



**Politecnico
di Torino**

DIPARTIMENTO DI INGEGNERIA
GESTIONALE E DELLA PRODUZIONE

CORSO DI LAUREA MAGISTRALE IN INGEGNERIA GESTIONALE

***Studio del processo tecnologico e
tassonomia delle tecnologie utilizzate e
in fase di sviluppo per il
ricondizionamento degli
elettrodomestici, con relativa analisi
degli impatti ambientali ed economici***

Relatori:

Prof.re Galetto Maurizio

Prof.re Genta Gianfranco

Candidata:

Bianca Barbarino

ANNO ACCADEMICO 2024-2025

Indice

INTRODUZIONE.....	1
1. METODOLOGIA E CONTESTO.....	4
1.1 METODOLOGIA	4
1.2 ECONOMIA CIRCOLARE	6
1.2.1 <i>Principi dell'Economia Circolare</i>	7
1.2.2 <i>Cleaner Production</i>	9
2. APPARECCHIATURE ELETTRICHE ED ELETTRONICHE	10
2.1 APPARECCHIATURE ELETTRICHE ED ELETTRONICHE USATE	11
2.2 RIFIUTI DA APPARECCHIATURE ELETTRICHE ED ELETTRONICHE.....	13
2.2.1 <i>RAEE domestici</i>	14
2.2.2 <i>RAEE professionali</i>	15
2.2.3 <i>Composizione dei RAEE</i>	16
2.3 VOLUMI DI RAEE.....	27
2.3.1 <i>Raccolta dei RAEE</i>	31
2.4 GESTIONE DEI RAEE	38
2.4.1 <i>Politiche di gestione dei RAEE in UE</i>	42
3. ANALISI DI MERCATO	45
3.1 IL MERCATO DELLE APPARECCHIATURE ELETTRICHE ED ELETTRONICHE RICONDIZIONATE	50
3.2 IL MERCATO DEGLI ELETTRODOMESTICI	52
4. TRATTAMENTO DEI RAEE	56
4.1 RACCOLTA E RICICLO FORMALE.....	57
4.2 SMALTIMENTO IN DISCARICHE CONTROLLATE	58
4.3 RACCOLTA E RICICLO AL DI FUORI DEI SISTEMI FORMALI, MA CON GESTIONE SVILUPPATA	60
4.4 RACCOLTA E RICICLO AL DI FUORI DEI SISTEMI FORMALI E SENZA GESTIONE SVILUPPATA	61
5. PRATICHE DI TRATTAMENTO DEI RAEE.....	62

Commentato [SP1]: Dovrebbe essere a posto anche con il numero di pagine corretto.

5.1	PRE-TRATTAMENTO DEI RAEE.....	63
5.2	LAVORAZIONE FINALE	66
5.2.1	<i>Pratiche di riciclo dei Printed Circuit Board.....</i>	68
5.2.2	<i>Pratiche di riciclo della plastica nei RAEE.....</i>	76
5.3	CASO STUDIO DI ELETTRODOMESTICI DI RAFFREDDAMENTO E CONGELAMENTO	78
5.3.1	<i>Processo di trattamento degli elettrodomestici di raffreddamento e congelamento.....</i>	80
5.3.2	<i>Processo di trattamento dei grandi elettrodomestici.....</i>	85
5.4	RIUTILIZZO DELLE APPARECCHIATURE ELETTRICHE ED ELETTRONICHE	86
6.	BILANCIO ECONOMICO E AMBIENTALE DEL TRATTAMENTO DEI RAEE	89
6.1	BILANCIO ECONOMICO DEL RICICLO	89
6.1.1	<i>Analisi economica in Italia.....</i>	94
6.1.2	<i>Perdita economica dello scavenging.....</i>	96
6.2	BILANCIO AMBIENTALE	97
6.2.1	<i>Life Cycle Assessment.....</i>	99
	CONCLUSIONI.....	103
	BIBLIOGRAFIA	107

Indice delle figure

Figura 1 - Cosa non rientra negli AEE.	10
Figura 2 - Ciclo di vita delle AEE.	11
Figura 3 - Classificazione RAEE domestici.	14
Figura 4 - Sub-categorie di RAEE domestici.	15
Figura 5 - Classificazione RAEE professionali.	15
Figura 6 - Composizione di un frigorifero.	17
Figura 7 - Processo di funzionamento dei frigoriferi.	18
Figura 8 - Carcassa di un frigorifero.	19
Figura 9 - Composizione di una lavatrice.	21
Figura 10 - Composizione di un microonde.	24
Figura 11 - Componenti di un'aspirapolvere.	26
Figura 12 - Crescita di AEE e RAEE dal 2010 al 2030.	27
Figura 13 - Volumi di RAEE dal 2010 al 2022.	28
Figura 14 - RAEE generati pro-capite nel mondo dal 2010 al 2022.	28
Figura 15 - Dati sui volumi globali di RAEE nel 2022.	28
Figura 16 - Composizione dei RAEE.	29
Figura 17 - Volumi delle categorie di RAEE prodotti nel 2022.	30
Figura 18- Volumi di RAEE generati nel 2022 nei diversi continenti.	30
Figura 19 - Volumi pro-capite di RAEE generati nel 2022 nei diversi continenti.	30
Figura 20 - Volumi delle categorie di RAEE prodotti nel 2022.	31
Figura 21 - Tasso di raccolta e riciclo delle categorie di RAEE nel 2022.	32
Figura 22 - Tasso di riciclo delle categorie di RAEE nel 2022.	32
Figura 23 - Quantità pro-capite di RAEE generati, raccolti e riciclati nel mondo nel 2022.	33
Figura 24 - Tasso di riciclo di RAEE delle aree europee nel 2022.	34
Figura 25 - Volumi di AEE immessi nel mercato italiano nel 2020-2022.	34
Figura 26 - Categorie di AEE immessi nel mercato italiano nel 2020-2022.	35
Figura 27 - Volume di RAEE gestiti in Italia nel 2023.	35
Figura 28 - Tipologia di RAEE raccolti in Italia nel 2023.	35
Figura 29 - Volumi di tipologie di RAEE raccolti in Italia nel 2023.	36

Commentato [SP2]: Da modificare con il numero di pagina corretto.

Figura 30 - Volumi di categorie di RAEE domestici raccolti in Italia nel 2023. ...36	36
Figura 31 - Volumi di categorie di RAEE professionali raccolti in Italia nel 2023.37	37
Figura 32 - Tasso di raccolta RAEE in Italia nel 2022.....37	37
Figura 33 - Rotte dei RAEE prodotti globalmente nel 2022.38	38
Figura 34 - Metodi di gestione dei RAEE nel mondo nel 2022.39	39
Figura 35 - Numero di Paesi con legislazioni, policy e regolamentazioni sulla gestione dei RAEE dal 2014 al 2023.39	39
Figura 36 - Numero di Paesi con policy e obiettivi nel 2023.40	40
Figura 37 - Gerarchia del trattamento dei RAEE.41	41
Figura 38 - Valore di mercato della gestione dei RAEE nel mondo dal 2022 al 2030.46	46
Figura 39 - Numero di impianti dichiarati in Italia nel 2023.....47	47
Figura 40 - Numero di attori per la gestione dei RAEE in Italia nel 2024.47	47
Figura 41 - Volumi di RAEE raccolti da Samsung dal 2018 al 2023.....48	48
Figura 42 - Volumi di RAEE raccolti da LG Electronics dal 2010 al 2022.49	49
Figura 43 - Volumi di RAEE raccolti da Asus dal 2020 al 2022.49	49
Figura 44 - Volumi di RAEE raccolti da HP dal 2016 al 2022.49	49
Figura 45 - Fatturato mondiale degli elettrodomestici dal 2019 al 2029.....52	52
Figura 46 - Volumi di vendite mondiali degli elettrodomestici dal 2019 al 2029.53	53
Figura 47 - Fatturato mondiale dei grandi elettrodomestici dal 2019 al 2029.....53	53
Figura 48 - Volumi di vendita dei grandi elettrodomestici nel mondo dal 2019 al 2029.54	54
Figura 49 - Principali aziende produttrici di elettrodomestici al mondo nel 2024.54	54
Figura 50 - Fatturato di Whirlpool dal 2008 al 2023.....55	55
Figura 51 - Fatturato di LG Electronics dal 2017 al 2024.55	55
Figura 52 - Fatturato di Miele dal 2006 al 2022.55	55
Figura 53 - Ciclo di vita dei RAEE.56	56
Figura 54 - Ciclo di vita dei RAEE nello scenario 1.57	57
Figura 55 - Ciclo di vita dei RAEE nello scenario 2.58	58
Figura 56 - Tipologie di componenti raccolti tramite la pratica di scavenging.....59	59
Figura 57 - Quantità di RAEE recuperabili persi a causa dello scavenging.....59	59

Figura 58 - Ciclo di vita dei RAEE nello scenario 3.	60
Figura 59 - Ciclo di vita dei RAEE nello scenario 4.	61
Figura 60- Fasi di pretrattamento dei RAEE.	65
Figura 61 - Riciclo della plastica nei RAEE.....	76
Figura 62 - Processo di trattamento delle apparecchiature di scambio termico. ...	80
Figura 63 - Composizione di un apparecchio di scambio termico.	84
Figura 64 - Componenti di un apparecchio di scambio termico.....	84
Figura 65 - Prezzi di mercato dei materiali critici nei RAEE nel 2022.	89
Figura 66 - Valore economico potenziale dei metalli nei RAEE.	91
Figura 67 - Bilancio economico del riciclo dei RAEE nel mondo.	93
Figura 68 - Premi erogati ai gestori dei centri di raccolta in Italia nel 2023.	94
Figura 69 - Valore perso dalla perdita causata dallo scavenging.	96
Figura 70 - Risorse recuperate dal riciclo di monitor e computer con il metodo LCA.	99

Indice delle tabelle

Tabella 1 - Materiali da cui è composto un frigorifero.....	19
Tabella 2 - Componenti di una lavatrice.....	20
Tabella 3 - Composizione dei materiali di una asciugatrice.....	23
Tabella 4 - Composizione materiali di una cappa aspirante.....	25
Tabella 5 - Volumi di RAEE generati, raccolti e riciclati in Europa nel 2010 e nel 2022.....	33
Tabella 6 - Composizione dei PCB.....	68

Commentato [SP3]: Da modificare con il numero di pagina corretto.

Introduzione

Negli ultimi decenni, l'innovazione tecnologica e la crescente diffusione di dispositivi elettronici hanno portato a un aumento esponenziale della quantità di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (AEE) immesse sul mercato. Di conseguenza, la produzione di Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) è diventata una delle sfide ambientali più rilevanti a livello globale.

Di fatti, gli apparecchi elettronici contengono materiali preziosi e rari (come l'oro, il rame, il litio) ma anche sostanze pericolose (piombo, mercurio) (Federica Cucchiella, 2015).

