalli non ferrosi, plastiche e il contrappeso in cemento utilizzato nelle lavatrici e asciugatrici.

R3 TV e monitor

I televisori subiscono una prima separazione manuale di plastica, cavi, metalli ed eventuale tubo catodico. Quest'ultimo è composto da due vetri, quello frontale costituisce lo schermo vero e proprio, realizzato con vetro al bario; il resto è composto da vetro al piombo. Una volta separate tramite una macchina, l'operatore divide le due parti, lo schermo al piombo verrà disintegrato nell'apposito cassone, quello frontale invece, essendo più delicato perché ricoperta da fosfori, polveri simili a quelle presenti nei neon, lo si può smaltire con il vetro previa aspirazione delle polveri. Per la salute degli operatori è fondamentale che le concentrazioni di metalli pesanti residui in atmosfera non superino i 10ppm.

Dal disassemblaggio dei monitor otterremo invece il sistema di retroilluminazione che subirà lo stesso trattamento delle lampade al neon, il

plexiglas che contiene il modulo LCD, la cornice in plastica e i circuiti elettronici.

R4 – elettronica di consumo

Rimozione di alcuni elementi pericolosi (come ad esempio le batterie) e triturazione grossolana meccanica per dividere il telaio dai vari componenti per permettere una prima separazione di plastica, cavi, circuiti ecc..

Avviene poi una seconda triturazione più fine con una seconda divisione e infine una terza triturazione, finale, molto fine che permette di ottenere due frazioni principali: plastica e metalli.

R5 - Lampade a neon

Il problema di queste lampade è la polvere al loro interno pericolosa per l'uomo a causa della presenza di mercurio. Per preservare la salute degli operatori, le lampade subiscono una prima triturazione all'interno di un ambiente chiuso con sistema di aspirazione continuo che recupera le polveri, queste verranno poi raccolte in sacchi per il trattamento. Il resto del materiale subisce un'ulteriore frantumazione più fine con conseguente divisione del vetro, metallo e plastica.

3.2 Metodologia LCA

Il Life Cycle Assessment (LCA) è un metodo oggettivo di valutazione dei carichi energetici ed ambientali associati ad un processo o un'attività produttiva lungo l'intero ciclo di vita, includendo quindi l'estrazione delle materie prime, la fabbricazione, l'utilizzo, il trasporto e lo smaltimento finale.

Le prime applicazioni ci furono alla fine degli anni sessanta, da parte di alcune industrie che iniziarono ad interessarsi ai temi di risparmio delle risorse e gestione rifiuti, ma la metodologia nasce ufficialmente negli anni 90, in Canada durante il congresso SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry) di Vermont. Oggi questa tecnica è sempre più utilizzata per effettuare analisi ambientali, in quanto è uno strumento ottimale per la quantificazione degli aspetti ecologici per uno sviluppo sostenibile.

La possibilità di studiare tutte le fasi di un processo come correlate e dipendenti, permette di individuare in quali risiedono le criticità e dove poter andare ad effettuare interventi migliorativi.

Al fine di standardizzare le procedure di analisi a livello internazionale, si fa riferimento a due norme ISO:

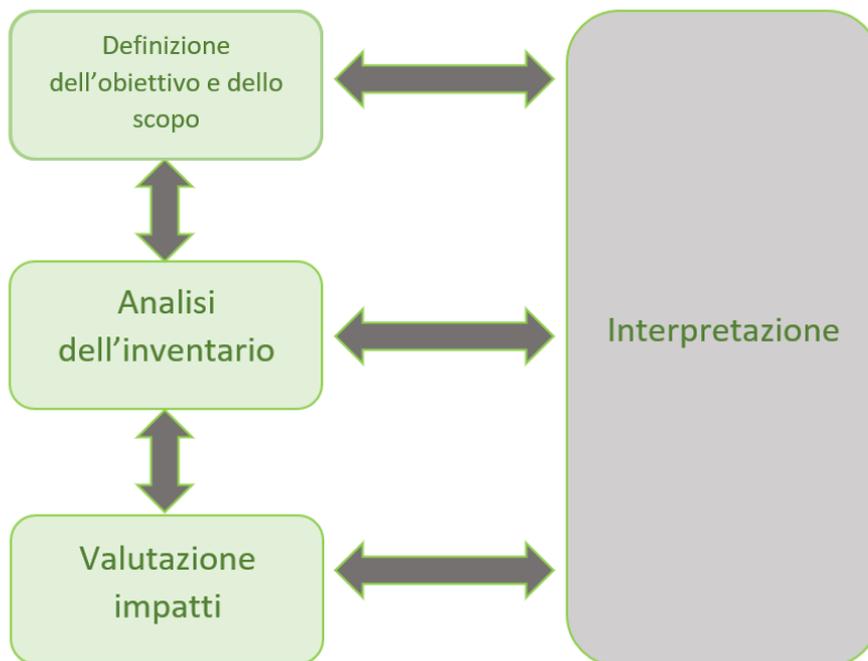
- UNI EN ISO 14040, che definisce i principi e la struttura di un LCA

- UNI EN ISO 14044, che fornisce supporto all'applicazione pratica di uno studio LCA

In base alla norma ISO 14040, l'utilizzo di un LCA deve articolarsi in quattro fasi:

- 1- Definizione dell'obiettivo e dello scopo
- 2- Analisi dell'inventario
- 3- Valutazione impatti
- 4- Analisi dei risultati

STRUTTURA DI UN LCA



Schema 3.2.1 Schematizzazione del funzionamento di una LCA

3.2.1 Definizione dell'obiettivo e dello scopo

La prima fase è di tipo preliminare. Verte sul definire l'obiettivo, ovvero la tipologia di studio che si va a realizzare, le motivazioni e i soggetti a cui sarà rivolto.

Dovrà essere specificato se lo studio è di tipo comparativo tra due prodotti o processi o tra prodotti o processi e uno standard di riferimento, oppure se sarà l'analisi completa di un prodotto o processo al fine di individuare i punti deboli su cui agire.

Lo scopo include la descrizione dei fattori da considerare in funzione dell'obiettivo che ci siamo posti, permettendo di identificare il campo di applicazione del nostro studio.

Come primo passo, andremo ad identificare l'unità funzionale, ovvero il prodotto, servizio o funzione su cui impostare l'analisi e che ci permetterà di avere dati in uscita e in ingresso normalizzati al fine di garantire comparabilità dei risultati con altre LCA.

Secondo fattore importate per definire lo scopo dell'analisi è la determinazione dei confini del sistema. Ovvero, tutte quelle unità di processo considerate nell'analisi e i rispettivi flussi di input e output.

Tutti i dati raccolti relativi al sistema definito dovranno rispondere ai criteri di: completezza, precisione, rappresentatività, coerenza e riproducibilità.

In linea generica esistono vari approcci per scegliere i confini del sistema:

- “from cradle to grave”: include tutte le fasi del processo dall’approvvigionamento delle materie prime allo smaltimento del rifiuto
- “from cradle to gate”: il confine parte sempre dall’approvvigionamento delle materie prime ma si ferma alla produzione, escludendo l’utilizzo e lo smaltimento.
- “from gate to gate”: include solo le fasi di produzione
- “from cradle to cradle”: l’analisi fa riferimento a un processo dove lo scarto viene riciclato come nuova materia prima o energia, evitando l’effettiva produzione di un rifiuto.

Per dare una semplificazione allo studio, per rappresentare il sistema si utilizzano diagrammi di flusso che mostrano le singole unità di processo e le loro relazioni (flussi). I confini del sistema vengono delimitati da un riquadro che include solo le unità considerate.

Un altro aspetto fondamentale da tenere in considerazione sono le eventuali procedure di allocazione.

L’allocazione è un processo che permette di dividere il flusso di ingresso di un processo in diversi prodotti in uscita. L’LCA dovrebbe seguire ogni

singolo prodotto attribuendo le rispettive aliquote di risorse impiegate e inquinanti emessi evitando sovrapposizioni.

La norma ISO 14044 fornisce 3 possibilità per gestire l'allocazione:

- 1) Dove possibile, evitare l'allocazione andando a suddividere l'unità di processo in due o più sub-processi oppure espandendo i confini del sistema per includere i processi che generano più prodotti.
- 2) Allocare i flussi d'ingresso e di uscita in base alle proprietà fisiche.
- 3) Allocare i flussi d'ingresso e di uscita in base al valore economico.

3.2.2 Analisi dell'inventario

La seconda fase è la più impegnativa e riguarda la raccolta dei dati ingresso (input) e in uscita (output) del sistema di interesse ottenendo una descrizione quantitativa di tutti i flussi di materiale ed energia.

I dati possono essere suddivisi in tre tipologie:

- Dati primari, che vengono raccolti direttamente dal produttore o gestore del servizio.
- Dati secondari, messi a disposizione da banche dati.
- Dati terziari, reperiti dalla letteratura scientifica.

Il risultato di questa fase è una tabella che mostra tutte le emissioni e le risorse utilizzate dall'unità funzionale, comprese anche sostanze e prodotti chimici utilizzati.

Bisogna evidenziare che i risultati energetici includono:

- Energia diretta consumata dal processo.
- Energia indiretta per produrre e trasportare l'energia e i materiali utilizzati.
- Feedstock, è la quota di energia contenuta nei materiali che potenzialmente sono combustibili.

Mentre le emissioni in acqua, aria e suolo includono:

- Emissioni dirette, derivate dal processo in esame.
- Emissioni indirette, dovute a tutte quelle azioni che avvengono all'infuori del processo in esame ma legati ad esso.

L'inventario è costituito da 5 parti principali:

- 1- Confine del sistema
- 2- Diagramma di flusso
- 3- Raccolta dati
- 4- Problemi di allocazione degli impatti
- 5- Elaborazione dati

Confini del sistema

In questa prima parte si vanno a definire i confini del sistema, individuando le azioni e i flussi di materiali ed energia di INPUT e OUTPUT.

Diagramma di flusso

Il diagramma ci permetterà di rappresentare le componenti del sistema che sarà composto da processi (riquadri) e da flussi di materiali (freccie).

La schematizzazione ha lo scopo di individuare i processi e le interazioni con l'ambiente del sistema considerato. Può essere diviso in sette sequenze:

1- Produzione principale

- a. Ovvero il processo di produzione del prodotto o il prioritario dell'impianto dove avvengono i maggiori flussi.

2- Produzione secondaria

- a. Processo di realizzazione di un eventuale sottoprodotto.

3- Produzione dei materiali ausiliari

- a. Processi che ci saranno prima, durante e dopo la realizzazione del prodotto. Considera la produzione delle componenti, il riciclaggio e riuso del prodotto con eventuale gestione rifiuti.

4- Produzione di energia

- a. Recupero energetico.

5- Consumo di energia

- a. Considera tutti i vari consumi energetici dei processi.

6- Trasporti

- a. Considera tutti i trasporti necessari per il prodotto, sottolineando la quantità di prodotto trasportato per chilometro.

7- Trattamento dei rifiuti

- a. Trattamenti applicati agli scarti della lavorazione.

Raccolta dati

I dati che verranno raccolti faranno parte di due principali categorie; quelli relativi ai flussi d'ingresso (INPUT) e quelli riferiti ai flussi d'uscita (OUTPUT).

I dati di INPUT fanno riferimento a materiali, trasporti ed energia, mentre i dati di OUTPUT ai produttori, gas rilasciati in atmosfera e inquinanti sversati in acqua e suolo.

Allocazione degli impatti

All'interno dei processi industriali avviene che più prodotti intermedi o di scarto vengano riciclati e utilizzate come materie prime.

Nello studio LCA i processi devono essere identificati e trattati con procedure specifiche e la somma dei flussi in ingresso deve essere uguale ai flussi in uscita per ogni unità di processo, andando ad utilizzare un prodotto intermedio avremo due somme finali differenti.

Per risolvere il problema di si potrebbe eliminare l'allocazione tramite divisione dell'unità di processo per generare due sottoprocessi o espandere il sistema includendo funzioni aggiuntive ai co-prodotti.

In caso l'allocazione è impossibile da eliminare, bisogna impiegare funzioni fisiche chiare ben definite. Se le relazioni fisiche non sono chiare, si possono usare altre relazioni, come il valore economico dei sottoprodotti.

Elaborazione dei dati

In questa fase vengono elaborati i dati raccolti relativi al processo e trasformati in una tabella d'impatto ambientali. Per tale fine abbiamo bisogno di due tipologie di dati:

- Dati relativi a ogni processo per la realizzazione di n prodotto o attività.
- Dati riguardanti l'impatto ambientale prodotto dal processo.

Per l'elaborazione vengono utilizzati software dedicati con particolari caratteristiche:

- forniscono processi già incorporati con possibilità di inserirne dei nuovi.
- Database relativi ad ogni categoria.
- I risultati vengono presentati in tabelle di inventario dove troviamo tutti i dati in INPUT e OUTPUT.

Il software più comune e utilizzato per questo studio è GaBi, sviluppato dall'agenzia di consulenza PE INTERNATIONAL e dal dipartimento di ingegneria IKP dell'università di Stoccarda e permette di realizzare piani, processi e flussi in base agli standard ISO 14040.

3.2.3 Valutazione degli impatti

La terza fase LCA consiste nella valutazione degli impatti che il processo o attività all'interno dei confini del sistema possono generare nei confronti dell'ambiente e dell'uomo.

Il processo di analisi si articola in quattro fasi:

- Classificazione degli impatti
- Caratterizzazione

- Normalizzazione
- Pesatura

Classificazione degli impatti

Comprende la scelta di categorie ambientali in cui raggruppare i potenziali impatti e bisogna indicare:

- Categorie di impatto, in base alla norma ISO 14040 che indica una classe che rappresenta una questione ambientale (es. eutrofizzazione delle acque, cambiamenti climatici, smog fotochimico...).
- Indicatori di categoria, ovvero la quantificazione di una categoria di impatto, come indicato sempre in base alla norma ISO 14040 (es. Kg CO₂).

La caratterizzazione

In questa fase vengono quantificati gli impatti tramite delle formule standardizzate per ogni categoria di impatto.

Si fa riferimento a una determinata sostanza specifica per una categoria e la si moltiplica per i dati riportati nell'inventario ottenendo un fattore di caratterizzazione. Ad esempio, la CO₂ che è rappresentativa per la categoria

“cambiamento climatico” verrà utilizzata per confrontare tutti gli altri gas serra, ottenendo come risultato finale Kg di CO₂ equivalente per ogni fattore considerato.

Il risultato della caratterizzazione è il profilo ambientale, ovvero una serie di punteggi di impatto ambientale ottenuti sommando tutti i singoli contributi calcolati in precedenza per ogni categoria.

La normalizzazione e pesatura

In questa fase si va a paragonare i risultati ottenuti con dei valori di riferimento che si avrebbero con un sistema analogo. Solitamente sono dati medi su scala regionale, europea o mondiali riferiti ad un determinato arco temporale, che ci permettono di comprendere meglio i risultati di categorizzazione ottenuti.

La fase finale della valutazione degli impatti consiste nell'attribuire un peso ai diversi impatti che verranno poi sommati in modo da ottenere un valore globale. Questo valore ci fornirà un giudizio sintetico di tutta la valutazione.

3.2.4 Analisi dei risultati

L'ultima fase dello studio LCA corrisponde anche alla fine dell'analisi degli impatti e ci consente di identificare le componenti più fragili del sistema, valutare la consistenza delle metodologie e dei risultati e, infine, di fare conclusioni con suggerimenti e raccomandazioni.

Capitolo quarto – Analisi della sostenibilità ambientale

4.1 Caso studio.

Chieti è il capoluogo dell'omonima provincia Abruzzese: una cittadina che conta circa 48 mila abitanti. In base ai dati forniti da Legambiente in collaborazione con i consorzi di filiera, nel 2021, Chieti è rimasta in linea con i suoi livelli di raccolta differenziata, riuscendo a differenziare il 70,9% dei propri rifiuti. Tra i capoluoghi, è seconda solo a Teramo che ha portato a differenziare il 71,9% dei propri rifiuti.

Andando ad osservare i dati relativi al riciclo RAEE, forniti dal Cdr di Chieti gestito dal consorzio Formula Ambiente S.p.a., risulta un leggero calo nella raccolta di RAEE nel 2021, fermatosi a 246 tonnellate, dopo 4 anni di tendenza positiva come ci mostra il grafico seguente:

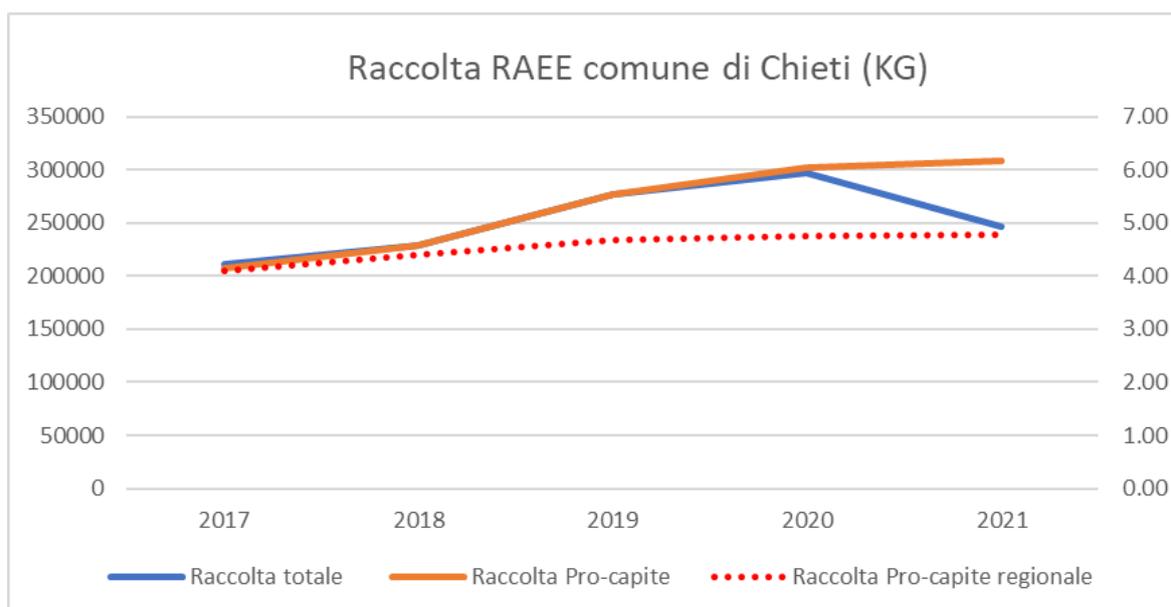


Grafico 4.1 Raccolta RAEE nel comune di Chieti

Analizzando i dati si può notare che nonostante la raccolta sia diminuita nel 2021, il tasso Pro-Capite è continuato ad aumentare arrivando quasi un punto sopra la media regionale.

Questo perché la città di Chieti sta subendo un processo di spopolamento perdendo quasi 10mila abitanti negli ultimi 4 anni (ISTAT). Allo stesso tempo la rete di gestione rifiuti è diventata più efficiente, riuscendo a intercettare sempre più RAEE.

In base al nuovo accordo per la gestione dei rifiuti elettrici ed elettronici nei centri di raccolta comunali, un comune, per ottenere il massimo contributo, deve raggiungere la soglia dei 12 Kg/ab, ovvero il target europeo.

Ad oggi, la media nazionale della raccolta Pro-capite, in base ai dati del centro di coordinamento RAEE, è di 6,46 Kg/ab, leggermente maggiore al dato Teatino che risulta essere di 5,9 Kg/ab e che a sua volta è meno della metà del target da raggiungere.

Aumentando il focus a livello provinciale, come ci mostra il grafico 3.2, la situazione non migliora. Anzi, in confronto con le altre province abruzzesi, quella di Chieti è l'unica che sta peggiorando nel tempo mentre Teramo risulta essere la più virtuosa delle quattro.

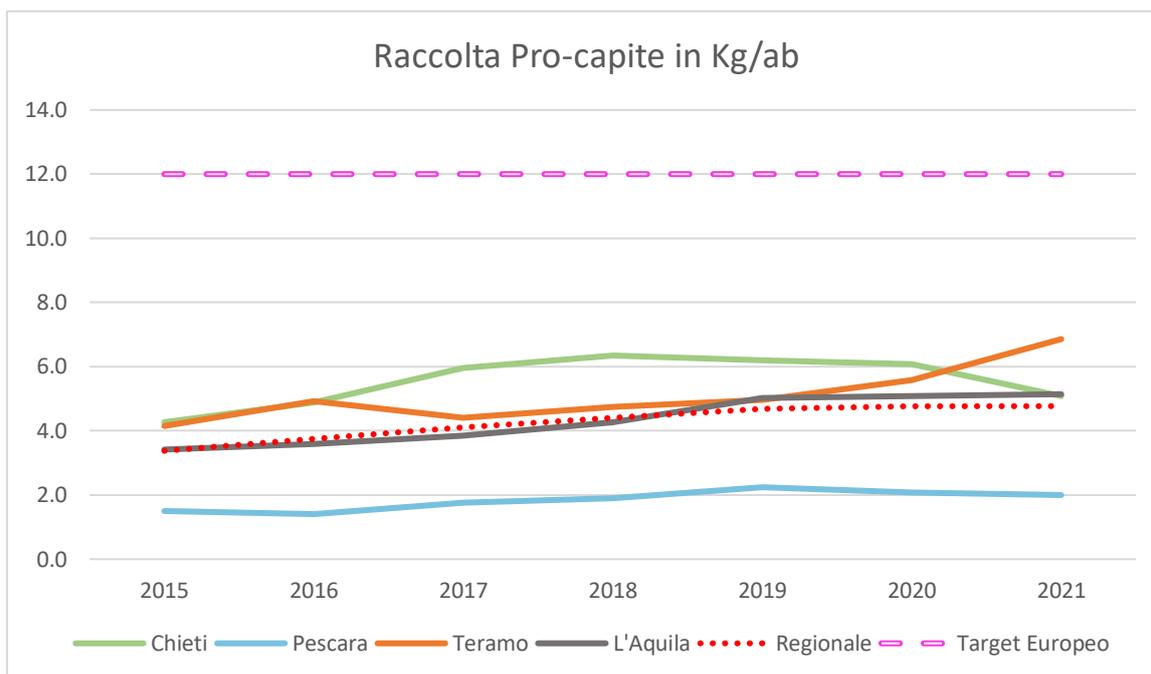


Grafico 4.2 Raccolta RAEE per provincia

Pescara, che è la seconda provincia per numero di abitanti, è fanalino di coda nella classifica con enorme distacco dalle altre. Considerando che quasi la metà dei cittadini abitano abruzzesi nell'omonimo capoluogo, questo rappresenta un enorme "miniera" con tante risorse che annualmente non vengono sfruttate e sono perdute per sempre.

Le problematiche di questa mancanza sono molteplici e le abbiamo affrontate in parte nel paragrafo 1.3.3, evidenziando come bisogna lavorare molto sull'educazione e la conoscenza del cittadino sui RAEE. Infatti, solo un italiano su due conosce la parola "RAEE" e 2 italiani su 3 non sanno come comportarsi sostenibilmente a riguardo (CDC RAEE).

In aggiunta, anche la rete impiantistica soffre della carenza di centri di raccolta, (circa 3900 su 7983 comuni (CDC RAEE)), e di impianti di

smaltimento a causa della complessità burocratica che circonda la filiera. Ad esempio, solo i procedimenti per il rilascio delle autorizzazioni di avvio di un impianto, richiedono, di media, più di 4 anni. I problemi logistici e la scarsa conoscenza del problema spingono molte famiglie semplicemente a tenere apparecchiature da smaltire in casa (circa il 75% degli Italiani hanno almeno un apparecchio elettronico da smaltire in casa) (Lorenzo Tavazzi, 2022).

Un aumento dei centri di recupero e di smaltimento, unito ad un lavoro di educazione e conoscenza della popolazione, potrebbe aumentare il tasso di raccolta dei RAEE che, seppure non potrà mai sostituire l'attività estrattiva, può consentire di ridurre la dipendenza da materie prime critiche, garantendo benefici economici, ambientali e sociali.

Per verificare eventuali benefici di un nuovo impianto di smaltimento a Chieti, è stato svolto un lavoro di analisi LCA.

4.2 Impianto

L'impianto elaborato in questo studio è stato pensato non solo per recuperare le materie prime seconde, ma anche per ridare vita a quei componenti e RAEE che possono essere recuperati e reimmessi nel mercato. Per questo, nel progetto dell'impianto, prima dell'effettivo smaltimento, ci sarà una fase di selezione, analisi ed eventuale rigeneramento di componenti recuperabili da poter rimettere nel mercato.

Verranno trattati i RAEE R1, R2, R3 e R4 escludendo di conseguenza gli R5 che hanno un processo di recupero particolare.

Nella fase di trattamento avremo due linee distinte, una ideata per il recupero delle componenti dei RAEE, un'altra dedicata alle schede elettroniche per il recupero di materiali preziosi. In riferimento a quest'ultima saranno confrontate due tecnologie, che rappresentano però l'ultima maglia della catena che forma l'impianto, così composta:

1. Registrazione e deposito
2. Classificazione
3. Pretrattamento
4. Trattamento

L'ideazione dell'impianto segue quanto dettato dalle linee guida redatte dal ministero dell'ambiente e della tutela del territorio e del mare in collaborazione con il ministero dello sviluppo economico e della salute con il D.M. 29 gennaio 2007 e secondo il D.lgs. n.49 del 1 marzo 2014.

In base a quest'ultimo, gli impianti di trattamento (RAEE) non sono caratterizzati da impatti ambientali superiori a quelli di un qualsiasi impianto industriale e non comportano, quindi, particolari precauzioni dovute alla natura dei materiali trattati.

L'impianto sarà delimitato da idonea recinzione lungo tutto il perimetro, adornata con elementi che andranno ad minimizzare l'impatto visivo della struttura.

La zona ideale in cui potrebbe essere inserito questa tipologia di impianto è un'area industriale, lontana da edifici residenziali, scuole e ospedali e senza limiti derivati dalla presenza di aree protette.

La zona Industriale di Chieti, come mostrato nella figura 4.2.1, offre un'ottima soluzione: è vicino alle arterie principali e il centro di raccolta dista circa 4km, permettendo di risparmiare emissioni di CO₂ (attualmente i RAEE vengono smaltiti in un impianto situato nelle Marche) e la vicinanza con l'autostrada eviterebbe il passaggio dei mezzi all'interno delle zone abitate.

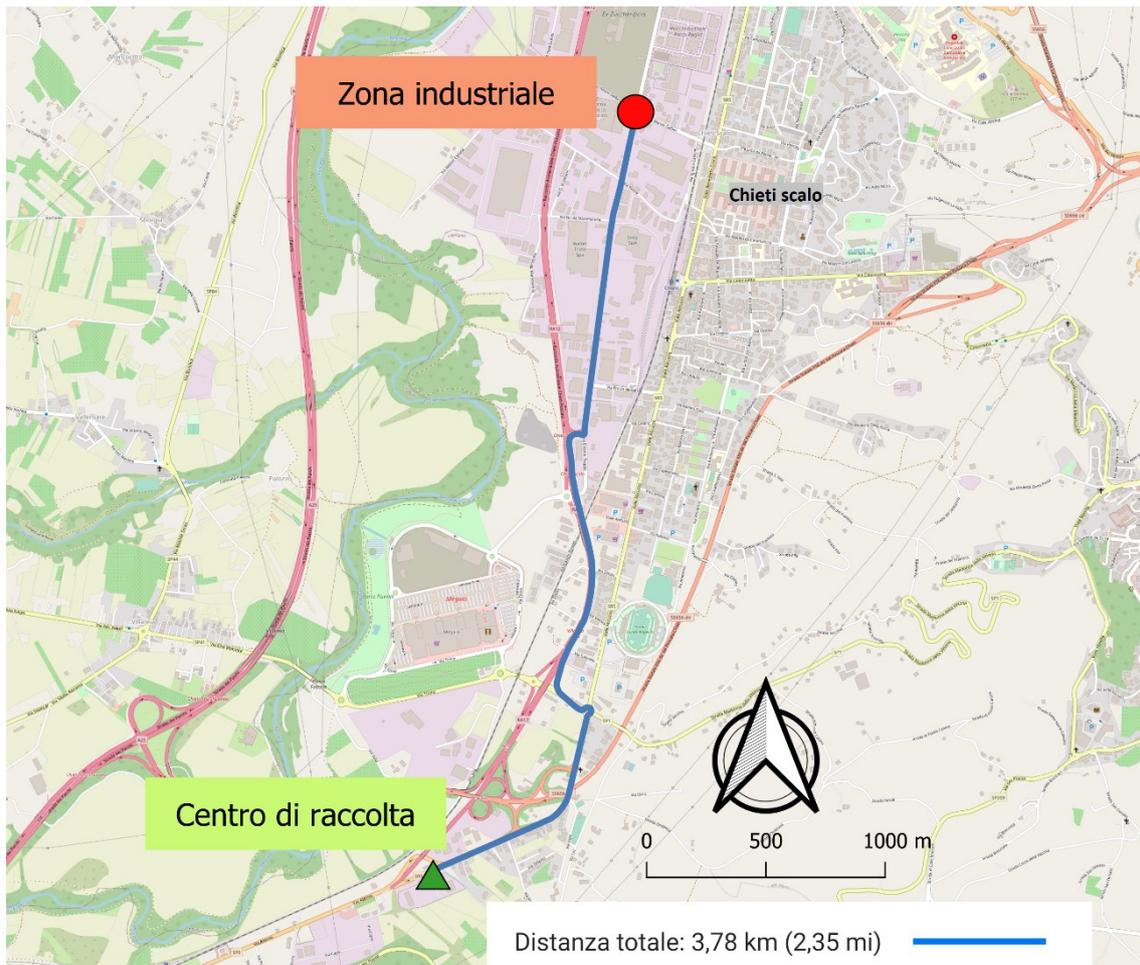


Figura 4.2.1 Distanza tra centro di raccolta e Zona industriale

Di seguito la descrizione dell'impianto che segue i regolamenti dettati dalle linee guida 2007.

1.Registrazione e deposito

Superato l'ingresso dell'impianto, i mezzi verranno pesati e identificati. Il carico RAEE verrà scaricato e subirà una prima differenziazione sommaria per categorie, registrando tutto su un data center.