Riciclarli, dunque, non solo riduce la necessità di nuove risorse, l'impatto ambientale e limita i danni causati dallo smaltimento improprio, bensì rappresenta una vera e propria fonte di risorse economiche.

La maggior parte dei RAEE è costituita da comuni elettrodomestici, ovvero apparecchi per lo scambio termico quali frigoriferi, condizionatori e asciugatrici, e grandi apparecchiature quali lavatrici e lavastoviglie, con una produzione di più di 18 miliardi di kg nel mondo nel 2022 (Cornelis P. Baldé, 2024).

Gli elettrodomestici sono, infatti, fondamentali per la vita quotidiana ed è per questo che il loro mercato è in costante crescita con un valore totale stimato di circa 416 miliardi di \$ diviso fra frigoriferi, forni, lavatrici, lavastoviglie e condizionatori, con volumi che raggiungono i 770 milioni di pezzi nel 2024 (Home & household appliances, 2024).

Questi dispositivi contribuiscono in modo significativo al comfort domestico, ma rappresentano al contempo una grande sfida ambientale quando raggiungono la fine del loro ciclo di vita.

Data la rilevanza di tali apparecchiature, questo elaborato si propone, pertanto, di analizzare il sistema di gestione dei RAEE nel mondo, con particolare attenzione alle pratiche adottate nel trattamento degli elettrodomestici.

La prima sezione, a seguito dell'introduzione delle metodologie applicate per svolgere le analisi, presenta un'introduzione di cosa è l'Economia Circolare e dei principi alla base su cui si basano, conseguentemente, le pratiche di recupero e

riciclo dei rifiuti. Di conseguenza, vengono definiti le apparecchiature elettriche ed elettroniche, fra cui in particolare le principali tipologie di elettrodomestici e la loro composizione, i rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche e i corrispondenti volumi generati, nonché i volumi recuperati e riciclati nel mondo, con una particolare attenzione alle distribuzioni nei diversi Paesi e con uno specifico focus sull'Italia. Successivamente, viene introdotto il contesto gestionale e normativo che regola le corrette pratiche adoperate nei sistemi formali di gestione dei RAEE, con la conseguente spiegazione anche dei percorsi informali che questi possono seguire.

Infine, viene svolta un'analisi di mercato al fine di individuare il valore di mercato dei RAEE e il tessuto aziendale in Italia adibito ai processi di recupero, trattamento e riciclo.

Nella seconda sezione vengono definiti i processi, le tecnologie e le fasi di trattamento dei RAEE specifici per ciascuna tipologia di materiale, dalle fasi iniziali di raccolta fino al recupero e riutilizzo dei materiali, entrando nei dettagli dei processi di recupero dei metalli, dei circuiti stampati e della plastica che rappresentano la parte più rilevante dei RAEE in termini di volume ed economico al fine di poter definire i processi di recupero adottati per gli elettrodomestici.

A seguito viene, perciò, analizzato un chiaro esempio di trattamento dei più comuni elettrodomestici, fra cui un frigorifero.

Nella terza e ultima sezione viene presentata l'analisi condotta in ambito economico e ambientale, al fine di valutare l'effettiva convenienza dei processi di riciclo rispetto al classico trattamento in discarica, bilanciando ricavi, costi, emissioni prodotte ed emissioni evitate dei processi ricavati dall'analisi della letteratura e definiti nella sezione precedente.

Infine, viene brevemente introdotto lo strumento metodologico utilizzato per analizzare quantitativamente l'impatto ambientale delle apparecchiature elettroniche dalla nascita fino al loro fine vita, incluso i processi di trattamento per il recupero: il Life Cycle Assessment.

Data la rilevante presenza degli elettrodomestici, le analisi tecnologiche, economiche e ambientali sono state condotte entrando nei dettagli di tali apparecchiature al fine di valutarne l'effettiva convenienza delle procedure analizzate rispetto al comune trattamento in discarica.

1. Metodologia e contesto

1.1 Metodologia

Il presente elaborato si basa su un'analisi approfondita della letteratura esistente, con l'obiettivo di raccogliere, sintetizzare e confrontare le informazioni disponibili sul processo di trattamento, recupero e riciclo dei dispositivi elettrici ed elettronici. Il processo di ricerca e scrittura si è sviluppato attraverso diverse fasi, seguendo un approccio metodologico strutturato e progressivo.

In una prima fase, è stata effettuata una ricerca preliminare delle fonti, individuando testi accademici, articoli scientifici e pubblicazioni istituzionali rilevanti. A tal fine, sono state consultate banche dati specializzate, biblioteche digitali e siti ufficiali di enti di ricerca e organizzazioni di settore. Questa fase ha permesso di delineare un quadro generale sul tema dell'economia circolare, dei rifiuti elettrici ed elettronici e delle normative esistenti nel mondo e, più in particolare, in Europa.

Successivamente, è stata svolta un'analisi critica delle fonti selezionate, con particolare attenzione agli studi più recenti e alle pubblicazioni di maggiore rilevanza. Ogni documento è stato esaminato per comprenderne il contesto, la metodologia adottata dagli autori e i principali risultati emersi. Questa fase ha consentito di individuare le principali tipologie di trattamento dei materiali che vengono applicate, non solo nell'ambito generale dei dispositivi elettrici ed elettronici, ma soprattutto nel settore degli elettrodomestici.

In una terza fase, è stato effettuato un processo di organizzazione e sistematizzazione delle informazioni raccolte. Le fonti sono state categorizzate in base ai temi trattati e ai contributi offerti alla comprensione della problematica in esame. Questo ha permesso di strutturare il lavoro in modo logico e coerente, con l'obiettivo di raccogliere in un unico testo le diverse tipologie di pratiche adottate nel trattamento dei rifiuti, analizzando nel dettaglio quelle maggiormente impiegate nel settore degli elettrodomestici.

Infine, nella fase finale di redazione, i contenuti sono stati rielaborati in maniera critica e integrati in un discorso organico. L'obiettivo è stato quello di offrire una panoramica completa e strutturata dell'argomento, mettendo in evidenza gli aspetti riguardanti i bilanci economici e ambientali delle pratiche adottate, al fine di valutare l'effettiva convenienza dei processi impiegati rispetto al semplice

smaltimento. Tali bilanci sono stati eseguiti attingendo da fonti in letteratura riguardanti studi sul metodo Life Cycle Assessment e siti web in cui sono stati trovati l'andamento dei prezzi delle materie prime.

1.2 Economia circolare

Negli ultimi decenni è diventato argomento di crescente attenzione in tutto il mondo il concetto e modello di business dell'Economia Circolare (CE), con l'obiettivo di fornire un'alternativa sostenibile al modello di sviluppo economico dominante ai giorni d'oggi: il “*take, do, dispose*”, incentrato sull'acquisto, consumo e conseguente disfacimento degli oggetti.

Al contrario, invece, l'Economia Circolare promuove l'uso dei beni rispettando l'ambiente, attuando il principio dell'economia *Green*.

Il modello di sviluppo sostenibile dell'Economia Circolare richiede uno studio equilibrato degli aspetti economici, ambientali, tecnologici e sociali di tutti, o di un singolo, settore industriale e della loro interazione.

Nella CE, i processi e i prodotti vengono idealizzati e realizzati con l'obiettivo di massimizzare il valore delle risorse utilizzate, sfruttandole al massimo delle loro potenzialità economiche.

Sono evidenti, infatti, i principali benefici della CE: economici, ambientali e per la salute pubblica.

È necessario, tuttavia, sottolineare che il concetto di Economia Circolare non indica il riciclo al 100% dei beni. I benefici del riciclo diminuiscono fino al raggiungimento di un punto limite oltre il quale questo diventa troppo costoso sia dal punto di vista ambientale, che economico, per poter fornire un beneficio.

Infatti, in linea con le leggi dell'entropia, è impossibile per un sistema economico essere totalmente circolare, con prodotti ed energia che ritornano alle condizioni iniziali per sempre.

1.2.1 Principi dell'Economia Circolare

L'Economia Circolare si fonda su tre principi fondamentali identificati dalle 3R: riduzione, riutilizzo e riciclo (Patrizia Ghisellini, 2015).

- Riduzione

Il principio di riduzione si basa sull'eco-efficienza, con l'obiettivo di ridurre al minimo l'utilizzo di energia, materie prime e rifiuti attraverso il miglioramento dell'efficienza dei processi produttivi e di consumo. Tale principio è applicabile, ad esempio, tramite l'introduzione di tecnologie produttive innovative, o la realizzazione di prodotti più leggeri compatti ed efficienti, o ancora di imballaggi semplificati.

- Riutilizzo

Il principio di riutilizzo viene definito dalla Direttiva 2008/98/CE come “qualsiasi operazione mediante la quale prodotti o componenti che non sono rifiuti vengono riutilizzati per lo stesso scopo per cui sono stati concepiti” (Direttiva 2008/98/CE , 2008). Il riutilizzo dei prodotti permette di ottenere importanti benefici ambientali, richiedendo meno risorse, energia, materie prime e lavoro, rispetto alla produzione di nuovi prodotti, al riciclo o allo smaltimento degli stessi. Risulta, infatti, evidente come il riutilizzo riduca l'impatto ambientale, evitando l'emissione di sostanze nocive normalmente prodotte dai processi di ricircolo e smaltimento dei rifiuti.

Negli ultimi decenni la diffusione del riutilizzo ha generato, da un lato, un aumento della domanda dei consumatori per prodotti rigenerati e, dall'altro, dell'offerta di prodotti durevoli per più cicli di utilizzo grazie, anche, alla presenza di incentivi per le aziende alla vendita di prodotti rigenerati.

- Riciclo

Come il riutilizzo, nella Direttiva 2008/98/CE viene definito il principio di riciclo come “qualsiasi operazione di recupero mediante la quale i materiali di scarto vengono rielaborati in prodotti, materiali o sostanze sia per scopi originali che per altri scopi. Include il ritrattamento di materiale organico, ma non include il recupero di energia e il ritrattamento in materiali da utilizzare come combustibili o per operazioni di riempimento” (Direttiva 2008/98/CE , 2008).

Il riciclo consiste, pertanto, nel trattamento dei rifiuti al fine di estrarne risorse ancora utilizzabili, in modo tale da ridurre il volume di rifiuti che verranno trattati e smaltiti.

Nei capitoli a seguire verrà analizzata l’effettiva convenienza economica ed ambientale. Infatti, è importante dichiarare che il riciclo potrebbe rappresentare la soluzione meno sostenibile rispetto ai principi della CE visti (riduzione e riutilizzo), soprattutto in termini di efficienza delle risorse e dei processi industriali che ne implica.

I limiti del processo di riciclo sono molteplici, quali, ad esempio: il numero limitato di volte che un materiale può essere riciclato; il volume ridotto di alcune materie prime, come i metalli delle terre rare, che rende difficile sviluppare le economie di scala necessarie a rendere il processo sostenibile; o, ancora, l’impossibilità per alcuni materiali di essere riciclati a causa di contaminazioni come l’inchiostro.