I *data center* sono infrastrutture fisiche che permettono la digitalizzazione di tutte le informazioni gestite da un'azienda. Ha capacità di elaborazione dei dati, salvataggio e gestione di tutti i dispositivi.

L'idea è quella di eliminare quanto possibile la carta stampata e tutto il materiale che ruota intorno ad essa, riducendo al minimo indispensabile le risorse consumate dall'impianto.

Per una maggiore sicurezza è opportuno creare un luogo apposito ad ospitare il complesso informatico con schede SSD per backup regolari in modo da non perdere informazioni in caso di anomalie (M. Bramucci).

I documenti cartacei saranno realizzati solo se strettamente necessario.

Una volta effettuata la registrazione del materiale in ingresso, verrà posizionato nell'area di messa in riserva che sarà costituita da un adeguato sistema di riparo delle acque meteoriche ed eventi climatici intensi, così da

preservare le componenti recuperabili. Sarà presente un pozzetto per la raccolta di eventuali perdite di liquidi dai rifiuti con possibilità di raccolta.

L'area inoltre sarà dotata di tutti i sistemi di sicurezza necessari, con segnaletica orizzontale e verticale per una movimentazione sicura dei mezzi.

Il personale sarà preparato alla movimentazione dei rifiuti in modo da non lesionare le apparecchiature durante le movimentazioni, in particolar modo i frigoriferi che possono rilasciare refrigeranti o oli e i televisori a tubo catodico per evitare dispersione di polveri e vapori.

Le accortezze da prendere saranno:

- a) Utilizzo di apparecchiature di sollevamento idonee
- b) Chiusura assicurata di sportelli e fissaggi delle parti mobili
- c) Evitare le operazioni di riduzione volumetrica prima della messa in sicurezza

Queste regole saranno valide in ogni fase di movimentazione dei rifiuti nell'intera area dell'impianto.

Sarà utilizzato anche un rilevatore di radioattività all'ingresso dei mezzi in modo da individuare eventuali rifiuti radioattivi.

2.Classificazione

All'interno dell'area di stoccaggio avviene anche la classificazione, per verificare se i RAEE devono dirigersi nell'area di recupero o smaltimento. L'identificazione avverrà manualmente per scartare in maniera efficace tutti quei rifiuti impossibili da recuperare.

Per i RAEE R3 e R4 saranno individuati schermi, smartphone, Computer e Personal Computer che possono essere in grado di offrire elementi recuperabili, quali ventole di raffreddamento, hard disk, unità ottica e alimentatore, che, indipendentemente dall'età dell'apparecchio, possono essere riutilizzati. Il recupero di altri componenti quali scheda madre, microprocessore, memoria RAM, scheda video e monitor dipendono invece dall'anno di produzione del dispositivo.

Dai telefoni cellulari si possono recuperare vari componenti quali telecamera, trasmettitore telefonico, ricevitore, schermo, memoria e sistema di vibrazione. Anche in questo caso dipende dall'età del dispositivo.

Per quanto riguarda i RAEE R1 e R2 si potranno recuperare il motore, il cestello e l'oblò delle lavatrici, e il compressore dei frigoriferi.

Una volta separati i rifiuti che possono contenere elementi recuperabili si passa al pretrattamento, processo che riguarderà sia i RAEE diretti al recupero materiali che i RAEE diretti al recupero componenti.

3.Pretrattamento

Il pretrattamento è un processo che riguarda la messa in sicurezza dei RAEE prima del trattamento vero e proprio.

Questa fase comprenderà la rimozione delle seguenti sostanze, preparati e componenti sia da i RAEE destinati al recupero componenti e ricondizionamento, sia da quelli destinati al recupero materiale:

- Pile e batterie
- Cartucce di toner, liquido e in polvere
- Rifiuti di amianto e componenti che contengono amianto
- Colorfluorocarburi (CFC), idroclorofluorocarburi (HCFC), idrofluoroclorocarburi (HFC) o idrocarburi (HC)
- Schermi a cristalli liquidi
- Cavi elettrici esterni
- Componenti contenenti fibre ceramiche
- condensatori elettrolitici contenenti sostanze potenzialmente pericolose

I RAEE che seguiranno per il recupero materiale subiranno un'ulteriore fase di rimozione, oltre a quelle già elencate in precedenza, quali:

- Schede elettroniche e PCB

- Componenti contenenti mercurio, come interruttori o i retro-illuminatori
- Tubi catodici
- Sorgenti luminose a scarica
- Componenti contenenti sostanze radioattive sopra la soglia di esenzione previste all'articolo 3 e all'allegato I alla direttiva 96/29/EURATOM

I luoghi che ospiteranno l'impianto saranno ideati in modo tale da evitare ogni contaminazione del suolo e/o falde sottostanti.

Saranno adottate tutte le cautele per impedire il rilascio di fluidi pericolosi, formazione di odori e dispersione di aerosol e polveri. In caso di produzione di polveri ci sarà un idoneo sistema di captazione e abbattimento delle stesse.

3.Trattamento

Nella fase di trattamento troveremo due linee distinte, una prima per preparare i rifiuti al recupero di componenti ed una seconda per prepararli al recupero materiale.

Recupero componenti

Una volta messi in sicurezza i RAEE saranno smontati delle parti interessanti dal punto di vista del recupero e ricondizionate da enti esterni o professionisti interni.

Tutto quello che verrà scartato in questa fase seguirà la linea di recupero materiale.

Recupero materiale

Dopo la fase di pretrattamento avremo:

- Componenti di scarto, che andranno gestite da aziende esterne specializzate.
- Circuiti, che saranno trattati nelle fasi finali del processo.
- Materiali da recuperare, che inizieranno il percorso di recupero.

L'impianto per il recupero dei materiali sarà formato da diversi moduli realizzati dalla ditta specializzata Stokkermill come mostrato in figura 4.1, questa impostazione permetterà la differenziazione dei diversi materiali che costituiscono i RAEE (Plastica, metalli ferrosi e metalli non ferrosi).

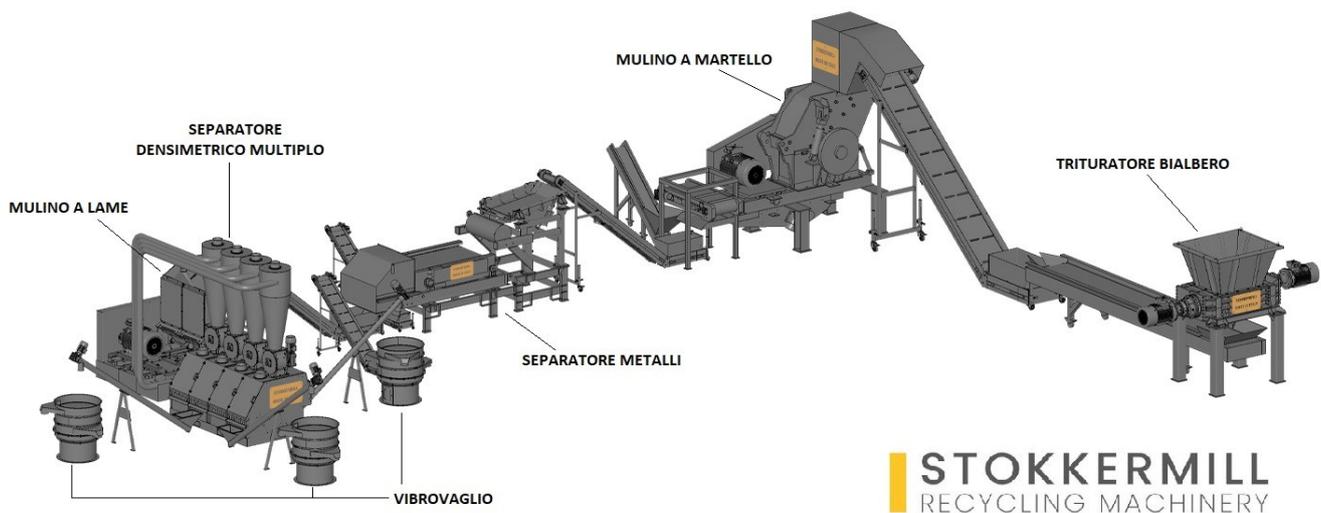


Figura 4.2.2 Impianto di recupero Stokkermill

Nel dettaglio l'impianto è così composto:

Trituratore bialbero: Svolge una prima triturazione grossolana tramite due lame poste su due alberi che ruotano verso il centro riducendo volumetricamente i componenti RAEE. Il consumo è di circa 5,5 kW ad albero.

Molino a martello: Permette una seconda triturazione più fine, sarà utilizzato anche per i circuiti recuperati per renderli della pezzatura adatta ai processi di recupero successivi. Il consumo è di circa 30 kW.

Separatore metalli: Consente il recupero dei metalli non ferrosi tramite un rotore magnetico che, posto all'interno del nastro trasportatore, genera un campo di corrente indotta la quale allontana le particelle di metalli non ferrosi a bassa conducibilità elettrica. Il consumo è di circa 5.5 kW.

Mulino a lame: Permette di ottenere una elevata raffinazione degli scarti tramite una griglia classificatrice che consente il passaggio della pezzatura richiesta dal separatore. Vengono forniti con impianto d'aspirazione per le polveri prodotte. Il consumo è circa 25 kW.

Separatore densimetrico: Consente la separazione dei materiali presenti tramite un sistema di tavole densimetriche. Il consumo è di circa 10 kW.

Vibrovaglio circolare: Alla fine del processo troviamo tre vibrovagli circolari che consentono di setacciare e classificare il prodotto ottenuto. Saranno posizionati all'uscita del materiale plastico, ferroso e non ferroso. Il consumo è di circa 1.1 kW ognuno.

Nastro trasportatore: Consente il passaggio del materiale da un modulo all'altro. Il consumo è circa di 0.4 kW ognuno, saranno presenti 4 nastro trasportatori per un totale di 1.6 kW.

All'uscita del processo otterremo materia prima seconda pronta ad essere raffinata ed inserita nei processi di produzione industriali.

I circuiti e le schede elettroniche separate nella fase di pretrattamento subiranno un processo di recupero delle materie preziose contenute al loro interno.

Recupero di circuiti e schede elettroniche

I materiali all'interno delle schede elettroniche possono essere recuperati principalmente tramite due processi:

- Pirometallurgia
- Idrometallurgia

Il primo metodo è il più consolidato, consiste nella combustione dei RAEE in un forno o in un bagno fuso per rimuovere materiali superflui come plastica e ossidi refrattari, formando una fase di ossidi metallici. Il processo richiede l'utilizzo di grandi quantità di energia per raggiungere le temperature adeguate, a volte superiore ai 1000°C (Laura Rocchetti, 2013) (Jirang Cui, 2007).

Questo comporta costi energetici molto elevati e gravi emissioni che devono essere gestite prima che vengano liberate in atmosfera. Per questi motivi il sistema pirometallurgico sta lasciando spazio all'idrometallurgia, meno impattante dal punto di vista di emissioni e meno energivoro (Jirang Cui, 2007).

L'idrometallurgia, per l'appunto, è un processo di estrazione che si basa sull'utilizzo di agenti liscivianti in soluzione acquose, quali acidi e basi forti.

È un sistema poco energivoro e con impatti contenuti, consentendone l'applicazione anche a capacità ridotte (Laura Rocchetti, 2013), i residui inoltre sono più facili da gestire e trattare rispetto alle scorie e metalli fusi generati dalla pirometallurgia (Fontana, 2015).

Un terzo sistema ancora in fase di studio e ottimizzazione è quello della Biometallurgia, ovvero l'utilizzo di biomassa per il recupero di materiale prezioso. In particolare, nel Bioassorbimento, possono essere utilizzati sia organismi vivi che non, è infatti una interazione passiva fisico-chimica tra i gruppi superficiali carichi dell'organismo e gli ioni in soluzione (Angelis, 2013).

In questo studio sono stati confrontati due delle tre tecniche appena descritte e si andrà ad valutare la meno impattante: un impianto pilota idrometallurgico, realizzato da **Tecnochimica**, a Milano, e un impianto biometallurgico, realizzato dall'azienda neozelandese **MINT**.

4.2.1 Processo Tecnocimica

Il primo impianto che andrò a descrivere è stato realizzato dall'azienda Tecnocimica S.r.l., ed è situato a San Giuliano Milanese (MI). Il processo si divide in 5 fasi principali:

1. Prima lisciviazione
2. Prima Elettrodeposizione
3. Adsorbimento con carbone attivo modificato
4. Seconda lisciviazione
5. Seconda elettrodeposizione

1) Prima lisciviazione

Le schede elettroniche provenienti dal pretrattamento subiranno una seconda triturazione per rendere la granulometria più fine. Il materiale ottenuto andrà a contatto con un solvente, in questo caso acido nitrico (HNO_3) al 16%, ottenuto diluendo acido nitrico al 65% con acqua distillata.

Si otterrà, alla fine del processo, una soluzione contenente i diversi metalli bersaglio estratti dalle schede tramite il solvente e un residuo solido. Verrà prodotta anche NO_x che sarà trattata tramite neutralizzazione a base di NaOH in situ.

Per tenere alta la cinetica del processo viene mantenuta una temperatura di 60°C per tutta la fase di lisciviazione.

2) Elettrodeposizione

Nella seconda fase di lavorazione, la soluzione uscente dalla lisciviazione subisce un processo di elettrodeposizione, ovvero una metodologia che permette la deposizione di un metallo sulla superficie di un elettrodo che, inserito nella soluzione, viene attraversato da un flusso di corrente continua. Il passaggio di corrente permette che gli ioni metalli si riducano in atomi metalli, depositandosi sulla superficie dell'elettrodo (Yuliy D. Gamburg, 2011).

In questa fase verrà recuperata con efficienza il 97.8% di rame e il 99% di argento, lasciano nel refluo in uscita piccole tracce dei due metalli e alte percentuali di nichel e stagno che saranno adsorbiti con carbone attivo modificato (Elena Maria Iannicelli-Zubiani a, 2016).

3) Adsorbimento con carbone attivo modificato

Questa fase permetterà il recupero del rame rimasto in soluzione, dello stagno e del nichel tramite l'utilizzo di carbone attivo.

Il carbone attivo è un materiale altamente adsorbente, la sua capacità di adsorbimento è legata alla struttura porosa ben sviluppata che gli permette di avere un'elevata area specifica e, di conseguenza, di trattenere le molecole al suo interno.

Il carbone attivo può essere modificato in modo da adattare la superficie allo scopo desiderato, andando a modificare le caratteristiche chimiche, fisiche o biologiche (Manoj Kumar Jha, 2021).

Le modifiche attuate al carbone attivo utilizzato in questo impianto permettono il recupero del 53% di rame, 99% di stagno e 65% di nichel. Il carbone attivo esausto verrà smaltito in discariche per rifiuti speciali. (Elena Maria Iannicelli-Zubiani a, 2016).

4)Seconda lisciviazione

Il materiale solido in uscita dalla prima fase verrà inviato al secondo trattamento di lisciviazione in acqua regia con ulteriore stazionamento per il recupero dell'oro.

L'acqua regia verrà sintetizzata a partire da una soluzione di acido nitrico al 65% e acido cloridrico al 37%.

In uscita si avrà una soluzione con un'alta concentrazione di oro e una frazione solida da trattare. Alla soluzione sarà aggiunto del Idrossido di sodio (NaOH) in modo da aumentare il pH fino a 4 e ottenere una migliore prestazione di recupero nella fase successiva (Elena Maria Iannicelli-Zubiani a, 2016).