A questi tre principi fondamentali si affiancano pratiche fondamentali da seguire per implementare il modello della CE (Patrizia Ghisellini, 2015). La prima è rappresentata dall’importanza, in fase di progettazione, dello studio di un design appropriato dei prodotti, in modo tale da garantire soluzioni progettate alla nascita per il ciclo di riutilizzo, favorendone il facile smontaggio. Tale pratica viene anche definita eco-design, o design verde. La seconda si basa, invece, sulla distinzione dei materiali in due categorie: i materiali cosiddetti “tecnici”, quali metalli e materie plastiche, che vengono progettati per poter essere riutilizzati alla fine del ciclo di vita del prodotto; e i materiali “nutrienti o biologici”, che possono tornare in sicurezza alla biosfera perché non tossici.

Infine, la terza pratica, di maggiore importanza per la CE, consiste nell'utilizzo di fonti di energia rinnovabili per i processi sopra elencati, al fine di ridurre l'utilizzo e la dipendenza da fonti di energia fossili, cause principali degli effetti negativi per l'ambiente e la salute umana.

Le pratiche descritte rappresentano le strategie principali da seguire per perseguire gli obiettivi dell'Economia Circolare.

1.2.2 Cleaner Production

L'eco-design descritto nel paragrafo §1.1 è strettamente correlato al concetto di *Cleaner Production* (CP). La CP, come suggerito dal nome stesso, rappresenta prodotti, processi e servizi più puliti, con l'obiettivo di minimizzare il flusso di rifiuti, l'utilizzo di materie prime non rinnovabili e dannose e le emissioni.

La Cleaner Production, o produzione più pulita, include pratiche essenziali da attuare per il raggiungimento degli obiettivi della CE, attuando strategie preventive. Fra queste vi è la prevenzione all'inquinamento, la riduzione di materiali tossici e la progettazione per l'ambiente.

L'eco-design e la progettazione per l'ambiente rappresentano pratiche che pongono alla base dell'ideazione e progettazione dei prodotti aspetti ambientali, con l'obiettivo di migliorarne le prestazioni ambientali durante tutto il loro ciclo di vita. La fase di progettazione è fondamentale nel contesto della CE, in quanto la sostenibilità del prodotto è frutto delle scelte fatte in tale fase. Infatti, la scelta, ad esempio, di ridurre particolari sostanze tossiche potrebbe comportare un aumento del consumo di energia, causando così un impatto netto negativo sull'ambiente. Il fine ultimo è quello di bilanciare le decisioni progettuali in modo tale da avere un beneficio netto in termini ambientali. Ma le decisioni non si basano solo sulla scelta dei materiali, bensì anche sulla struttura dei prodotti, puntando alla realizzazione di beni facili da smontare e distribuire e durevoli.

2. Apparecchiature elettriche ed elettroniche

Con apparecchiature elettriche ed elettroniche (AEE) ci si riferisce a tutti i prodotti con circuiti o componenti elettrici e un alimentatore o batteria (Cornelis P. Baldé, 2024). Gli AEE comprendono una vastissima varietà di prodotti, quali elettrodomestici, telefoni cellulari, televisioni e computer; ciascuno con la propria forma di smaltimento e riciclo, ma tutti causa di danni all'ambiente e alla salute umana se non smaltiti correttamente e in modo ecologico.

Per poter parlare dei rifiuti derivanti da tali apparecchiature è innanzitutto necessario definire cosa non appartiene alle apparecchiature elettriche ed elettroniche. Le batterie e altri dispositivi di accumulo di elettricità non vi appartengono, ma vengono, bensì, trattati come flussi di rifiuti separati in quanto necessitano di un diverso trattamento di fine vita (Cornelis P. Baldé, 2024).

Un altro esempio sono gli AEE installati in automobili, poiché mancanti di funzionalità come dispositivo autonomo, ma funzionanti solo come parte dell'interno sistema.

La figura 1 mostra alcuni esempi di cosa non rientra all'interno degli AEE.



Figura 1 - Cosa non rientra negli AEE (Cornelis P. Baldé, 2024).

2.1 Apparecchiature elettriche ed elettroniche usate

Le apparecchiature elettriche ed elettroniche, una volta che il proprietario decide di disfarsene, prima di divenire rifiuti possono intraprendere un'altra strada: il mercato dell'usato, prendendo il nome di apparecchiature elettriche ed elettroniche usate (*"Used Electrical and Electronic Equipment"*, UEEE) (Zahra Ansari Cheshmeh, 2023). La rivendita di prodotti non più utilizzati è, infatti, una pratica sempre più diffusa anche nel mercato degli apparecchi elettrici ed elettronici. Tali apparecchiature non vengono considerate rifiuti, in quanto possono essere rivendute funzionanti o con qualche componente che, invece, richiede di essere sostituito o riparato per poter funzionare correttamente. La pratica del riuso, è bene ricordare come già detto nel paragrafo §1.1, garantisce il minor impatto ambientale, inferiore anche al riciclo delle materie prime contenute nei prodotti.

Con l'avanzare delle tecnologie, il volume delle apparecchiature usate cresce sempre di più a causa dei cambiamenti tecnologici e della presenza costante di nuovi prodotti sul mercato. In questo contesto, utilizzare apparecchiature elettriche ed elettroniche di seconda mano, prolungando il loro ciclo di vita, aiuta fortemente a raggiungere gli obiettivi previsti dall'economia circolare.

Tali apparecchiature, inoltre, essendo ancora funzionanti, non hanno solo benefici ambientali, ma anche economici, possedendo ancora un valore intrinseco che, gettandoli, andrebbe perso.



Figura 2 - Ciclo di vita delle AEE (Zahra Ansari Cheshmeh, 2023).

Con il progresso tecnologico, le apparecchiature elettriche ed elettroniche si stanno evolvendo rapidamente, anche a causa dei rapidi cambiamenti nelle tendenze del mercato. Questo comporta difficoltà sempre crescenti nel rivendere e dare una seconda vita a tali dispositivi prediligendo, invece, il rilascio sul mercato di nuovi modelli e versioni o, in via estrema, l'abbandono di alcuni prodotti perché non più desiderabili dai clienti a causa della mancanza di nuove funzionalità.

Un'apparecchiatura elettrica ed elettronica diventa un rifiuto quando il proprietario intende buttarlo o è tenuto a doverlo fare.

Seppur sia difficile definire con chiarezza quando un dispositivo usato sia da smaltire, esistono dei criteri generali per poter considerarlo un rifiuto (Zahra Ansari Cheshmeh, 2023):

- Il prodotto è incompleto;
- Mancano parti essenziali nel prodotto;
- Dimostra danni fisici che portano a una compromissione della sua sicurezza o funzionalità;
- L'imballaggio è insufficiente per evitare danni durante le procedure di spedizione e carico e scarico;
- L'aspetto dell'articolo è spesso consumato o danneggiato, abbassando la sua commerciabilità;
- I suoi componenti contengono cose vietate dalla legge nazionale o comunitaria o dovrebbero essere scartate (ad esempio, CFC, PCB, amianto);
- Non esiste un mercato stabilito per gli EEE di seconda mano;
- È un EEE usato e non aggiornato che verrà cannibalizzato (per ottenere pezzi di ricambio).

2.2 Rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche

Le apparecchiature elettriche ed elettroniche diventano rifiuti, o anche detti RAEE, quando vengono gettati dal proprietario senza l'intento di riutilizzarli, perdendo del tutto la loro funzionalità.

La definizione di RAEE viene data dall'art. 4 lettera e del D. Lgs. 49/2014: *“Le apparecchiature elettriche o elettroniche che sono rifiuti ai sensi dell'articolo 183, comma 1, lettera a) del D. Lgs. 3 aprile 2006, n. 152, inclusi tutti i componenti, sottoinsiemi e materiali di consumo che sono parte integrante del prodotto al momento in cui il detentore si disfi, abbia l'intenzione o l'obbligo di disfarsene”* (Art. 4 lettera e del D. Lgs. 49/2014, 2014).

I RAEE vengono distinti in due categorie: domestici e professionali.

2.2.1 RAEE domestici

I RAEE domestici sono i rifiuti elettronici generati all'interno del nucleo domestico, inclusi i rifiuti di origine diversa da quella domestica che, per natura e quantità, risultano analoghi a quelli domestici.

I RAEE domestici vengono suddivisi in 5 categorie ai sensi del decreto legislativo 25 settembre 2007, n.185 (DM 185, 2007, 2007):

1. Apparecchiature per lo scambio di temperatura con fluidi, o categoria R1
2. Altri grandi elettrodomestici, o categoria R2
3. TV e Monitor, o categoria R3
4. Apparecchiature IT, o categoria R4
5. Sorgenti luminose, o categoria R5

La Figura 2 mostra la classificazione dei RAEE domestici.



Figura 3 - Classificazione RAEE domestici (www.cdcræe.it, 2024).

In particolare, le principali tipologie di RAEE appartenenti alla categoria R1 sono: frigoriferi, caloriferi, apparecchi che distribuiscono automaticamente prodotti freddi, condizionatori, deumidificatori, pompe di calore, radiatori a olio e asciugatrici con pompa di calore.

La categoria R2 comprende lavatrici, lavastoviglie e apparecchi di cottura.

Alla categoria R3 appartengono, invece, televisori, schermi, monitor, laptop e notebook.

Fanno parte della categoria R4 frullatori, friggitorici, cellulari, fax, sigarette elettroniche, forni a microonde e macchinette del caffè.

Infine, un esempio di apparecchiature della categoria R5 sono le luci LED e lampade fluorescenti (Centro di coordinamento RAEE, 2024).

Commentato [SP4]: Non va bene la dicitura sd nelle reference. Bisogna sempre indicare l'anno. Nel testo (e anche in molte immagini) compare spesso. Cerca di aggiungere a tutti i riferimenti l'anno (ricontrolla tutta la tesi).

La Figura 3 mostra, invece, le sub-categorie dei RAEE domestici.

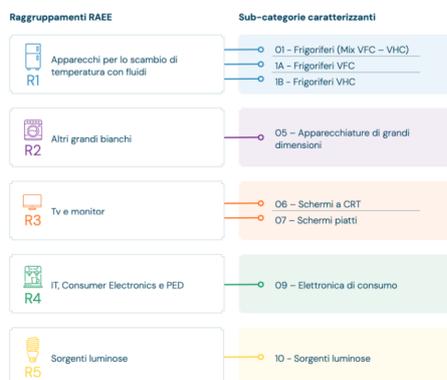


Figura 4 - Sub-categorie di RAEE domestici (www.cdcræe.it, 2024).

2.2.2 RAEE professionali

I RAEE professionali sono, invece, i rifiuti elettronici di provenienza diversa da quella domestica.