5)Seconda elettrodeposizione

La soluzione contenente l'oro subirà un processo di elettrodeposizione che permetterà il recupero del 95% dell'oro presente (Elena Maria Iannicelli-Zubiani a, 2016).

Trattamenti

L'impianto include tre processi di trattamento in situ, che riguardano in particolare:

- trattamento acque reflue
- neutralizzazione dei rifiuti solidi
- trattamento NOx

Le acque reflue trattate provengono dalle fasi di adsorbimento con carboni attivi e dalla seconda elettrodeposizione, che hanno bisogno di un processo di abbattimento degli ioni metallici residui.

Il processo di abbattimento sarà svolto tramite resine ioniche che permetteranno la rimozione del 99% di nichel e rame, generando un refluo che potrà essere trattato da depurati civili.

Le resine, dopo l'utilizzo, saranno inviate ad una discarica per rifiuti speciali (Elena Maria Iannicelli-Zubiani a, 2016).

Il secondo processo di trattamento, che riguarda i solidi prodotti dalla seconda lisciviazione, è costituito da una fase di neutralizzazione a base di Idrossido di sodio (NaOH) per aumentare il pH. Dopo la neutralizzazione, il solido viene smaltito in discarica sanitaria, mentre la soluzione in uscita dal trattamento può essere inviata al depuratore civile.

L'ultimo trattamento riguarda l'abbattimento degli NO_x, prodotti dalle due fasi di lisciviazione e dalla seconda elettrodeposizione, tramite due torri che effettuano abbattimento a umido con Idrossido di sodio (NaOH).

Le acque reflue residue verranno trattate presso impianto di depurazione civile, mentre i Sali smaltiti in discarica.

4.2.3 Processo MINT

Il secondo processo con cui avverrà il confronto proviene dall'altro alto del mondo: una società neozelandese con sede in Auckland, la MINT Innovation, ha brevettato un sistema biometallurgico innovativo per il recupero di materiali preziosi da schede elettroniche (N° brevetto: SG11201903153PA).

Il processo è costituito da 5 fasi:

1. Prima lisciviazione
2. Elettrodeposizione
3. Seconda lisciviazione con acqua regia
4. Bioassorbimento
5. Separazione
6. Combustione

La prime tre fasi sono le stesse descritte nel processo Tecnochimica; perciò, avremo in ingresso nella prima fase le schede elettroniche triturate finemente e in uscita dalla terza fase (la quarta del sistema Tecnochimica) il refluo contenente l'oro.

3) Bioassorbimento

Successivamente troviamo l'innovazione brevettata da MINT, l'utilizzo di microrganismi, aggiunti alla soluzione in uscita dall'elettrolisi, per recuperare i metalli preziosi contenuti al suo interno.

Il bioassorbimento è un metodo di estrazione innovativo. Le informazioni ad esso relative hanno un elevato valore in ambito industriale, e per tanto possono non essere disponibili nell'immediato. Ciò che risulta dalla letteratura è che numerosi batteri, funghi e alghe riescono ad accumulare attivamente metalli pesanti e preziosi (Jirang Cui, 2007).

Questa capacità, applicata in un'ottica di recupero dei materiali, comporta molteplici vantaggi, che riguardano l'efficienza e la gestione dei fanghi in uscita, i bassi costi operativi e la possibilità di utilizzare diverse combinazioni e meccanismi, in base al proprio scopo (C. Mack, 2007).

Nel sistema MINT vengono adoperati diversi microrganismi per la cattura dei vari metalli presenti nelle schede elettroniche. In questo studio il batterio di riferimento è il *Cupriavidus metallidurans*, ceppo CH34, individuato in vecchie miniere d'oro che, grazie ai tempi di assorbimento molto brevi, lo rendono adatto all'assorbimento dell'oro che si trova in soluzione (New Zealand Brevetto n. SG11201903153PA, 2017).

I batteri verranno per prima cosa divisi dal brodo nutriente (una soluzione costituita prevalentemente da acqua e nutrienti per la coltivazione dei microrganismi) tramite una centrifugazione a 5023 rpm per 15 minuti. Questa tecnica permette la separazione di due sostanze di un miscuglio eterogeneo tramite la forza centrifuga.

Il pellet ottenuto dalla centrifugazione verrà risospeso con percolato di sodio (NaClO_4) e subirà una seconda centrifuga, sempre a 3100rpm, che permetterà di scartare nuovamente il surnatante mentre il pellet sarà risospeso con la soluzione uscente dalla fase di lisciviazione con acqua regia (Soluzione in OUTPUT dalla fase4 descritta in Tecnochimica).

4) Separazione

La miscela finale sarà incubata per circa due ore sotto leggera agitazione tramite shaker orbitale, permettendo di aumentare l'efficienza del bioassorbimento.

Infine ci sarà una terza ed ultima centrifugazione, sempre a 3100rpm, in cui il surnatante verrà scartato e il pellet inviato alla fase successiva.

5) Combustione

L'ultima fase del processo MINT consiste nella combustione del pellet ottenuto che verrà prima filtrato per il tempo necessario a far passare tutto il materiale.

Dopo il filtraggio, il materiale subirà un processo di combustione che eliminerà la parte organica lasciando solo le tracce di oro.

Trattamenti

Durante il processo vengono prodotte acque reflue acide con ioni di metalli pesanti concentrati (Arand, 2021) che verranno trattate nello stesso procedimento a resine ioniche del processo Tecnochimica. Mentre il materiale combusto residuo sarà smaltito in discarica speciale.

4.3 Studio LCA

L'obiettivo di questo studio è quello di confrontare due tipologie di impianti innovativi per valutare quale sia il più sostenibile.

L'approccio utilizzato è di tipo "from candle to candle" in quanto l'analisi fa riferimento a un processo in cui il rifiuto viene riciclato ottenendo materia prima seconda.

Per svolgere lo studio LCA l'impianto è stato suddiviso in cinque parti:

- **Pretrattamento**, che comprende tutti i processi alla fonte per il recupero delle schede elettroniche, compreso la messa in sicurezza e la divisione dei materiali.
- **Processo Stokkermill**, in cui sono stati valutati l'insieme dei macchinari che costituiscono l'impianto per il recupero dei materiali provenienti dal pretrattamento.
- **Processo comune**, che comprende le fasi che i sistemi Tecnochimica e MINT condividono, ovvero le due lisciviazioni, l'aumento del pH e la prima elettrodeposizione.
- **Processo Tecnochimica**, dove sono state inserite tutte le fasi legati all'impianto realizzato da Tecnochimica.
- **Processo MINT**, in cui sono state valutate tutte le fasi legate all'impianto realizzato da MINT Innovation.

L'unità funzionale individuata per svolgere lo studio dei due impianti è di 100 Kg di circuiti elettrici che vengono ottenuti, secondo i bilanci di materia forniti dalle linee guida del 2007 (tabella 4.3.1), smaltendo circa 6 tonnellate di rifiuti RAEE. Per ogni fase di studio avremo dati in INPUT e dati in OUTPUT, come spiegato nel capitolo 3.2.

I dati relativi sono di tipo secondari e terziari, ovvero forniti da banche dati e letteratura scientifica.

composizione	R1 - Frigoriferi e congelatori	R2 - Lavastoviglie	R2 - Lavatrici	R3 - tv e monitor	R4 - Elettronica di consumo
Acciaio	60	28	35	/	/
Acciaio zincato	/	17	/	/	/
Acciaio inox	/	17	10	/	/
Alluminio	3	/	3	1	6
Assemblaggi elettronici	/	/	/	3	5
Calcestruzzo	/	/	22	/	/
Catrame	/	12	/	/	/
CFC	<1	/	/	/	/
Gomma	/	2	3	/	1
Ghisa	/	/	11	/	/
Legno	/	/	4	/	/
Legno e plastica	/	6	/	/	/
Materiale ceramico	/	/	/	/	1
Metalli ferrosi	/	/	/	8	29
Metalli non ferrosi	/	/	/	/	5
Olio	1	/	/	/	/
Plastica	13	12	5	16	40
Poliuretano	10	/	/	/	/
PVC	1	/	/	/	/
Rame - ottone	3	/	/	/	/
Rame	/	2	1	4	2
Vernice	<1	/	/	/	/
Vetro	1	/	2	65	
altro	7	4	4	3	11
totale	100	100	100	100	100

Tabella 4.3.1 Bilancio di massa % in Kg

Prima della raccolta dati è stato delimitato il confine del sistema, come mostrato nella figura 4.3.1, andando ad individuare tutti i processi da considerare nello studio e i flussi di ingresso e in uscita.

4.3.1 Dati pretrattamento

Nel di pretrattamento, evidenziato dalla colorazione viola nella figura 4.3.1 e 4.3.2, il consumo energetico è di circa 93.7 kW (Elena Maria Iannicelli-Zubiani a, 2016) dal quale otterremo tutte quelle componenti destinate allo smaltimento e al recupero.

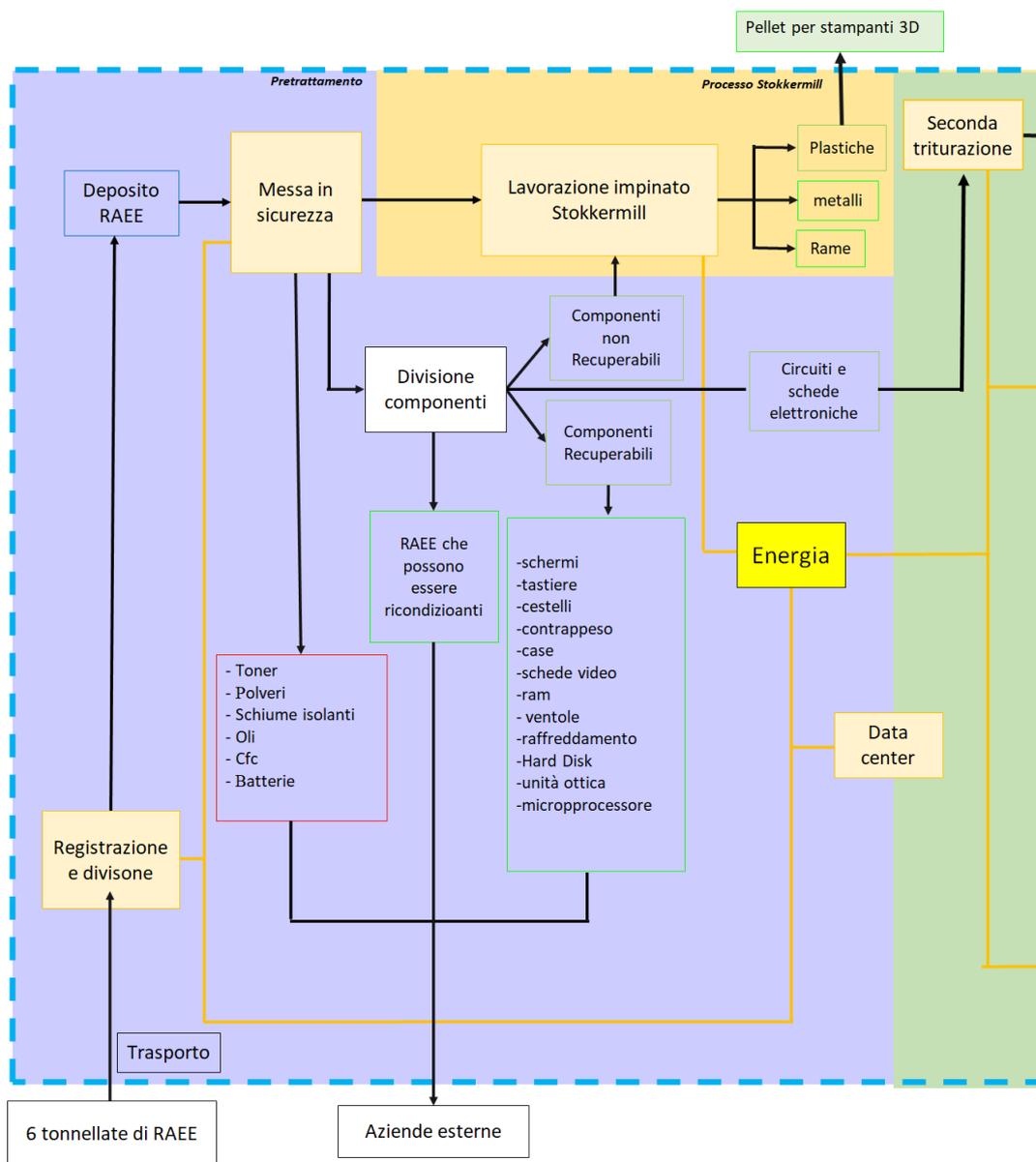


Figura 4.3.2 Dettaglio pretrattamento e Stokkermill

Come mostrato nella tabella 4.3.2, con 6 t di RAEE in ingresso otterremo in OUTPUT circa 3826.2 Kg di materiali destinati al recupero nel sistema Stokkermill, le schede elettroniche che andranno ai processi Tecnochimica e MINT e i componenti che verranno inviati ai centri specializzati esterni.

Sono stati considerati anche i costi di trasporto dei RAEE dal centro di raccolta fino allo stabilimento. Il punto di arrivo dei rifiuti, considerando che non c'è un vero e proprio impianto, è stato stimato al centro della zona industriale Teatina, a circa 3,75 Km di distanza.

Tabella 4.3.2 Dati del pretrattamento

INPUT		OUTPUT	
Energia (kWh)	93.7	Materiale da recuperare (Kg)	3826.2
Rifiuti (t)	6	circuiti (Kg)	102.72
Trasporto (Km)	3.75	CFC (Kg)	9.48
		PVC (Kg)	19.02
		Poliuretano (Kg)	190.2
		Olio (Kg)	19.02
		Vetro (Kg)	1023.48
		Calcestruzzo (Kg)	152.46
		Legno (Kg)	27.72
		Catrame (Kg)	83.16
		Ghisa (Kg)	76.2
		Materiale ceramico (Kg)	11.4
		Altro (Kg)	360

4.3.2 Dati processo Stokkermill

Nella seconda fase analizzata, abbiamo come dati di input i 3826.2 Kg di materiali da recuperare ottenuti nel pretrattamento e il consumo totale della catena di recupero che si attesta per un totale di circa 150 kW, compreso il sistema di aspirazione (4 kW).

In OUTPUT troviamo i materiali recuperati come in tabella 4.3.3.

Tabella 4.3.3 Dati del processo Stokkermill

INPUT		OUTPUT	
Energia (kWh)	2296	Acciaio	1634.79
		Acciaio zincato (Kg)	117.81
		Acciaio inox (Kg)	187.11
		Alluminio (Kg)	161.49
		Gomma (Kg)	46.05
		Plastica (Kg)	1064.91
		Rame - ottone (Kg)	57.06
		Rame (Kg)	104.55
		Metalli ferrosi (Kg)	452.52

I materiali ottenuti da questo processo saranno inviati a ditte specializzate esterne per renderli conformi agli standard industriali.

La plastica ottenuta può essere trasformata in pellet per stampanti 3D, poiché circa il 35% della plastica contenuta nei RAEE è ABS, un particolare polimero molto resistente e duraturo con cui vengono prodotti i rivestimenti dei prodotti elettronici e anche molto utilizzato per le stampanti 3D.

Un altro polimero diffuso è Polipropilene (PP) che costituisce circa il 28% dei RAEE, utilizzato per rivestire piccoli elettrodomestici. Il restante è costituito da polimeri minori che possono essere comunque riutilizzati per formare il pellet (Chiara Beanato, 2020) (FormaLabs, s.d.).

4.3.3 Dati processi comuni

Nei processi comuni sono state considerate le fasi di lisciviazione ed elettrodeposizione che permettono il recupero del rame e la preparazione della soluzione ai trattamenti successivi.

Nella figura 4.3.3 la fase dei processi comuni è evidenziata con la colorazione verde e permette di avere in dettaglio i vari flussi considerati.

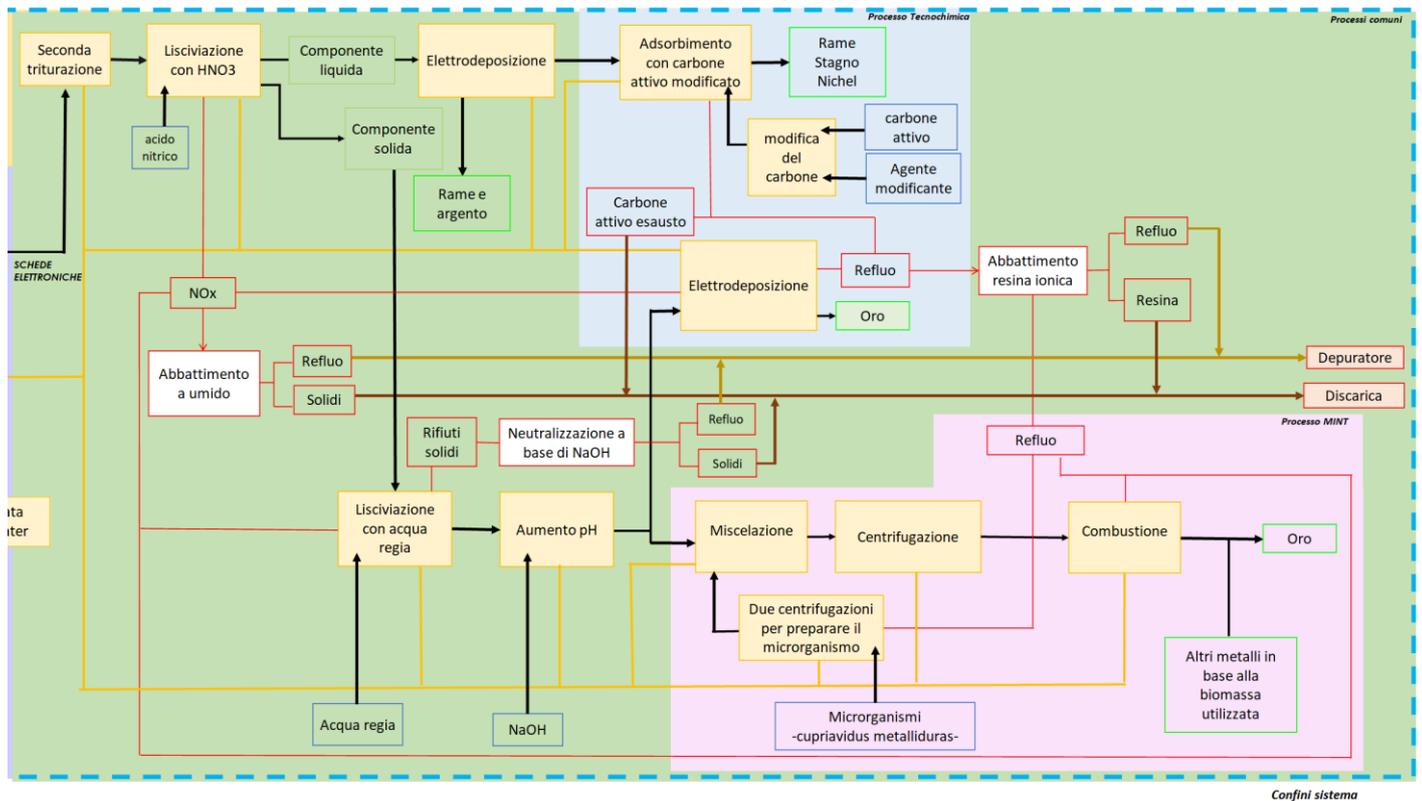


Figura 4.3.3 Dettaglio processi comuni, Tecnochimica e MINT

In INPUT, per la **prima lisciviazione**, avremo 100Kg di schede elettroniche ottenute dal pretrattamento, 136.64 Kg di HNO₃ e 643.79 Kg di Acqua deionizzata per formare la soluzione. Sono stati inseriti anche i dati che fanno riferimento alla produzione di calore per mantenere i 60°

richiesti, ovvero 121 MJ prodotti tramite l'utilizzo di gas, e infine il trasporto del HNO₃ 65%.

Tabella 4.3.4 Dati della fase di prima lisciviazione

INPUT		OUTPUT	
Calore da gas (MJ)	121	Soluzione 1 (Kg)	822.7
Circuiti (Kg)	100	NOx (Kg)	12.63
HNO ₃ 100% (Kg)	136.64	Solidi 1 (Kg)	16.04
Acqua deionizzata (Kg)	643.79		

In OUTPUT avremo 16Kg di solidi, NO_x e la “soluzione1” così composta:

- Acqua 88.90%
- Acido nitrico 0.90%
- Rame 9.60%
- Argento 0.02%
- Stagno 0.09%
- Nichel 0.50%

La seconda fase comune, l'**Elettrodeposizione**, come dati in INPUT troviamo la soluzione2 in uscita dalla lisciviazione e 26 Kw di energia e otterremo, come mostrato nella tabella 4.5, 78 Kg di rame, 0.13Kg di argento e la soluzione residua, denominata “Soluzione2”, così composta:

- Acqua 98.30%
- Acido nitrico 1.00%
- Rame 5.40E-03
- Argento 2.60E-06
- Stagno 0.10%
- Nichel 0.60%

Tabella 4.3.5 Dati della fase di prima elettrodeposizione

INPUT		OUTPUT	
Soluzione (Kg)	822.7	Soluzione 2 (Kg)	743.64
Energia (kWh)	26	Rame (Kg)	78
		Argento (Kg)	0.13

Come terza fase comune troviamo la **seconda lisciviazione**, svolta con acqua regia, necessari per estrarre l'oro dal solido₁ in uscita dalla prima lisciviazione.

Otterremo in OUTPUT la soluzione₄, composta per il 70% di acqua e dal 30% di oro, che subirà un processo di aumento del pH tramite NaOH (tabella 4.7) da cui otterremo la soluzione₅ che verrà indirizzata per la seconda elettrodeposizione, nel caso del processo di Tecnochimica, e al bioassorbimento, nel caso del processo MINT.

Tabella 4.3.6 Dati delle fasi di seconda lisciviazione

INPUT		OUTPUT	
Solido 1 (Kg)	16.04	Solidi 2 (kg)	15.95
HNO ₃ (Kg)	0.15	Soluzione 4 (kg)	0.3
HCl (Kg)	0.2	NO _x (Kg)	0.04

Dalla seconda lisciviazione ci sarà produzione di NO_x, che sarà abbattuto dal sistema come descritto in precedenza.

Tra i processi in comune sono stati inseriti anche il trattamento degli NO_x tramite abbattimento a umido e la neutralizzazione dei solidi provenienti

dalla lisciviazione con acqua regia che vengono prodotti nelle fasi appena descritte.

I dati in ingresso per l'**abbattimento ad umido** riguarderanno gli NO_x prodotti, circa 12.67 Kg, l'elettricità necessaria e 62 Kg di NaOH al 30% (tabella 4.7).

In uscita avremo 49.35 Kg di acque reflue che potranno essere smaltite presso un depuratore ad uso civile e 17.97 Kg di NaNO₃ e 14.59 Kg di NaNO₂ che saranno smaltiti in discarica.

Tabella 4.3.7 Dati Abbattimento NO_x

INPUT		OUTPUT	
Elettricità (Kwh)	9	Acqua reflua (Kg)	49.35
NaOH (30%) (Kg)	62	NaNO ₃ (Kg)	17.97
Nox (Kg)	12.67	NaNO ₂ (Kg)	14.59

Il secondo processo di trattamento riguarda la **neutralizzazione dei solidi**. Anche se contengono solo residui plastici e di ceramica, sono altamente acidi. Perciò si andrà a neutralizzare l'acidità con circa 4.38 Kg di NaOH al 30% (tabella 4.3.8). Dopo il trattamento il residuo rimasto verrà inviato in discarica speciale mentre il refluo all'impianto di depurazione civile.

Tabella 4.3.8 Dati del processo di neutralizzazione dei solidi

INPUT		OUTPUT	
Solido 2 (Kg)	15.95	Rifuti solidi (Kg)	15.95
NaOH (30%) (Kg)	4.38	Soluzione (Kg)	4.38

4.3.4 Dati processo Tecnochimica

Per svolgere l’LCA dell’impianto Tecnochimica, i dati sono stati presi dallo studio svolto dal gruppo di ricerca guidato da Elena Maria Iannicelli-Zubiani del Politecnico di Milano, che hanno utilizzato valori forniti direttamente dall’azienda ideatrice dell’impianto.

Tabella 4.3.9 Dati processo Tecnochimica

	INPUT		OUTPUT	
Produzione carbone attivo modificato	Energia (kWh)	8.4	Carbone attivo modificato (Kg)	6.4
	Carbone attivo (Kg)	8		
	Agente modificante (Kg)	6.68		
	Acqua deionizzata (Kg)	160		
<hr/>				
Adsorbimento carboni attivi modificati	Energia (kWh)	10	Carbone attivo esausto (Kg)	6.4
	Carbone attivo modificato (Kg)	6.4	Soluzione 3 (Kg)	739.24
	Soluzione 2 (Kg)	743.64	Stagno (kg)	0.78
			Nichel (Kg)	3.59
			Rame (Kg)	0.03
<hr/>				
Elettrodeposizione	Soluzione 5 (Kg)	0.74	Soluzione 6 (Kg)	0.65
	Energia (kWh)	12	Oro recuperato (Kg)	0.088

La prima fase del processo riguarda **la produzione del carbone attivo modificato** utilizzato nella fase di adsorbimento, come rappresentato dalla figura 4.3.3 dove il processo Tecnochimica è evidenziato di azzurro.

Troviamo in INPUT (Tabella 4.3.9) il quantitativo di carbone attivo necessario, 6.68 Kg, l’agente modificate, l’acqua deionizzata e l’energia per svolgere il processo, circa 8.4 kWh. La tipologia dell’agente non viene specificato all’interno dello studio, probabilmente per segreto industriale; perciò, è stato scelto di non considerare gli impatti legati ad esso.

In uscita otterremo il carbone attivo modificato che sarà uno dei dati in INPUT nella prima fase di **adsorbimento con carbone attivo** insieme alla soluzione2, in uscita dall'elettrodeposizione, e l'energia necessaria.

In OUTPUT avremo il carbone attivo esausto, che verrà smaltito come rifiuto speciale e la soluzione denominata “soluzione3” così composta:

- Acqua 15.00%
- Oro 12.00%
- NaCl 30%
- NaNO3 43%

Nella terza e ultima fase troviamo la **seconda elettrodeposizione** in cui si andrà a recuperare l'oro presente nella soluzione5 in uscita dalla lisciviazione con acqua regia, una delle fasi in comune, dopo averne aumentato il pH.

Come INPUT avremo quindi la soluzione5 e l'energia necessaria, circa 12 kWh. In OUTPUT ci saranno 0.088 Kg di oro e 0.65 Kg di soluzione6 che verrà trattata, insieme alla soluzione3 prodotta dal processo di adsorbimento con carboni attivi modificati, con resine ioniche.

Il processo di trattamento con **resine ioniche** permette la rimozione dei metalli in tracce rimasti all'interno dei reflui.

Nei dati di INPUT sono state inserite il quantitativo di resine utilizzate in rapporto con i cicli svolti prima dell'esaurimento e le due soluzioni.

In OUTPUT otterremo le acque reflue, circa 739.99 Kg, che possono essere smaltite dal depuratore civile e la resina esausta che sarà inviata ad una discarica per rifiuti speciali (Tabella 4.3.10).

Tabella 4.3.10 Dati del trattamento con resine

INPUT		OUTPUT	
Resine (Kg)	8.80E-04	Acque reflue (Kg)	739.99
Soluzione 3 (Kg)	739.24	Resina esausta (Kg)	6.10E-03
Soluzione 6 (Kg)	0.65		

4.3.5 Dati processo MINT

La prima fase del processo MINT, come rappresentato dalla figura 4.3.3 evidenziando il processo in rosa, consiste nella coltivazione dei batteri all'interno di un brodo nutriente che comporterà l'utilizzo di circa 19 kWh di energia e la produzione di 6 tonnellate di brodo nutriente.

La miscela subirà una prima centrifugazione da cui otterremo il pellet1 di circa 24 Kg e circa 5975.96 Kg di surnatante da scartare. La seconda centrifuga vede come materiale in ingresso il pellet1 risospeso con 0.04 Kg di NaClO₄ ottenendo in uscita 23.8 Kg di pellet2 con 0.24 Kg di surnatante da smaltire (tabella 4.3.11).

Tabella 11 Dati della coltivazione dei microrganismi e le due centrifughe

	INPUT		OUTPUT	
Coltivazione M.O.	Energia (kWh)	19	Brodo Nutriente (Kg)	6000
1° Centrifugazione	Energia (kWh)	7.5	Surnatante (Kg)	5976.00
	Brodo nutriente	6000	Pellet 1 (Kg)	24
2° Centrifugazione	Energia (kWh)	3.5	Surnatante (Kg)	0.24
	Brodo nutriente	24.00	Pellet 2 (Kg)	23.8
	NaClO4 (Kg)	0.04		

La soluzione5, in uscita dalla precedente fase di lisciviazione con acqua regia, viene unito al pellet2 per subire un processo di miscelazione.

In ingresso quindi troveremo la soluzione5, il pellet2 e l'energia per mantenere una movimentazione lenta e costante per circa 2 ore, ottenendo in uscita 24,54 Kg di Miscela.

Tabella 4.3.12 Dati della miscelazione

INPUT		OUTPUT	
Energia (kWh)	14	Miscela (kg)	24.54
Soluzione5 (Kg)	0.74		
pellet2	23.80		

Nella tabella 4.3.13 sono rappresentate le ultime fasi del processo MINT, La prima di queste, la 3° e ultima centrifugazione, ha in OUTPUT 24.2 Kg di pellet3 che subiranno un processo di filtrazione per eliminare la restante componente liquida. Di questo passaggio è stato considerato solo il residuo liquido che dovrà essere smaltito.