Anch'essi sono classificati in sei categorie:

1. Apparecchiatura per lo scambio di temperatura
2. Schermi e monitor
3. Lampade
4. Apparecchiature di grandi dimensioni
5. Apparecchiature di piccole dimensioni
6. Piccole apparecchiature informatiche e per le telecomunicazioni

La figura 4 mostra la classificazione dei RAEE professionali.



Figura 5 - Classificazione RAEE professionali (www.cdcræe.it, 2024).

2.2.3 Composizione dei RAEE

I rifiuti di apparecchi elettrici ed elettronici sono composti sia da materiali pericolosi, che da materiali preziosi. La loro composizione varia a seconda della tipologia di prodotto, ma tutti contengono plastica, metalli preziosi e comuni.

In media, circa il 27% del peso totale dei RAEE è attribuito alla plastica composta da più di 15 diversi tipi di materie plastiche, tra cui polistirene, miscele di policarbonato, polistirene ad alto impatto e polipropilene.

Oltre alla plastica, circa il 50% dei rifiuti è composto da metalli comuni, preziosi e pesanti.

Infine, la restante parte pari al 23% circa è costituita da gomma, legno, ceramica e vetro (Cornelis P. Baldé, 2024).

Data la composizione dei RAEE, risulta evidente come il riciclo e riutilizzo di alcune delle materie prime contenute consenta un guadagno, non solo in termini ambientali, ma anche economici.

Visti gli obiettivi posti dell'elaborato vengono di seguito introdotte le composizioni dei principali elettrodomestici, al fine di conoscerne i materiali e, in seguito, poterne spiegare i processi di trattamento impiegati.

2.2.3.1 Il frigorifero – funzionamento e componenti

Il frigorifero appartiene alla categoria delle apparecchiature di scambio termico, il cui principio di funzionamento è pressoché simile. Viene, quindi, introdotto il frigorifero come esempio chiave di tale categoria.

Il frigorifero è una macchina termica che consente di mantenere al fresco i cibi mediante i principi della termodinamica di sottrazione del calore e l'utilizzo di fluidi refrigeranti che raffreddano le cavità dell'apparecchiatura.

I componenti dei comuni frigoriferi fondamentali per il ciclo di raffreddamento sono quattro (www.cdcaee.it, 2024):

1. Il condensatore, o anche detto serpentina, che serve a rinfrescare il fluido refrigerante;
2. L'evaporatore, una seconda serpentina, che si trova all'interno del frigorifero e in cui il fluido svolge la sua funzione di raffreddamento delle cavità del frigorifero;
3. La valvola di espansione, vicina all'evaporatore;
4. Infine, il compressore.

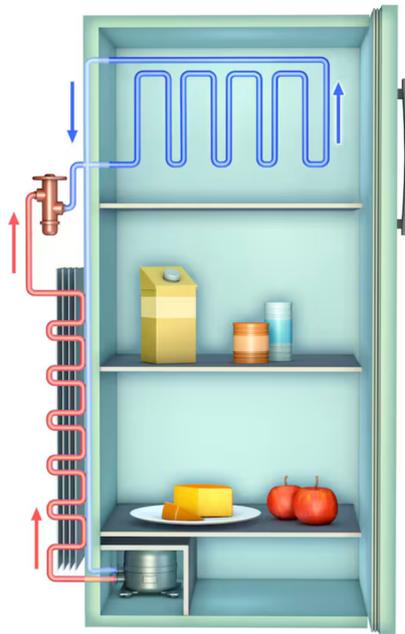


Figura 6 - Composizione di un frigorifero (www.cdcaee.it, 2024).

Il principio di funzionamento si basa sui principi della termodinamica: all'accensione il compressore si mette in moto aumentando la pressione del fluido refrigerante e, di conseguenza, secondo la legge di Gay Lussac, aumentandone anche la temperatura. Aumentando la pressione, infatti, le molecole aumenteranno il loro movimento, urtandosi e, quindi, innalzando la loro temperatura.

In uscita dal compressore il fluido entra nel condensatore. Qui, entrando a contatto con l'aria esterna, il fluido cede calore in una prima fase di pre-raffreddamento.

Successivamente, entra nella valvola ad espansione in cui avviene il processo inverso: il fluido si espande, diminuendo la pressione e, così, la temperatura.

Infine, passa dentro l'evaporatore, in cui il fluido evapora assorbendo calore dal sistema da raffreddare.

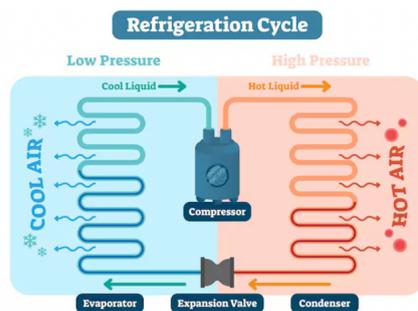


Figura 7 - Processo di funzionamento dei frigoriferi (www.cdcrree.it, 2024).

I diversi componenti elencati sono situati all'interno della carcassa, costituita prevalentemente da poliuretano, che consente l'isolamento fra l'interno del frigorifero e l'ambiente esterno. All'interno della carcassa si trovano, oltre ai componenti precedentemente elencati, quali l'evaporatore, il condensatore, il compressore e la valvola di espansione, anche la porta, lampadine, vani portaoggetti e gocciolatoi.

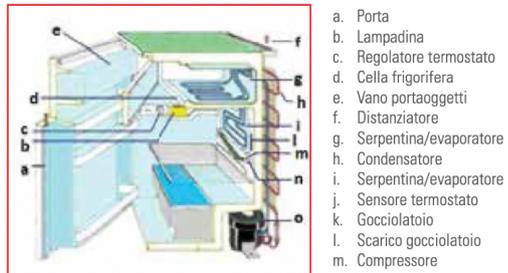


Figura 8 - Carcassa di un frigorifero (www.cdcræe.it, 2024).

Nel complesso, un frigorifero è composto dal 47,2% da ferro, 5,1% da alluminio e rame, 10,5% da plastica e 15,3% da poliuretano.

MATERIALE	%
Ferro	47,2
Compressore	21,0
Al e Cu	5,1
Plastica	10,5
PU	15,3
Altro	0,3
CFC	0,6

Tabella 1- Materiali da cui è composto un frigorifero (www.cdcræe.it, 2024).

La parte principale in termini di peso di un frigorifero è costituita dal compressore. Il compressore è composto a sua volta da ferro, alluminio e rame. Al suo interno si trova il fluido refrigerante.

2.2.3.2 La lavatrice – funzionamento e componenti

La lavatrice è un elettrodomestico impiegato per il lavaggio di indumenti e biancheria e appartiene alla categoria dei grandi elettrodomestici ed è costituita da una struttura in ferro e plastica (www.cdcræe.it, 2024). Le lavatrici si classificano in due categorie: quelle a carico frontale, dotate di oblò in vetro, e a carico dall'alto, che non contengono vetro.

I principali componenti di una lavatrice sono i seguenti:

- Timer meccanico;
- Selettore dei programmi;
- Schede elettroniche a supporto dei display LCD;
- Elettrovalvola di scarico dell'acqua;
- Cassetto del detersivo;
- Cestello e vasca;
- Motore per la rotazione del cestello, solitamente un motore elettrico trifase con inverter;
- Puleggia in alluminio;
- Contrappeso in cemento o ghisa;
- Resistenza per il riscaldamento dell'acqua;
- Pompa di scarico;
- Tubi di carico e scarico dell'acqua
- Condensatore;
- Cablaggi;
- Guarnizioni in gomma.

Materiale	%	kg/pz
Ferro	37,2%	24,2
Plastiche	13,4%	8,7
Cemento	33,5%	21,8
Motore	10,1%	6,6
Alluminio e Rame	1,9%	1,2
Cavi	0,7%	0,4
Vetro	1,1%	0,7
Altri materiali	2,1%	1,4
Totale	100,0%	65,0

Tabella 2 - Componenti di una lavatrice (www.cdcræe.it, 2024).

I componenti critici, soprattutto in materia di trattamento e riciclo dei rifiuti, sono i condensatori, le schede elettroniche di dimensioni che superano anche i 10 cm², il cemento di cui è composto il contrappeso, i cavi che devono essere rimossi e gestiti separatamente e le plastiche.

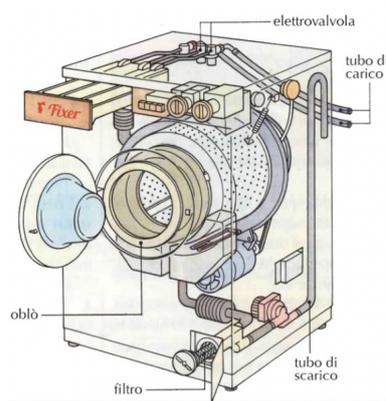


Figura 9 - Composizione di una lavatrice (www.cdcaee.it, 2024).

Le fasi tipiche di un programma svolto dalla lavatrice sono:

1. Ammollo
2. Lavaggio
3. Risciacquo
4. Centrifuga

Entrando nei dettagli, durante la fase di ammollo il cestello all'interno del quale si trovano gli indumenti viene riempito con acqua molto calda che entra dal tubo di carico e viene riscaldata dai resistori raggiungendo temperature che possono toccare anche i 90°C. Una volta caricata l'acqua il cestello incomincia a girare grazie al motore presente.

Si passa così alla fase di lavaggio in cui viene disciolto il detersivo e gli indumenti vengono lavati grazie al movimento alternato del cestello. Una volta terminato il lavaggio l'acqua sporca viene scaricata attraverso il tubo di scarico, mentre il cestello viene riempito nuovamente di acqua pulita attraverso il tubo di carico per effettuare la fase di risciacquo.

Infine, vi è la fase di centrifuga durante la quale il cestello ruota ad alte velocità toccando anche i 1.000 giri/min.

2.2.3.3 *L'asciugatrice – funzionamento e componenti*

L'asciugatrice appartiene anch'essa alla categoria dei grandi elettrodomestici ed è utilizzata per asciugare indumenti e biancheria unendo la forza centrifuga e il calore (www.cdcrace.it, 2024). A seconda del metodo impiegato le asciugatrici si possono classificare in modelli:

- a espulsione o a ventilazione per i modelli più vecchi dotati di un tubo di scarico connesso alla rete idrica;
- a centrifuga
- a serpentina o resistenza elettrica
- a pompa di calore
- a gas
- a compressione
- lavasciuga

Le asciugatrici a serpentina sono le più comuni in Italia e generano calore prelevando aria dall'ambiente e riscaldandolo mediante l'utilizzo di una resistenza elettrica posta sul retro del dispositivo. Il calore prodotto viene convogliato all'interno del cestello per mezzo di una ventola. L'aria umida generata viene condensata in acqua e scaricata.

Le asciugatrici a pompa di calore, invece, consentono un notevole risparmio energetico, in quanto il calore generato passa attraverso una pompa dove, da una parte il vapore acqueo viene condensato ed espulso; mentre, dall'altra, l'aria viene nuovamente riscaldata per un ulteriore utilizzo, consentendo così di riutilizzare il calore prodotto.