Tabella 4.3.13 Dati delle ultime fasi del processo MINT

	INPUT		OUTPUT	
3° Centrifugazione	Energia (kWh)	3.75	Surnatante2 (kg)	0.34
	Miscela (Kg)	24.54	Pellet3 (Kg)	24.2
Filtrazione	pellet3	24.2	Residuo solido (Kg)	4.84
			Residuo liquido (kg)	19.36
Combustione	Combustione (Kg)	0.1333	Oro Kg	0.02780
	Residuo solido (kg)	4.86	NOx (Kg)	4.83

L'ultima fase consiste nella combustione del pellet3 che permetterà l'eliminazione della sostanza organica. Sarà utilizzato per tale scopo un forno con capienza di 70 litri. Per aumentare l'efficienza del processo, sarà effettuata una combustione ogni 15 cicli così da poter riempire l'intero volume del forno. Il consumo di quest'ultimo è di circa 2 Kg/h di GPL e si è ipotizzato che per bruciare 70 Kg di pellet2 si impiegherà circa 1 ora. Perciò dividendo il consumo orario per i 15 cicli necessari si ottiene che ogni ciclo consuma circa 0.133 Kg di GPL.

Infine, in OUTPUT, troveremo 4.83Kg di NOx derivati dalla combustione, che verranno abbattuti, e 0.027 Kg di oro.

Il processo di abbattimento è lo stesso descritto in precedenza per gestire gli NOx prodotti dalle fasi di lisciviazione.

In questo caso cambieranno i dati di INPUT e OUTPUT come in tabella 4.3.14.

Tabella 4.3.14 Dati abbattimento NOx

INPUT		OUTPUT	
Elettricità (Kwh)	4	Acqua reflua (Kg)	18
NaOH (30%) (Kg)	23.63	NaNO3 (Kg)	6.84
Nox (Kg)	4.83	NaNO2 (Kg)	5.56

Infine, il residuo liquido della filtrazione e i surnatanti delle centrifugazioni saranno smaltiti tramite trattamento con resine ioniche come nel processo Tecnochimica.

I quantitativi in ingresso sono le resine utilizzate, il residuo liquido in uscita dalla filtrazione e i surnatanti ottenuti dalle centrifughe come mostrato nella tabella 4.3.15.

In uscita avremo 5995.94 Kg di acque reflue da smaltire presso l'impianto di trattamento civile e la resina esausta da inviare in discarica speciale.

Tabella 4.3.15 Dati trattamento con resine ioniche

INPUT		OUTPUT	
Resine (Kg)	7.14E-03	Acque reflue (Kg)	5995.94
Residuo liquido (Kg)	19.36	Resina esausta (Kg)	4.95E-02
Surnatante (Kg)	5976.58		

4.4 Risultati

Dopo aver svolto la raccolta dati si passa all'elaborazione tramite l'utilizzo del software Gabi e il Database for Life Cycle Engineering (compilation 7.3.3.153; DB version 6.115). Gli impatti sono stati valutati seguendo le linee guida dell'International Reference life cycle data system (ILCD) per l'LCIA (ILCD,2010). Normalizzazione e pesatura sono state eseguite in accordo con il metodo Environmental Footprint (EF) 3.0.

Prima di esporre i risultati ottenuti dallo studio ci sono delle considerazioni da evidenziare. Il trasporto non è stato inserito all'interno dei calcoli, questo perché, in un eventuale contesto di reale applicazione dell'impianto l'approvvigionamento del materiale viene effettuato tramite accordi interni tra aziende e di conseguenza la distanza potrebbe variare di molto. Viene però considerato il trasporto dei RAEE dal centro di raccolta all'area industriale.

Per mancanze da parte del software Gabi alcuni materiali sono stati sostituiti durante il processo di calcolo, quali:

- Carbone attivo con Bentonite
- NaClO₄ con NaClO che possiede lo stesso apporto di cloro e sodio utili ai fini del processo

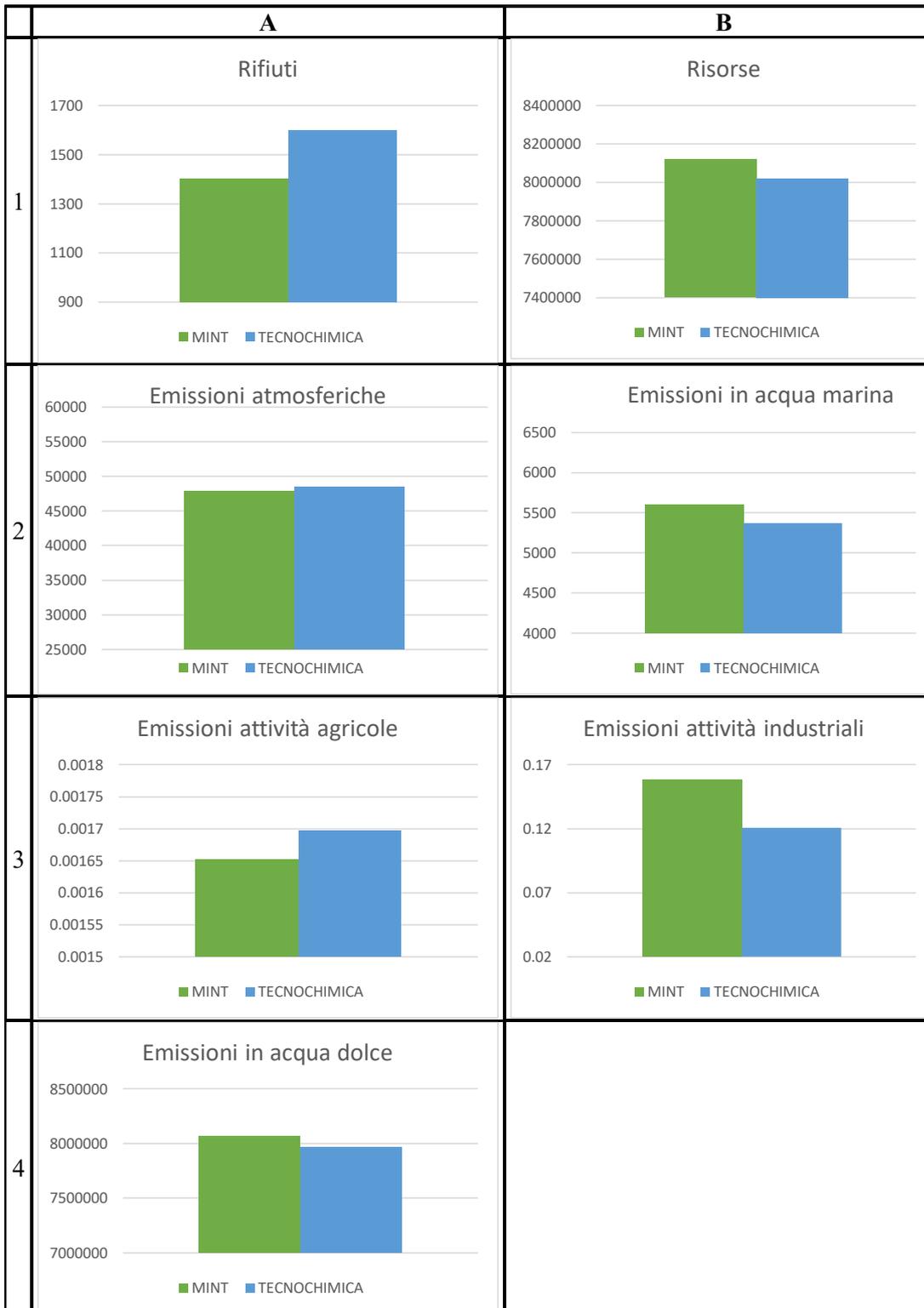
4.4.1 Analisi dell'inventario

La prima fase di analisi consiste nel calcolare il contributo che le varie parti del sistema hanno sui seguenti effetti ambientali:

- Consumo delle risorse
- Rifiuti prodotti
- Emissioni atmosferiche
- Emissioni in acque dolci
- Emissioni in acque marine
- Emissioni derivate da attività agricole
- Emissioni derivate da attività industriali

In questo caso sono stati considerati solo i dati impattanti; quindi, escludendo eventuali prodotti ottenuti dai vari processi che verranno invece considerati nella fase successiva di caratterizzazione e classificazione; i risultati ottenuti sono riportati nella tabella 4.4.1.

Tabella 4.4.1 Analisi dell'inventario



Andando ad analizzare i singoli grafici, il processo MINT supera in maniera rilevante Tecnochimica in due effetti ambientali: le emissioni da attività industriali(B3) e le emissioni in acqua marina (B2).

La differenza maggiore è legata alle emissioni derivate da attività industriali; MINT contribuisce con il 31% in più rispetto a Tecnochimica a causa dei trattamenti delle emissioni legati alla combustione finale dei microrganismi. Mentre per il 4% in più per le emissioni in acque marine, sono collegabili alle grandi quantità di refluo prodotte, di cui il 99,67% è costituito da brodo nutriente per la coltivazione dei microrganismi.

Tecnochimica dal canto suo, contribuisce il 12% in più rispetto a MINT per la produzione dei rifiuti a causa dell'utilizzo dei carboni attivi.

Gli altri effetti ambientali hanno differenze minori del 3%, per cui possiamo dire che per le emissioni atmosferiche, l'utilizzo di risorse e le emissioni in acqua dolce e derivate da attività agricole contribuiscono allo stesso livello sia il processo MINT che Tecnochimica.

4.4.2 Caratterizzazione e classificazione

La seconda parte dell'analisi dei dati riguarda la classificazione e caratterizzazione degli stessi, in modo da evidenziare le criticità maggiori di ogni processo e i punti di forza.

I dati dell'inventario sono stati moltiplicati per un indicatore specifico per una determinata categoria d'impatto. L'indicatore fa riferimento ad una sostanza particolarmente significativa per quella categoria.

Le categorie d'impatto utilizzate sono state:

EF 3.0 Acidificazione - [Mole of H⁺ eq.]

Espresso in mole di ioni di idrogeno equivalente, rappresenta l'effetto delle piogge acide causato da alcuni inquinanti.

EF 3.0 Cambiamento climatico - [kg CO₂ eq.]

Espresso in Kg di CO₂ equivalente, rappresenta il fenomeno dell'aumento di temperatura medio globale legato alle emissioni antropogeniche.

EF 3.0 Ecotossicità acque dolci- total [CTUe]

Espresso in CTUe, ovvero l'impatto tossico cumulativo dei prodotti e dei processi in unità di tossicità e rappresenta all'effetto negativo che un prodotto o un processo ha sulla qualità delle acque dolci.

EF 3.0 Eutrofizzazione acque dolci - [kg P eq.]

Misurato in Kg di fosforo equivalente, rappresenta l'impatto ambientale che le sostanze nutritive possono avere sulla qualità delle acque dolci.

EF 3.0 Eutrofizzazione acque marine [kg N eq.]

Misurato in Kg di azoto equivalente, misura l'impatto di un prodotto o processo sulla quantità di nutrienti presenti in mare.

EF 3.0 Eutrofizzazione Terrestre - [Mole of N eq.]

Misurato in mole di azoto equivalente, rappresenta l'impatto di un prodotto o processo sulle concentrazioni di nutrienti nei terreni.

EF 3.0 Tossicità umana, cancerogena - [CTUh]

Misurato in CTUh, ovvero la quantità di sostanza necessaria per causare un effetto negativo sulla salute umana e rappresenta quanto un determinato prodotto o processo possa essere considerato cancerogeno per l'essere umano.

EF 3.0 Tossicità umana, non cancerogena - [CTUh]

Misurato in CTUh, ovvero la quantità di sostanza necessaria per causare un effetto negativo sulla salute umana e rappresenta quanto un

determinato prodotto o processo possa essere pericoloso per la salute dell'essere umano.

EF 3.0 Radiazioni ionizzanti, salute umana - [kBq U235 eq.]

Misurato in KBq di uranio 235 equivalente, rappresenta l'impatto radioattivo che un prodotto o processo può avere su un essere umano.

EF 3.0 Uso del suolo - [Pt]

Misurato in unità di superficie, rappresenta la perdita di copertura vegetale, erosione e altri danni.

EF 3.0 Riduzione dell'ozono - [kg CFC-11 eq.]

Misurato in Kg equivalenti di CFC-11, rappresenta l'impatto sulla stratosfera della riduzione dello strato di ozono.

EF 3.0 Particolato atmosferico - [Disease incidences]

Misurato in numero di incidenza di malattia, rappresenta l'impatto causato dall'emissione di particolato atmosferico sulla salute umana.

EF 3.0 Formazione ozono fotochimico, salute umana - [kg NMVOC eq.]

Misurato in Kg di NMVOC equivalenti, rappresenta l'impatto sulla salute umana causata dalla formazione di ozono fotochimico legati alle emissioni di composti organici volatili non metanici (NMVOC).

EF 3.0 Utilizzo di risorse energetiche - [MJ]

Misurato in MJ, rappresenta la richiesta energetica di un determinato prodotto o processo.

EF 3.0 Utilizzo di risorse minerarie - [kg Sb eq.]

Misurato in Kg di antimonio equivalente e rappresenta gli impatti legati all'utilizzo di risorse minerarie specifiche.

EF 3.0 Scarsità idrica - [m³ world equiv.]

Misurato in metri cubi di acqua equivalente, rappresenta la quantità di acqua utilizzata o consumata per un prodotto o processo.

Nella caratterizzazione vengono tenuti in considerazione anche i materiali recuperati dalle varie fasi dei processi, in modo da individuare i crediti ambientali generati e sottrarli all'impatto totale.

Per questo motivo i dati di OUTPUT che rappresentano il materiale recuperato dai vari processi (oro, rame, plastica..) hanno valore negativo.

Il sistema Stokkermill è stato escluso dai grafici in quanto i potenziali crediti ambientali che si ottengono sono molto elevati e andavano ad alterare i grafici.

Per confrontare i due processi sono stati presi i seguenti dati di riferimento:

- Energia consumata
- Utilizzo del carbone attivo
- Reflui prodotti
- Rifiuti solidi prodotti
- Oro recuperato
- Argento recuperato
- Nichel recuperato

I risultati sono visibili nella tabella 4.4.2 nella pagina successiva.