I modelli a gas, ancora, impiegano un bruciatore a gas metano per il riscaldamento dell'aria, per cui è richiesto che l'elettrodomestico sia collegato alla rete del gas.

Le asciugatrici a compressione, infine, fondano il loro funzionamento sul principio della compressione meccanica del vapore generato dal riscaldamento dell'acqua contenuta negli indumenti.

Nonostante i diversi modelli di asciugatrici, i componenti principali sono pressoché gli stessi.

Il motore elettrico è il componente principale essendo il responsabile della rotazione del cestello e dell'attivazione delle ventole che ne diffondono il calore all'interno e consentono il ricircolo dell'aria. L'avviamento del motore elettrico è consentito da un condensatore.

Componente	% media
Motori	11.7%
Condensatori	0.7%
Schede Elettroniche	1.8%
Metalli Ferrosi	58.6%
Alluminio	2%
Altri metalli non ferrosi	1.1%
Vetro	1.2%
Plastiche miste	21.6%
Scarti a smaltimento	1.3%
Totale	100%

Tabella 3 - Composizione dei materiali di una asciugatrice (www.cdcræe.it, 2024).

2.2.3.4 Il piano cottura – funzionamento e componenti

Il piano cottura appartiene, così come gli elettrodomestici visti, alla categoria dei grandi elettrodomestici (www.cdcræe.it, 2024).

Attualmente esistono due categorie di piani cottura: a gas e a induzione. In particolare, i piani a induzione si scaldano attraverso l'utilizzo della corrente elettrica che scorre attraverso una resistenza di forma circolare, situata sotto al piano cottura. Il calore generato scalda prima il piano cottura e poi, per trasmissione, le pentole posizionate al di sopra.

I piani cottura a gas, invece, scaldano grazie ad una fiamma innescata in maniera istantanea tramite una scintilla.

Oltre alla differenza sostanziale alla base del funzionamento delle due tipologie, i due piani cottura differiscono anche per i componenti al loro interno. Infatti, i piani a induzione sono costituiti da piani in materiale vetroceramico; mentre i piani a gas in acciaio. Da questo deriva, chiaramente, un diverso processo di lavorazione per il recupero e riciclo dei materiali.

Oltre a queste differenze, entrambe le tipologie sono dotate di schede elettroniche e circuiti stampati (PCB), plastiche e cavi elettrici.

2.2.3.5 Il microonde – funzionamento e componenti

Il microonde, anch'esso facente parte dei grandi elettrodomestici, è un dispositivo che cucina e scalda cibi sfruttando l'energia generata dai campi elettromagnetici emessi nello spettro delle microonde (www.cdcræe.it, 2024).

I comuni microonde sono composti da:

- Un magnetron, ovvero una valvola termoionica ad alta potenza che ha la funzione di produrre le microonde, all'interno del quale vi è un catodo realizzato in filo di tungsteno;
- Un circuito elettrico che alimenta il magnetron;
- Una guida d'onda, un tubo metallico in materiale plastico
- La camera di cottura, cioè la gabbia di cottura che impedisce alle microonde di fuoriuscire isolando l'ambiente interno, realizzato in metallo;
- Il portello del forno in vetro;
- Ventole di raffreddamento;
- Lampadine;
- Vassoi in vetro;
- Monitor;
- Filtri;
- Condensatori;
- Schede elettriche;
- Guarnizioni isolanti.

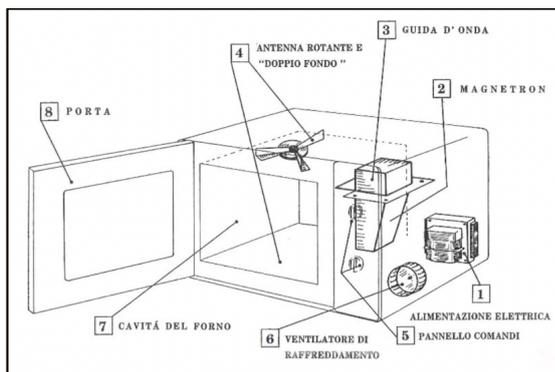


Figura 10 - Composizione di un microonde (www.cdcræe.it, 2024).

2.2.3.6 La cappa aspirante – funzionamento e componenti

La cappa aspirante è un elettrodomestico la cui funzione risiede nell'eliminare i fumi, i vapori e gli odori generati dalla cottura dei cibi (www.cdcræe.it, 2024). Le cappe ad uso domestico si possono classificare in due categorie:

1. Cappa aspirante, nella quale l'aria viene convogliata dalla cucina all'esterno mediante un condotto detto camino;
2. Cappa filtrante, che aspira l'aria, la filtra e la rimette in circolo in cucina ma entrambe vengono realizzate con gli stessi materiali, principalmente in acciaio inox, vetro temperato, ferro laccato e bronzo e sono composte dagli stessi elementi:
 - Il camino, che copre il condotto di aspirazione dei fumi;
 - Il gruppo di illuminazione, tipicamente con lampade a neon o LED e con uno schermo protettivo in vetro;
 - Il motore di aspirazione;
 - Il gruppo di comando per accendere e spegnere l'illuminazione;
 - Il gruppo di comando dell'aspirazione per regolare la velocità di aspirazione e selezionare le diverse funzioni;
 - La scocca, che contiene le parti funzionali della cappa;
 - Il foro di uscita dei fumi;
 - Il sistema di filtraggio, composto da filtri antigrasso in metallo o materiale sintetico e filtri anti-odore in carboni attivi, che trattengono i grassi e i vapori derivanti dalla cottura.

Componenti medie cappa aspirante	Kg 10	%
FERRO	2,93	29
VETRO TEMPERATO	1,50	15
ACCIAIO INOX	1,75	18
MOTORE	1,02	10
PLASTICA MACINATA	2,24	22
CAVI	0,05	0,5
SCHEDE	0,02	0,2
FILTRI A CARBONI ATTIVI	0,04	0,4
ALLUMINIO	0,33	3,3
PLASTICA PP	0,08	0,8
SORGENTI LUMINOSE	0,01	0,1

Tabella 4 - Composizione materiali di una cappa aspirante (www.cdcræe.it, 2024).

2.2.3.7 L'aspirapolvere – funzionamento e componenti

L'aspirapolvere è un apparecchio elettrico per le pulizie degli ambienti mediante un motore che aspira la polvere dai pavimenti. I comuni aspirapolvere sono composti da (www.cdcræe.it, 2024):

- Un motore elettrico;
- Un trasformatore;
- Un filtro;
- Un vano contenitivo, per contenere ciò che viene aspirato;
- Una scheda elettronica;
- Tubi ed elementi di collegamento.

Nel complesso i materiali maggiormente utilizzati sono ferro, rame, plastica, alluminio e gomma.

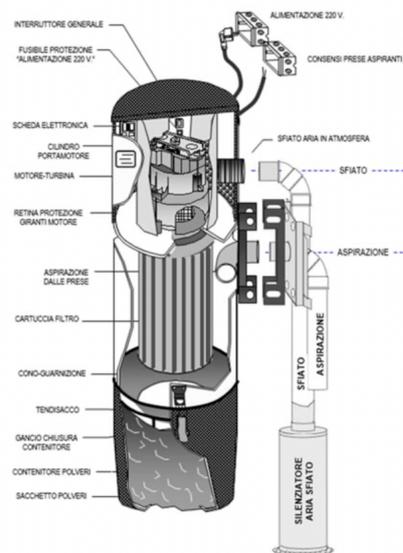


Figura 11 - Componenti di un'aspirapolvere (www.cdcræe.it, 2024).

Il principio di funzionamento di un'aspirapolvere è molto semplice: il motore elettrico mette in moto una ventola che, girando ad alta velocità, crea una fore depressione il cui risucchio consente di aspirare lo sporco che, passando attraverso i tubi di collegamento, verrà raccolto nel vano contenitivo (www.cdcræe.it, 2024).

2.3 Volumi di RAEE

Il mondo sta attraversando un'importante fase di elettrificazione, accompagnata da una trasformazione digitale che sta rivoluzionando il nostro modo di vivere, lavorare, apprendere, interagire socialmente e condurre attività commerciali. Sempre più persone possiedono e utilizzano diversi dispositivi elettronici, mentre la crescente connessione tra le aree urbane e remote ha fatto aumentare il numero di dispositivi e oggetti collegati a Internet.

In questo contesto la quantità di AEE immessi nel mercato a livello globale è cresciuta da 62 miliardi di kg nel 2010 a 96 miliardi di kg nel 2022 ed è prevista un aumento del volume fino a 120 miliardi di kg nel 2030 (Electronic waste worldwide, 2024).

Alla crescita di apparecchi elettrici ed elettronici corrisponde un'analogica crescita dei rifiuti, contenenti sia materiali pericolosi che preziosi.

Negli ultimi decenni i rifiuti da apparecchi elettrici ed elettronici hanno avuto uno sviluppo esponenziale, passando da un volume pari a 34 miliardi di kg nel 2010 a 62 miliardi di kg nel 2022, equivalente ad un valore medio di 7,8 kg pro-capite.

Allo stesso modo è cresciuto anche il tasso di raccolta formale e riciclo dei RAEE, aumentando da 8 miliardi di kg nel 2010 a 13,8 miliardi di kg nel 2022, circa 1,7 kg pro-capite (pari al 22,3% dei RAEE totali) (Cornelis P. Baldé, 2024).

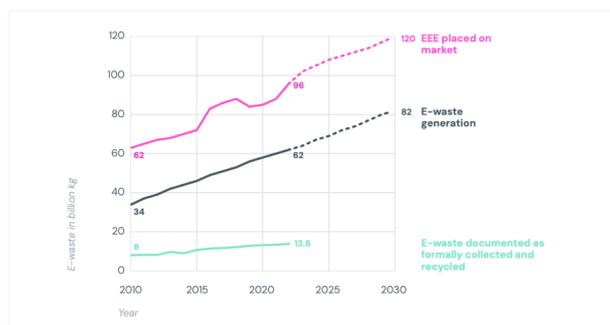


Figura 12 - Crescita di AEE e RAEE dal 2010 al 2030 (Cornelis P. Baldé, 2024).

Electronic waste generated worldwide from 2010 to 2022 (in million metric tons)

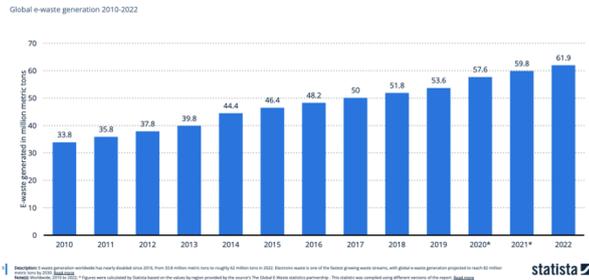


Figura 13 - Volumi di RAEE dal 2010 al 2022 (Electronic waste worldwide, 2024).

Per capita electronic waste generation worldwide from 2010 to 2022 (in kilograms)

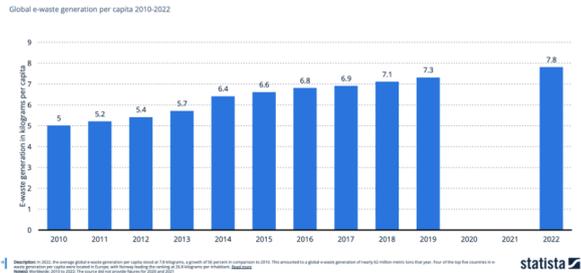


Figura 14 - RAEE generati pro-capite nel mondo dal 2010 al 2022 (Electronic waste worldwide, 2024).



Figura 15 - Dati sui volumi globali di RAEE nel 2022 (Cornelis P. Baldé, 2024).

I dati evidenziati mostrano come il tasso di crescita dei RAEE sia circa 5 volte maggiore del tasso di crescita del riciclo formale, principalmente spinti dal progresso tecnologico, dal consumo elevato di AEE, dalla crescente elettronicazione dei prodotti e dai ridotti cicli di vita degli stessi.

La figura 16 descrive la composizione dei RAEE a livello globale nel 2022, mostrando la quantità di risorse presenti al loro interno.

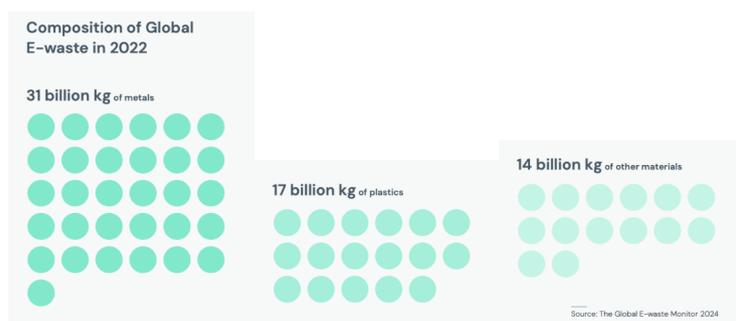


Figura 16 - Composizione dei RAEE (Cornelis P. Baldé, 2024).

Dati i 62 miliardi di kg di RAEE generati nel 2022, 31 miliardi di kg sono composti dai metalli, 17 miliardi di kg da plastica e i restanti 14 miliardi da altri materiali quali gomma, ceramica e vetro (Cornelis P. Baldé, 2024).

La maggioranza di rifiuti, pari a quasi un terzo del totale, appartiene alla categoria dei piccoli apparecchi elettronici quali, ad esempio, forni a microonde, sigarette elettroniche e giocattoli, per un totale di 20,4 miliardi di kg nel 2022. A seguire vi sono i grandi elettrodomestici, pari a 15,1 miliardi di kg; gli apparecchi per lo scambio di temperatura per 13,3 miliardi di kg; gli schermi e i monitor, con un volume di 5,9 miliardi di kg; le piccole apparecchiature IT con un peso di 4,9 miliardi di kg; le sorgenti luminose pari a 1,9 miliardi di kg e, infine, i pannelli fotovoltaici, con un peso pari a 0,6 miliardi di kg (Cornelis P. Baldé, 2024).

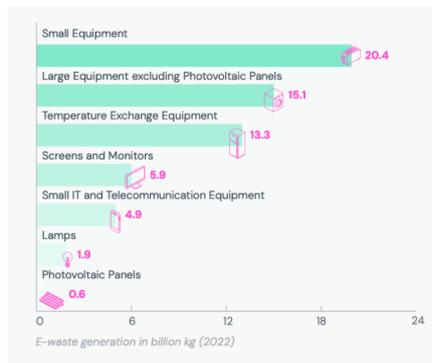


Figura 17 - Volumi delle categorie di RAEE prodotti nel 2022 (Cornelis P. Baldé, 2024).

È importante sottolineare come i volumi di RAEE generati vari nei diversi continenti, così come il loro tasso di raccolta e riciclo.

Nel 2022, infatti, sono stati registrati 30,1 miliardi di kg di RAEE prodotti in Asia, generando quasi la metà dei RAEE globali; 14,4 miliardi di kg in America; 13,3 miliardi di kg in Europa; 3,6 miliardi di kg in Africa e 0,7 miliardi di kg in Oceania (Electronic waste worldwide, 2024).

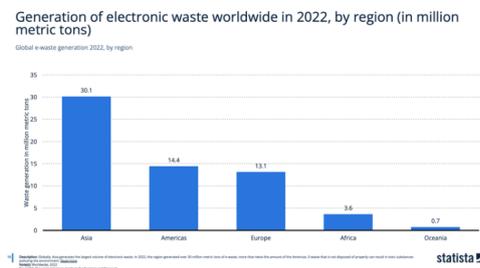


Figura 18- Volumi di RAEE generati nel 2022 nei diversi continenti (Electronic waste worldwide, 2024).

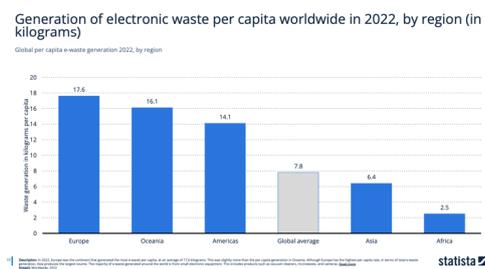


Figura 19 - Volumi pro-capite di RAEE generati nel 2022 nei diversi continenti (Electronic waste worldwide, 2024).

2.3.1 Raccolta dei RAEE

Prima di introdurre l'argomento è bene fare una doverosa precisazione: i dati che verranno esposti nei capitoli a seguire riguardano la raccolta formale dei RAEE, ovvero la gestione controllata di questi secondo le normative in vigore. Purtroppo, tuttavia, ancora oggi un'imponente quantità di rifiuti segue rotte illegali e non controllate, destinati ad una cattiva gestione e smaltimento, causando, così, ingenti danni economici, ambientali e alla salute.

Come espresso nel paragrafo §2.2, nel 2022 sono stati generati 62 miliardi di kg di RAEE, pari a 7,8 kg pro-capite. Di questi solo il 22,3% sono stati regolarmente raccolti e riciclati, per un volume pari a circa 13,8 miliardi di kg (1,7 kg pro-capite). La Figura 20 ripete i volumi delle categorie di RAEE generati globalmente nel 2022, precedentemente introdotti.

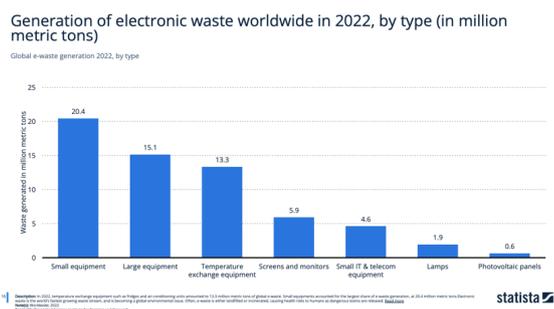


Figura 20 - Volumi delle categorie di RAEE prodotti nel 2022 (Electronic waste worldwide, 2024).

Il tasso di raccolta formale per ciascuna categoria di rifiuti varia dal 5% per le sorgenti luminose, al 34% per i grandi elettrodomestici. I piccoli apparecchi sono circa un terzo di rifiuti totali globali, ma hanno un tasso di raccolta e riciclo ancora molto basso, pari al 12%; i pannelli fotovoltaici hanno un tasso del 17%; mentre gli apparecchi per lo scambio termico, schermi e monitor e dispositivi IT hanno un tasso rispettivamente del 27%, 25% e 22% (Cornelis P. Baldé, 2024).

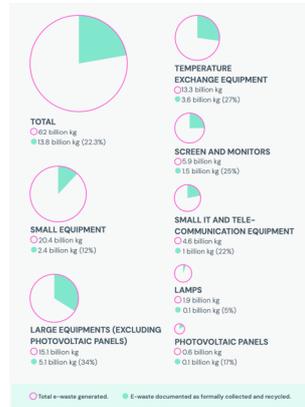


Figura 21 - Tasso di raccolta e riciclo delle categorie di RAEE nel 2022 (Cornelis P. Baldé, 2024).

È possibile notare come i tassi di raccolta formale più elevati appartengano generalmente ai prodotti caratterizzati da un peso unitario elevato, come i grandi elettrodomestici (lavatrici, lavastoviglie, ecc.), seguiti dai dispositivi di scambio termico (frigoriferi, condizionatori, pompe di calore). Il basso tasso di riciclo delle piccole apparecchiature elettriche ed elettroniche è dovuto, soprattutto, all'usanza comune di dimenticarle in casa, anziché smaltirle correttamente.

Le sorgenti luminose mantengono il tasso di raccolta e riciclo più basso, pur contenendo al loro interno risorse preziose, come terre rare, metalli e vetro (Cornelis P. Baldé, 2024).

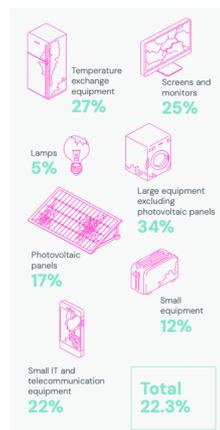


Figura 22 - Tasso di riciclo delle categorie di RAEE nel 2022 (Cornelis P. Baldé, 2024).

Nel 2022, i Paesi che hanno generato la più alta quantità di RAEE pro-capite sono stati l'Europa, l'Oceania (16,1 kg pro-capite) e l'America (14,1 kg pro-capite).

Poiché sono anche i Paesi con le infrastrutture di raccolta, trattamento e riciclo più avanzate, godono anche dei più alti tassi di raccolta pro-capite: rispettivamente 6,7 kg pro-capite in Oceania (41,4% dei RAEE) e 4,1 kg pro-capite in America (30% dei RAEE).

L'Asia genera ingenti quantità di rifiuti, ma la gestione di questi è ancora limitata all'11,8%, pari a 0,76 kg pro-capite (Cornelis P. Baldé, 2024).

REGION	SUB REGION	NUMBER OF COUNTRIES IN REGION	INHABITANTS		E-WASTE GENERATED				E-WASTE DOCUMENTED AS FORMALLY COLLECTED AND RECYCLED			
			MILLIONS IN 2010	MILLIONS IN 2022	KG PER CAPITA IN 2010	KG PER CAPITA IN 2022	MILLION KG IN 2010	MILLION KG IN 2022	MILLION KG IN 2010	MILLION KG IN 2022	COLLECTION RATE 2010 (%)	COLLECTION RATE 2022 (%)
	ALL	40	733	742	13.3	17.6	9,739	13,076	3,780	5,593	38.8	42.8
Europe	Eastern Europe	10	295	291	7.4	12.7	2,177	3,678	355	1,005	16.3	27.3
	Northern Europe	10	99	106	18.4	23.2	1,824	2,456	940	1,042	51.5	42.4
	Southern Europe	13	152	150	15.5	18	2,349	2,700	844	1,069	35.9	39.6
	Western Europe	7	188	196	18.1	21.7	3,389	4,243	1,641	2,478	48.4	58.4

Tabella 5 - Volumi di RAEE generati, raccolti e riciclati in Europa nel 2010 e nel 2022 (Cornelis P. Baldé, 2024).