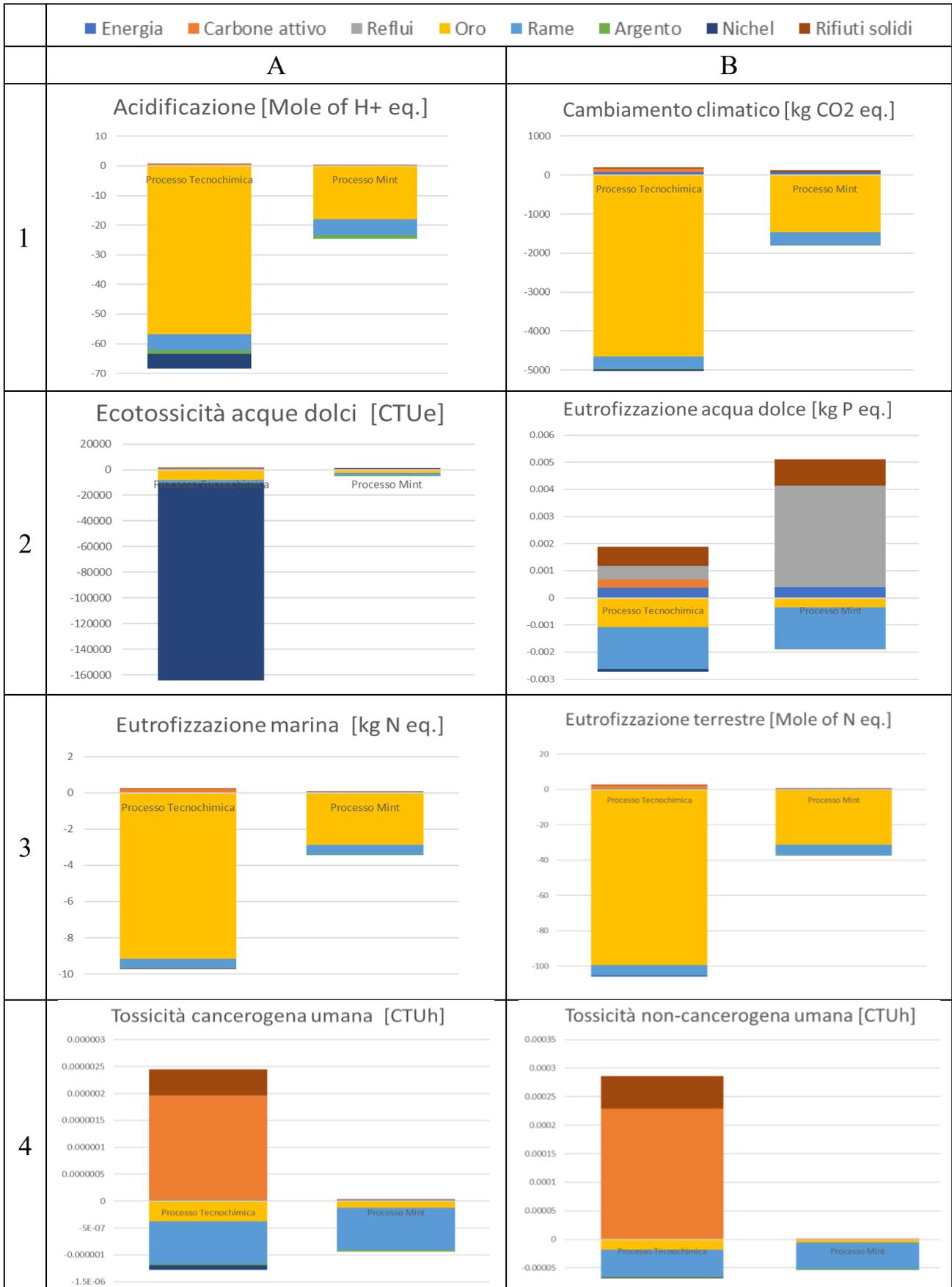




Tabella 4.4.2 Caratterizzazione e classificazione

Crediti ambientali

I crediti ambientali, o crediti di CO₂, equivalgono ad una tonnellata di CO₂ non emessa o assorbita, evitando perciò gli eventuali impatti che si sarebbero generati.

Osservando i grafici è evidente come la componente più importante nei crediti ambientali appartenga al recupero dell'oro.

Infatti, come spiegato nei capitoli precedenti, l'estrazione di oro vergine, come tutta la filiera mineraria, è estremamente impattante e il recupero di pochi grammi rappresentano un grande contributo per limitare gli effetti negativi derivati dalla produzione di un prodotto contenente l'oro.

Un ulteriore elemento che sottolinea quanto il processo di estrazione e lavorazione dell'oro sia poco sostenibile lo si evince dal confronto con i crediti generati dal rame, anch'esso sempre presente in ogni categoria analizzata, che, nonostante sia stato recuperato 2888 volte la quantità di oro nel processo MINT e 886 volte nel processo Tecnochimica, il suo contributo risulta essere nettamente inferiore. Gli impatti dove il rame genera più credito rispetto all'oro è nell'eutrofizzazione delle acque dolci (grafico B2) e nella tossicità umana, sia cancerogena che non (grafici A4 e B4).

Queste divergenze dipendono dalle modalità di estrazione e lavorazione, segno che gli impatti derivati dalla produzione di rame siano più pericolosi per la salute umana rispetto alla produzione di oro che invece impatta maggiormente sulla sfera ambientale.

Osservando invece l'esaurimento del buco dell'ozono (grafico A6) notiamo come i crediti di rame sono maggiori solo nello scenario del processo MINT, derivato dal fatto che quest'ultimo recuperi meno oro rispetto al processo Tecnochimica.

Un altro credito molto marcato è quello del nichel, recuperato solo dall'impianto Tecnochimica tramite la fase di adsorbimento con carboni attivi modificati, nei confronti dell'impatto di ecotossicità acque dolci (grafico A2). Ciò significa che il recupero di questo materiale, molto utilizzato per la produzione di batterie, leghe, catalizzatori e acciai inossidabili, evita impatti tossici su ecosistemi acquatici causati dai processi di estrazione e produzione.

Criticità

Passiamo ora ad analizzare le criticità riscontrate nei due impianti presi in esame.

Andando per ordine di grafici, il primo impatto dove si nota un maggior contributo è l'eutrofizzazione delle acque dolci (grafico B2), associato principalmente al processo MINT a causa delle grandi quantità di acque reflue prodotte che, come detto in precedenza, sono costituita dal 99,7% da brodo nutriente per la coltivazione dei microrganismi. Il restante impatto deriva dai rifiuti in quantità simili tra per il processo MINT e Tecnochimica derivanti in entrambi i casi dal processo di abbattimento a umido degli NOx.

Nei grafici A4 e B4, che riguardano la tossicità cancerogena e non cancerogena, notiamo che MINT non contribuisce per niente rispetto a Tecnochimica che invece svolge un ruolo importante.

L'impatto deriva principalmente dall'utilizzo e smaltimento dei carboni attivi modificati, presenti in Tecnochimica e non nel processo MINT. Da non trascurare sono i crediti che l'utilizzo dei carboni attivi permettono di ottenere al sistema Tecnochimica che però, in questo specifico caso, non forniscono un contributo importante.

L'uso dei carboni attivi modificati si ripercuote anche nel consumo del suolo (grafico B5) e, in misura minore, nell'esaurimento del buco dell'ozono (grafico A6) e radiazioni ionizzanti (grafico A5).

Per questi ultimi tre impatti troviamo, con lo stesso livello di contributo, anche l'energia utilizzata dai processi.

4.4.3 Normalizzazione e pesatura

Nell'ultima fase dello studio LCA si procede a normalizzare tutti i dati riguardanti gli impatti in modo tale da poter svolgere eventuali confronti tra le varie fasi del processo e individuare il contributo di ognuna.

Partendo dall'impianto MINT (grafico 4.4.3), notiamo come la fase Stokkermill abbia un elevato impatto sulla maggior parte delle categorie a causa dell'alto consumo energetico ma, come vedremo successivamente, il recupero di materiale permette di ottenere abbastanza crediti ambientali per trascurare questi impatti.

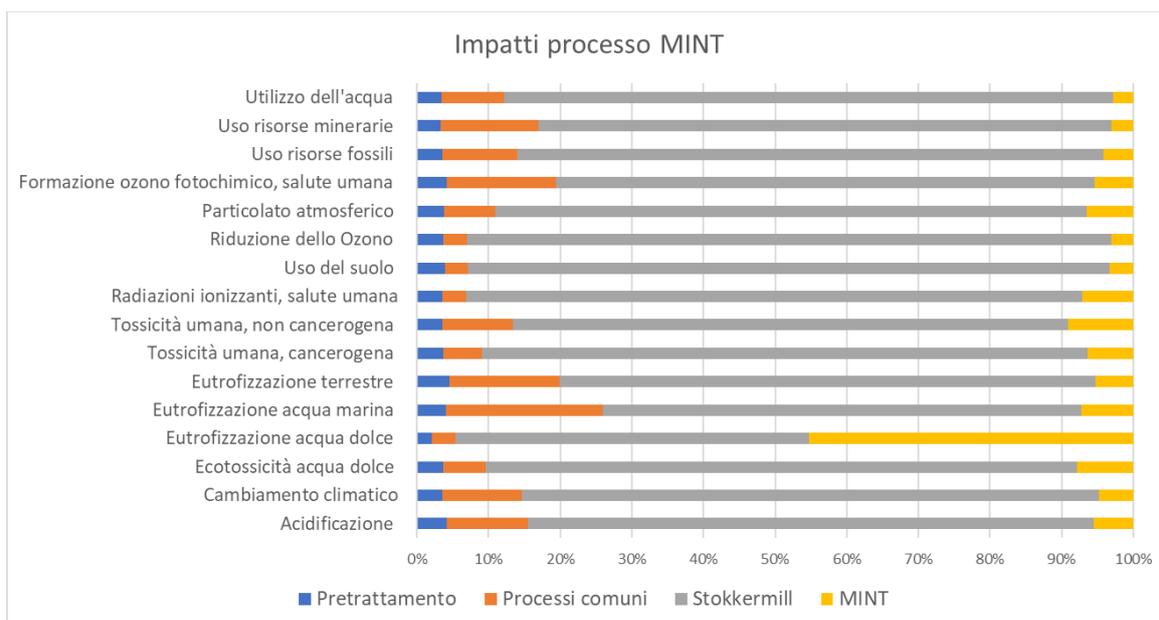


Grafico 4.4.3 Impatti processo MINT

Il contributo maggiore del processo MINT risiede nell'eutrofizzazione dell'acqua dolce derivate sempre dalla grande produzione di acque reflue. Ma osservando il grafico 4.4.4, nel processo MINT notiamo che il contributo più elevato è dato dalle fasi di lisciviazione che costituiscono il 41% degli impatti, legati soprattutto alla prima lisciviazione.

Questo dato nel grafico 4.4.3 è stato inserito nei processi comuni, e rappresenta il 20% del contributo totale legato all'eutrofizzazione dell'acqua marina.

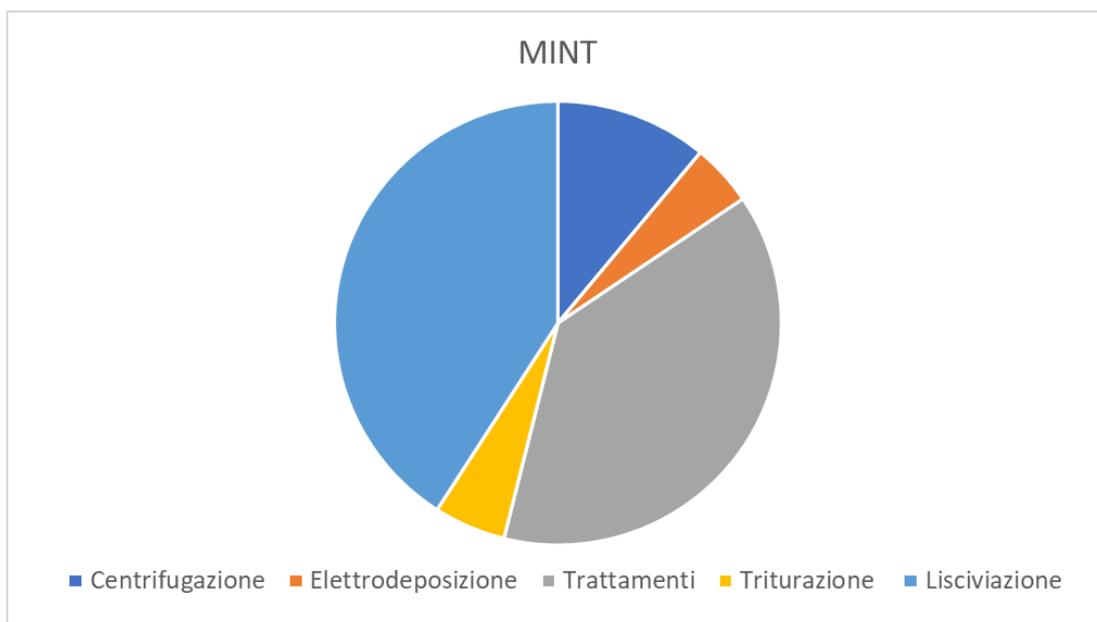


Grafico 4.4.4 Dettaglio processo MINT

Sostituendo il processo MINT con il processo Tecnochimica notiamo come la distribuzione degli impatti cambia.

Il grafico 4.4.5 mostra come Tecnochimica contribuisce quasi al 100% degli impatti di tossicità umana cancerogena e non cancerogena.

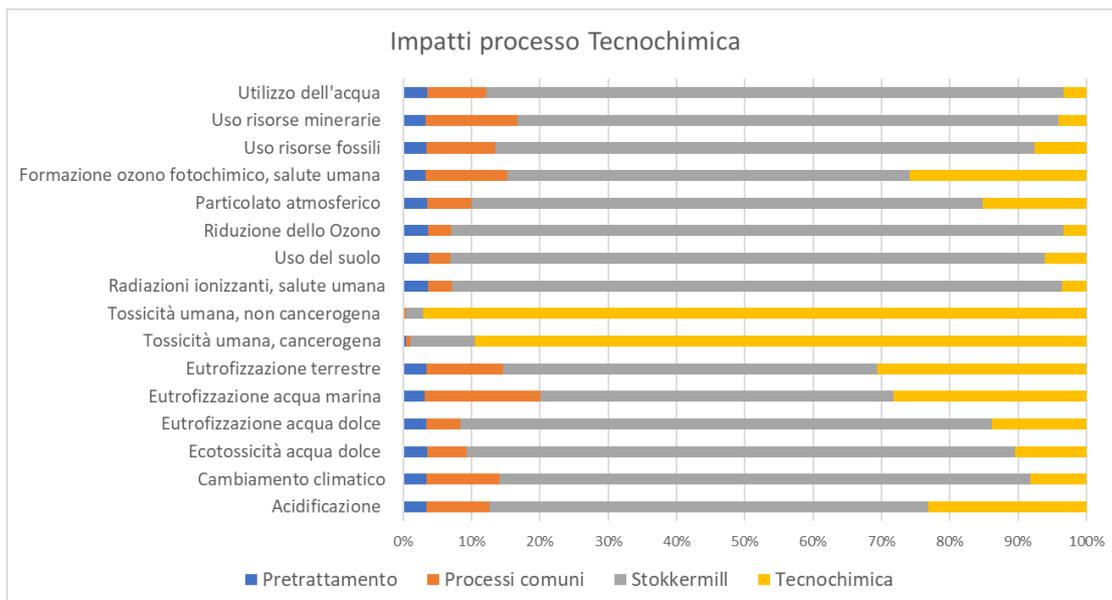


Grafico 4.4.5 Impatti processi Tecnochimica

Il contributo proviene quasi completamente dall'utilizzo del carbone attivo modificato ma oltre ad esso, come ci suggerisce il grafico 4.4.6, ci sono i processi di trattamento che contribuiscono per circa il 20% e le fasi di lisciviazione, anch'esse per il 20% e principalmente legate alla prima lisciviazione.

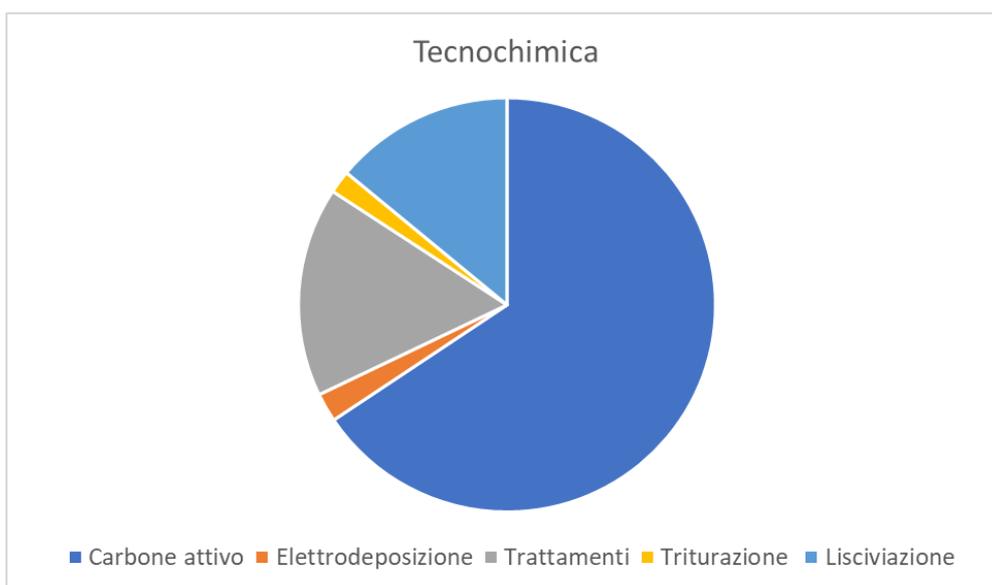


Grafico 4.4.6 Dettaglio processo Tecnochimica

Per quanto riguarda i processi comuni e l'impianto Stokkermill la situazione rimane invariata, essendo uguali per entrambe le opzioni.

Il passo successivo è stato quello di sommare tutti gli impatti e i materiali di recupero per ottenere un indicatore di prestazione ambientale finale che ci permetterà di valutare la soluzione meno impattante.

Come mostrato dalla grafico 4.4.7, l'impostazione migliore ricade sul processo che vede come impianto di trattamento finale quello ideato da Tecnochimica con un indicatore di prestazione ambientale di -7,37.

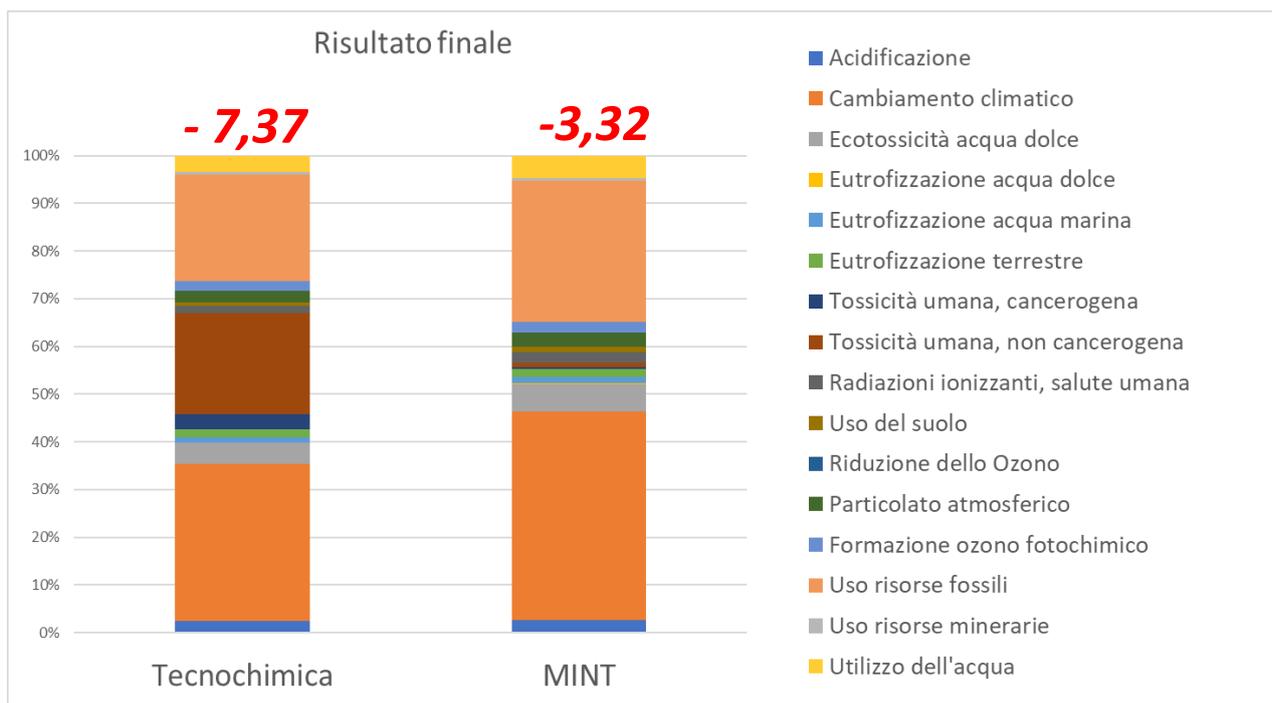


Grafico 4.4.7 Risultato finale

Nonostante nei risultati precedenti Tecnochimica mostrava contributi più elevati nei singoli impatti, prendendo in considerazione anche i prodotti ottenuti dal processo, si dimostra la soluzione più sostenibile.

In entrambi i processi gli impatti maggiori, che riguardano il cambiamento climatico e l'utilizzo di risorse fossili, derivano dall'impianto Stokkermill che permette però di ottenere molti crediti ambientali, difatti l'indicatore di prestazione è -1,26.

La fase con l'indicatore più basso è il pretrattamento, poiché non avviene nessun recupero di materiale ottenendo una valutazione di 0,0025, mentre la fase di contenente i processi in comune e MINT hanno ottenuto rispettivamente -0,29 e -1,76. L'impianto con il processo finale svolto da MINT risulta avere come indicatore di prestazione -3,32.

Ciò che rende il processo Tecnochimica più sostenibile rispetto al processo MINT è la quantità di recupero di oro maggiore a parità di schede elettroniche, infatti, ipotizzando che MINT riuscisse a recuperare gli stessi quantitativi, lo scarto tra i due sarebbe solamente di 0,06 ottenendo rispettivamente -7.37 e -7.31.

Conclusioni

Questo studio di sostenibilità ha permesso di individuare l'impianto migliore dal punto di vista ambientale da inserire nel contesto di gestione dei rifiuti del territorio comunale di Chieti per il recupero di materie prime seconde da RAEE.

Come risultato generale emerge che la scelta più sostenibile, a parità di rifiuti trattati, sia il processo Tecnochimica. Tuttavia, analizzando i diversi punti critici, si possono trarre diverse conclusioni: I processi più impattanti riguardano il consumo energetico della fase Stokkermill, la prima lisciviazione con acido nitrico e, soprattutto, l'utilizzo dei carboni attivi modificati.

Gli impatti derivanti dai consumi energivori possono essere limitati tramite l'utilizzo di pannelli fotovoltaici posizionabili sulle coperture dell'area che ospiterà l'impianto, inclusi i locali di messa in riserva.

Per i processi di lisciviazione allo stato dell'arte attuale non è possibile intervenire senza compromettere l'efficienza e i tempi della reazione, eventuali miglioramenti potrebbero arrivare da future ricerche e prove di laboratorio. Infine, si potrebbe lavorare sulla fase dei carboni attivi, limitando il processo di modifica o variando la produzione dei carboni, spostandosi su composti di derivazione vegetale o di rigenerazione.

Passando al processo MINT, non ci sono molti cambiamenti da poter attuare per migliorare l'efficienza del processo, considerando che la maggior parte degli impatti derivi dalla coltivazione dei microrganismi. Ulteriori ricerche in merito potrebbero portare a perfezionare l'invenzione per aumentare la capacità di recupero dell'oro e rendere il processo più competitivo.

Infine, per determinare la reale installazione dell'impianto pensato in questo elaborato, si dovrebbe approfondire la ricerca attraverso uno studio di impatto ambientale e fattibilità economica.

Ma l'impianto è solo la destinazione finale del rifiuto, per riuscire a raggiungere i target dettati dall'unione europea bisogna partire dal cittadino, per educarlo a svolgere un corretto smaltimento.

Perché il rifiuto è una risorsa molto importante in un sistema chiuso come la terra e riuscire a recuperarlo significa non solo avere maggior indipendenza di approvvigionamento, ma soprattutto un'economia più sostenibile nel lungo periodo.

Riferimenti

Adams, M. S. (2006). *The First Sphere Computer*.

Ajay B. Patil, V. P. (2022). *Separation and Recycling of Rare Earth Elements from Energy System: Feed and Economic Viability Review*.

Ali, S. H. (2014). *Social and Environmental Impact of the Rare Earth Industries. Resources*.

Angelis, D. D. (2013). *Rapporto sugli aspetti ambientali rilevanti dei nuovi processi di tipo idrometallurgico per il recupero di materiali da batterie al litio a fine vita*. ENEA.

Arand, M. T. (2021). *Determining the ability of zeolitic imidazolate framework nanoparticles to remove copper from industrial wastewater*. Otago, New Zealand: University of Otago.

Bagatti, C. D. (2015). *Le terre rare*. In C. D. Bagatti, *Chimica dappertutto* (p. Capitolo 6). Zanichelli Editore SpA.

Barker Will, C. O. (2017). *New Zealand Patent No. SG11201903153PA*.

Bin Lu, B. L. (2014). *Reusability based on Life Cycle Sustainability Assessment: case study on WEEE*. ELSEVIER.

- C. Mack, B. J. (2007). Biosorption of precious metals. *Elsevier*.
- C. Tunsu, T. (2016). Hydrometallurgical Processes for the Recovery of Metals from WEEE. *Elsevier*.
- CDC RAEE. (n.d.).
- Chiara Beanato, S. F. (2020). Caratterizzazione della frazione plastica da RAEE R4 in relazione alle restrizioni RoHS e REACH. *Università Politecnica di Torino*.
- Commissione Europea. (n.d.).
- Commissione Europea. (2017). *Research and development for the Rare Earth Element*.
- Commissione Europea. (2021). *Critical raw materials in EU external policies*.
- Daniela Simina Stefan, I. M. (2013). Mechanism of simultaneous removal of Ca^{2+} , Ni^{2+} , Pb^{2+} and Al^{3+} ions from aqueous solutions using Purolite1 S930 ion exchange resin. *Elsevier*.
- Elena Maria Iannicelli-Zubiani a, M. I. (2016). Environmental impacts of a hydrometallurgical process for electronic waste treatment: A life cycle assessment case study. *Elsevier*.

Emílio J.M.Arruda-Filhoa, M. M. (2011). How iPhone innovators changed their consumption in iDay2: Hedonic post or brand devotion. *Elsevier*.

ENEA. (n.d.). Progetto R.O.M.E.O.

Fontana, D. (2015). *Il riciclo di materiali da rifiuti: un focus sul recupero di metalli preziosi da apparecchiature elettriche ed elettroniche a fine vita*. ENEA.

FormaLabs. (n.d.).

Giacomo Cucignatto, N. G. (2022, Giugno). Lo scontro per le materie prime e la necessità di una nuova politica industriale. *Moneta e Credito*.

Hamdaoui, O. (2007). Removal of copper(II) from aqueous phase by Purolite C100-MB cation exchange resin in fixed bed columns: Modeling. *Elsevier*.

Hodges, A. (1983). *Alan Turing: The Enigma*.

Ifesinachi Okafor-Yarwood, I. J. (2020). Toxic waste dumping in the Global South as a form of environmental racism: Evidence from the Gulf of Guinea. *African Studies*.

IPCC. (n.d.).

ISTAT. (n.d.).

Jirang Cui, L. Z. (2007). Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Elsevier*.

Laura Rocchetti, F. V. (2013). Environmental Impact Assessment of Hydrometallurgical Processes for Metal Recovery from WEEE Residues Using a Portable Prototype Plant. *Environmental Science & Technology*.

Lawrence J.Drewa, M. Q. (1990). The Bayan Obo iron-rare-earth-niobium deposits, Inner Mongolia, China. *Elsevier*.

Legambiente. (2022). *Comuni ricicloni*.

Libi Shen, A. S. (2019). In *Intervention of Smartphone Addiction* (p. 22).

Linee guida per l'individuazione e l'utilizzazione delle migliori tecniche. (2007). *D.M. 29-1-2007*.

Lorenzo Tavazzi. (2022). *Gli scenari evolutivi delle materie prime critiche e il riciclo dei prodotti tecnologici come leva strategica per ridurre i rischi di approvvigionamento per l'Italia*. The European House - Ambrosetti .

M. Bramucci, D. D. (n.d.). *Linee guida per la progettazione di datacenter ad alta efficienza*.

- M. Sansotera, W. N. (2012). Italian WEEE management system and treatment of end-of-life cooling and freezing equipments for CFCs removal. *Elsevier*.
- Mann, M. E. (2022). greenhouse gas. *Encyclopedia Britannica*.
- Manoj Kumar Jha, S. J. (2021). Surface Modified Activated Carbons: Sustainable Bio-Based Materials for Environmental Remediation. *MDPI*.
- Maynard, M. M. (2003). Univac I. In M. M. Maynard, *Encyclopedia of Computer Science* (pp. 1813-1814).
- McAfee, A. (2019). *DI più con Meno*. Egea.
- Moccia, A. (2021). *Un tesoro al piano terra. La geologia che non ti aspetti*. Cairo.
- Neri, P. (2022, Novembre). *MATERIE PRIME CRITICHE, LA SFIDA DELL'ECONOMIA CIRCOLARE*. Retrieved from digigreen: <https://www.digigreen.it/2022/11/24/materie-prime-critiche-la-sfida-economia-circolare/>
- Parke, P. (2016, gennaio 19). More Africans have access to cell phone service than piped water. *CNN*.

Parke, P. (2016, gennaio 19). More Africans have access to cell phone service than piped water . *CNN*.

Patil, A., Paetzel, V., Struis, R., & Ludwig, C. (2022). Separation and Recycling Potential of Rare Earth Elements from Energy System: Economic Viability Review.

Philibin, T. (2003). *Le 100 grandi invenzioni*. G+J/m.

Plass, G. N. (1959). Carbon Dioxide and Climate. In G. N. Plass, *Scientific American* (pp. 41-47).

Rugi, T. (2022, Luglio 26). *Tra siccità e crisi climatica la via dell'idroelettrico si fa più stretta*. Retrieved from EconomiaCircolare: <https://economiecircolare.com/idroelettrico-siccita/>

Silvio Marta, M. B. (2021). Climate and land-use changes drive biodiversity turnover in arthropod assemblages over 150 years. *Nature Ecology & Evolution*.

Statista.com. (n.d.).

Szczepański, M. (2021). Critical raw materials in EU external policies. *EPRS - European Parliamentary Research Service*.

Terna. (n.d.).

Todarello, G. (n.d.). *Trattamento di pirogassificazione di schede elettroniche ai fini di recupero*. CSM - Centro Sviluppo Materiali.

UNITAR. (n.d.). *Global E-Waste Monitor*. UNITAR - United Nations Institute for Training and Research.

USGS. (n.d.).

USGS. (2021). *Mineral Commodity Summaries*. USGS - United State Geological Survey .

Vanessa Forti, C. P. (2020). *The Global E-waste Monitor 2020*.

Yatim, B. K. (2022). The Real Cost of Mining: How Digging for Rare Earth Metals Could Pose a Greater Cost than EVs Can Save. *Honors Theses and Capstones, 666*.

Yuliy D. Gamburg, G. Z. (2011). *Theory and Practice of Metal Electrodeposition*. Springer.