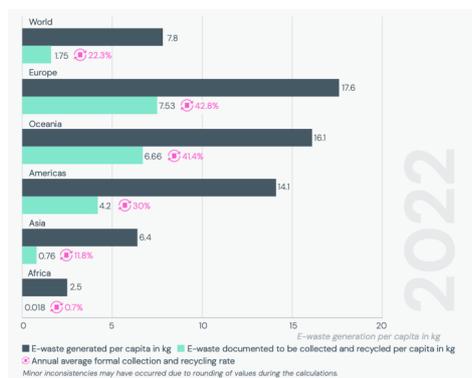


Figura 23 - Quantità pro-capite di RAEE generati, raccolti e riciclati nel mondo nel 2022 (Cornelis P. Baldé, 2024).

In particolare, in Europa il volume di RAEE prodotti è cresciuto da 9,7 miliardi di kg (13,3 kg pro-capite) nel 2010 a 13,3 miliardi di kg (17,6 kg pro-capite) nel 2022. Come precedentemente spiegato, è ugualmente cresciuto il volume di rifiuti formalmente raccolti e riciclati, passando dal 38,8% nel 2010, pari a 3,7 miliardi di kg, al 42,8% nel 2022, pari a 5,6 miliardi di kg (7,5 kg pro-capite); registrando, così, il più alto tasso di riciclo documentato.

La regione d'Europa con il più alto tasso di riciclo è quella occidentale, con un valore pari al 58,4% a differenza, invece, della regione orientale che il tasso più basso registrato del 27,3% (Electronic waste worldwide, 2024).

Share of e-waste documented as formally collected and recycled in Europe in 2022, by sub region

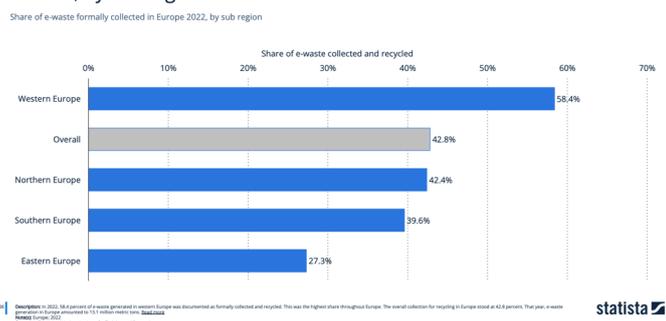


Figura 24 - Tasso di riciclo di RAEE delle aree europee nel 2022 (Electronic waste worldwide, 2024).

Per quanto riguarda l'Italia, invece, la gestione dei RAEE è in mano al Centro di Coordinamento RAEE. Il loro ultimo report fornisce i dati sulla raccolta e gestione dei RAEE nel territorio italiano. Nel 2022 sono stati immessi nel mercato 1.739.808 tonnellate di apparecchiature elettriche ed elettroniche, volume in continua crescita con una media di 1.688.742 tonnellate nel triennio 2020-2022 (Centro di coordinamento RAEE, 2024).

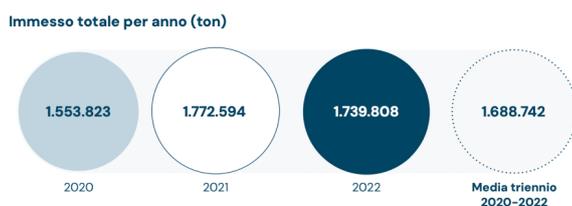


Figura 25 - Volumi di AEE immessi nel mercato italiano nel 2020-2022 (Centro di coordinamento RAEE, 2024).

Entrando nei dettagli, l'ammontare di AEE è costituito da circa 350.000 tonnellate di apparecchiature per lo scambio termico, 700.000 tonnellate di apparecchiature di grandi dimensioni e 450.000 tonnellate di apparecchiature di piccole dimensioni, circa 100.000 tonnellate di piccole apparecchiature IT e di schermi e monitor.

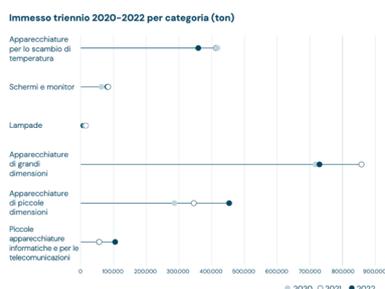


Figura 26 - Categorie di AEE immessi nel mercato italiano nel 2020-2022 (Gestione RAEE Report 2023, 2024).

Nel 2023 il 95,2% dei RAEE è stato raccolto e trattato nell'ambito del sistema di coordinamento CdC RAEE (Gestione RAEE Report 2023, 2024), per un totale di 510.708 tonnellate di rifiuti gestiti (-4,6% rispetto al 2022).



Figura 27 - Volume di RAEE gestiti in Italia nel 2023 (RAEE Italia - la raccolta negli anni, 2024).

In particolare, il 71,8% dei RAEE appartiene alla categoria dei RAEE domestici, con un volume pari a 366.909 tonnellate (-2,6% rispetto al 2022); mentre il 28,2% ai RAEE professionali, con un volume pari a 143.798 tonnellate (-9,2% rispetto al 2022) (RAEE Italia - la raccolta negli anni, 2024).



Figura 28 - Tipologia di RAEE raccolti in Italia nel 2023 (RAEE Italia - la raccolta negli anni, 2024).



Figura 29 - Volumi di tipologie di RAEE raccolti in Italia nel 2023 (Gestione RAEE Report 2023, 2024).

Entrando nel dettaglio, le 366.909 tonnellate di RAEE domestici sono così suddivise: 105.273 tonnellate di apparecchiature per lo scambio termico (+2,5% rispetto al 2022); 127.056 tonnellate di grandi apparecchiature (+6,7% rispetto al 2022); 49.147 tonnellate di schermi e monitor (-32,2% rispetto al 2022); 81.748 tonnellate di apparecchiature IT (+2,7% rispetto al 2022) e, infine, 3.659 tonnellate di sorgenti luminose (+23,7% rispetto al 2022) (Gestione RAEE Report 2023, 2024).



Figura 30 - Volumi di categorie di RAEE domestici raccolti in Italia nel 2023 (Gestione RAEE Report 2023, 2024).

Per quanto riguarda, invece, i RAEE professionali, questi sono suddivisi come segue: 17.830 tonnellate di apparecchiature per lo scambio termico (+1,8% rispetto al 2022); 4.955 tonnellate di schermi e monitor (-29,2% rispetto al 2022); 516 tonnellate di lampade (-25,8% rispetto al 2022); 64.097 tonnellate di apparecchiature di grandi dimensioni (-11,5% rispetto al 2022); 47.606 tonnellate di apparecchiature di piccole dimensioni (-10,1% rispetto al 2022) e, infine, 8.794 tonnellate di piccole apparecchiature IT (+14,1% rispetto al 2022) (RAEE Italia - la raccolta negli anni, 2024).



Figura 31 - Volumi di categorie di RAEE professionali raccolti in Italia nel 2023 (RAEE Italia - la raccolta negli anni, 2024).

La Direttiva Europea 2012/19/UE, che verrà presentata nei paragrafi a seguire, stabilisce come target del 2023 per la raccolta il 65% dei rifiuti totali. In Italia, nel 2022 è stato raggiunto il 34% dei RAEE (calcolato come rapporto fra il volume di RAEE raccolti e il volume totale di AEE immessi sul mercato), mostrando l'inefficienza del sistema di gestione dei rifiuti elettronici ed elettrici nel Paese.

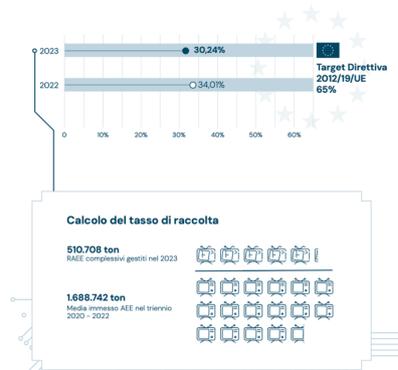


Figura 32 - Tasso di raccolta RAEE in Italia nel 2022 (RAEE Italia - la raccolta negli anni, 2024).

2.4 Gestione dei RAEE

Come anticipato nel paragrafo §2.2.1, il problema principale che riguarda la gestione dei RAEE risiede nella loro cattiva gestione. Attualmente nel mondo la maggior parte dei rifiuti viene, infatti, gestita al di fuori dei sistemi formali di raccolta e riciclo.

Come introdotto nel paragrafo §2.2, nel 2022 sono stati generati 62 miliardi di kg di RAEE nel mondo. Di questi, 31 miliardi di kg sono composti da metalli, 17 miliardi di kg da plastica e 14 miliardi di kg da altri materiali quali vetro, gomma e ceramica. Risulta evidente come la composizione delle materie prime dei RAEE sia una potenziale fonte di risorse da poter trattare e riutilizzare, in modo tale da garantirne un beneficio economico e ambientale (Global E-waste monitor 2024 electronic waste rising five times faster documented E-waste recycling, 2024).

Ciononostante, dei 62 miliardi di kg di RAEE generati, solo 13,8 miliardi di kg sono stati formalmente raccolti e riciclati, pari solo al 22,3%. La restante parte è stata gestita e trattata al di fuori dei sistemi formali. Di questi 48 miliardi di kg, 16 miliardi di kg si è stimato essere stati raccolti e riciclati in Paesi con infrastrutture per la gestione dei rifiuti sviluppate; 18 miliardi di kg in Paesi con infrastrutture non sviluppate e, infine, 14 miliardi di kg sono stati smaltiti come rifiuti residui, la maggior parte dei quali in discariche (Cornelis P. Baldé, 2024). È, tuttavia, certo che l'attuale produzione di materie prime secondarie grazie ai processi di ricircolo evita l'estrazione di 900 miliardi di kg di minerali. Questo evidenzia l'importanza di un'economia circolare per creare catene di valore più sicure e sostenibili. Inoltre, l'estrazione mineraria urbana è essenziale per ridurre ulteriormente il degrado ambientale.

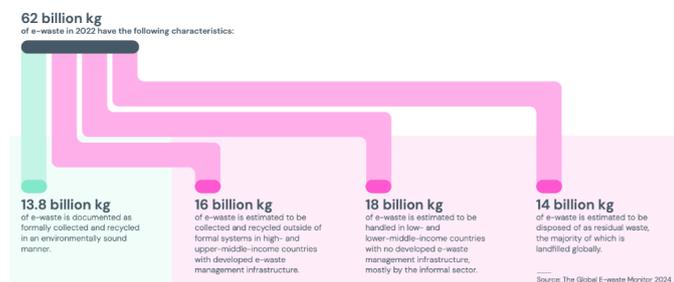


Figura 33 - Rotte dei RAEE prodotti globalmente nel 2022 (Cornelis P. Baldé, 2024).

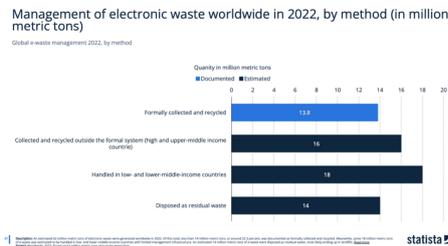


Figura 34 - Metodi di gestione dei RAEE nel mondo nel 2022 (Electronic waste worldwide, 2024).

Una delle cause principali che influenza maggiormente il tasso di raccolta formale e riciclo dei RAEE nel mondo riguarda le policy di gestione. È, difatti, dimostrato che la presenza di regolamentazioni in un territorio favorisca la corretta gestione dei rifiuti, riducendone il flusso illegale e il loro trattamento e smaltimento incorretti e favorendo, in tal modo, i principi dell’Economia Circolare con impatti ambientali positivi. Le regolamentazioni, per l’appunto, favoriscono una gestione sana dei rifiuti, sin dalla raccolta responsabile e il trasporto dei rifiuti, fino allo smistamento, bonifica, trattamento ed esportazione di risorse preziose.

Fino ad oggi solo il 42% dei Paesi nel mondo, circa 81, adotta politiche sulla gestione dei rifiuti, coprendo il 72% della popolazione mondiale.

Dal 2014 questo numero è aumentato da 61 a 81, ma l’aumento di Paesi mantiene un tasso decrescente, rallentando negli ultimi anni (Global E-waste monitor 2024 electronic waste rising five times faster documented E-waste recycling, 2024).

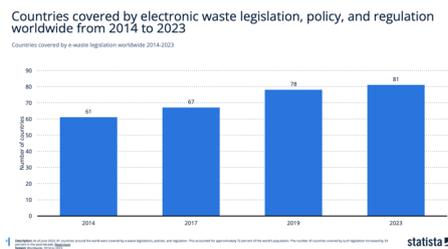


Figura 35 - Numero di Paesi con legislazioni, policy e regolamentazioni sulla gestione dei RAEE dal 2014 al 2023 (Electronic waste worldwide, 2024).

Degli 81 paesi, 67 di questi detengono regolamentazioni che disciplinano la gestione dei rifiuti contenente disposizioni basate sul principio di politica ambientale della Responsabilità Estesa del Produttore (EPR).

È stato provato che i paesi con tali legislazioni tendono ad avere una fitta rete di punti di raccolta per i RAEE, nonché una solida rete di infrastrutture dedite alla gestione di questi.

Di contro, solo 46 Paesi hanno prefissato un obiettivo di tasso di raccolta e solo 36 un obiettivo di tasso di riciclo. Questo consente di spiegare il perché il tasso di raccolta e riciclo globale rimanga così basso e stabile negli anni.

Nei Paesi in cui sono previsti obiettivi di raccolta e riciclo, il tasso va ben oltre il tasso medio globale del 22,3%. Esempio lampante è l'Europa con un tasso di raccolta e riciclo del 42,8% (Cornelis P. Baldé, 2024).



Figura 36 - Numero di Paesi con policy e obiettivi nel 2023 (Cornelis P. Baldé, 2024).

La presenza o meno di policy di gestione dei rifiuti elettrici ed elettronici influenza il livello di consapevolezza nei cittadini sulle corrette opzioni di smaltimento dei prodotti, come anche la quantità di infrastrutture adibite al trattamento e riciclo dei RAEE. Questo consente di porre un limite ai flussi illegali e non documentati dei rifiuti, proteggendo non solo l'ambiente, ma anche la salute umana e garantendo la possibilità di recuperare e riutilizzare le risorse contenute nei rifiuti, rendendo la catena di approvvigionamento circolare.

Inoltre, la presenza di obiettivi consente di monitorare i progressi ed incentivare le attività di raccolta e riciclo.

È importante sottolineare come la maggior parte delle politiche sulla gestione dei RAEE si concentri sulla raccolta e riciclo dei materiali di più facile recupero e presenti in grandi quantità, quali plastica, ferro, rame, oro e argento, trascurando le materie prima critiche, fra cui indio, litio e rodio.

Il numero così basso di Paesi e policy presenti al giorno d'oggi provoca un ingente divario tra la consapevolezza degli utenti e l'attuazione delle azioni previste, nonché l'elevatissimo volume di traffico illegale di rifiuti che ancora al giorno d'oggi rappresenta il più comune destino dei rifiuti.

Bisogna, tuttavia, ricordare che il riciclo è l'ultimo dei tre principi fondamentali dell'Economia Circolare. Come esplicitato nel paragrafo §1, prima del riciclo è necessario puntare al riutilizzo dei prodotti. All'interno dell'Unione Europea sono presenti direttive che affermano il diritto alla riparazione dei dispositivi. L'obiettivo principale è dare la priorità alla riparazione, piuttosto che alla sostituzione dei prodotti, dando ai consumatori il diritto di far riparare prodotti difettosi dai produttori stessi.

Il fattore che accomuna la maggior parte delle politiche di gestione dei RAEE è la priorità che viene data alle molteplici soluzioni di trattamento dei rifiuti: prima di tutto bisogna prevenire la produzione dei rifiuti; successivamente vi è il riutilizzo, il riciclo, la riparazione e solo infine lo smaltimento.



Figura 37 - Gerarchia del trattamento dei RAEE (Cornelis P. Baldé, 2024).

2.4.1 Politiche di gestione dei RAEE in UE

All'interno della Commissione dell'Unione Europea è stato spesso argomento di interesse la gestione dei rifiuti da apparecchi elettrici ed elettronici. Gli Stati membri dell'Unione Europea, oltre a sottolineare l'importanza di gestire correttamente i RAEE in modo tale da garantire la sostenibilità ambientale, hanno riconosciuto la necessità del recupero delle risorse preziose dai rifiuti, fra cui le materie prime critiche, fondamentali per la fornitura di materie prime chiave in parecchi settori strategici, quali l'industria digitale, aerospaziale e della difesa.

La legislazione e le politiche in vigore all'interno dell'UE si basano principalmente su tre direttive: la direttiva UE sui RAEE, la direttiva RoHS e l'EPR.

- Direttiva 2012/19/UE

La Direttiva 2012/19/UE sui RAEE stabilisce i criteri per la raccolta, il trattamento e il recupero dei rifiuti provenienti da apparecchiature elettriche ed elettroniche, ponendo obiettivi sui tassi di raccolta all'interno degli Stati membri. Entrando nel dettaglio, la Direttiva stabilisce due modalità di calcolo del tasso di raccolta a cui conseguono due diversi target da raggiungere. La prima modalità ha come obiettivo di raccolta l'85% del peso dei RAEE prodotti nell'intero territorio nazionale nell'anno considerato. La seconda modalità, invece, considera il peso medio delle apparecchiature elettriche ed elettroniche immesse nel mercato nei 3 anni precedenti. In questo secondo caso l'obiettivo è pari al 65%, calcolato dal rapporto fra il peso di RAEE raccolti in un anno e il peso medio degli AEE immessi nel mercato negli ultimi 3 anni. (Direttiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, 2012).

- Direttiva RoHS

La Direttiva 2011/65/UE, conosciuta come Direttiva RoHS (*Restriction of hazardous substances*), promuove la riciclabilità degli AEE, ponendo restrizioni sull'utilizzo di particolari sostanze pericolose all'interno delle apparecchiature elettriche ed elettroniche. L'obiettivo principale è quello di prevenire i rischi alla salute umana e all'ambiente causati da determinate materie prime utilizzate, limitandone l'uso qualora siano presenti alternative più sicure. Fra le sostanze pericolose rientrano metalli pesanti, ritardanti di fiamma e plastificanti (Direttiva 2011/65/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio, 2012).

- Responsabilità Estesa dei Produttori

La Responsabilità Estesa dei produttori (EPR, *Extended Producer Responsibility*) viene introdotta all'interno della legislazione Europea nella Direttiva 2008/98/CE relativa ai rifiuti. L'approccio alla base attribuisce ai produttori la responsabilità nel gestire il processo di trattamento dei rifiuti a valle, riprendendoli dopo l'uso. La direttiva mira al riutilizzo, riciclo e recupero dei RAEE giunti a fine vita, per migliorare la circolarità di prodotti e materiali (Direttiva 2008/98/CE , 2008).

Fra le linee guida previste al fine di una corretta gestione dei rifiuti, vi è la corretta etichettatura dei materiali allo scopo di migliorare il processo di riciclo, limitare i materiali tossici all'interno dei prodotti e prediligere, invece, materie prime verdi e facilmente riciclabili e fornire opzioni per i programmi di ritiro (Kaya, 2016).

Le apparecchiature elettriche ed elettroniche (AEE) sono state tra le prime categorie di prodotti oggetto di disposizioni sulla responsabilità estesa del produttore. In tale modo viene applicato il principio "chi inquina paga", trasferendo in capo ai produttori i costi di raccolta, smaltimento, recupero e trattamento dei rifiuti. In questo modo il produttore diventa responsabile dell'intero ciclo di vita del prodotto, ovvero "*from the cradle to the grave*" (dalla culla alla tomba).

È per tale motivo che l'Unione Europea ha stabilito le norme comuni per promuovere la riparazione dei beni definendo gli obblighi dei produttori in tale materia. La Direttiva UE 2024/1799 del Parlamento Europeo e del Consiglio ha l'obiettivo di promuovere un consumo più sostenibile estendendo il ciclo di vita dei prodotti e riducendo i rifiuti (Direttiva UE 2024/1799, 2024). In tale ambito stabilisce gli obblighi dei produttori, i quali sono tenuti a fornire servizi di riparazione economici e pezzi di ricambio.

3. Analisi di mercato

Per poter definire il mercato dei RAEE è doveroso, innanzitutto, definirlo:

- dal punto di vista merceologico, comprendendo tutti i rifiuti provenienti dalle apparecchiature elettriche ed elettroniche in ragione delle loro caratteristiche e uso. Da questo punto di vista è possibile distinguere tre mercati rilevanti:
 1. mercato relativo ai sistemi collettivi e individuali per la gestione dei RAEE
 2. mercato relativo alla raccolta e trattamento dei RAEE, i cui soggetti sono:
 - i fornitori dal lato dell'offerta, che provvedono a fornire i servizi di trasporto, trattamento, recupero, riciclo e smaltimento dei RAEE
 - i sistemi che richiedono la prestazione dei servizi di raccolta e trattamento dal lato della domanda
 3. mercato relativo al recupero e vendita dei materiali riciclati, i cui soggetti svolgono attività di recupero dei materiali dai RAEE
- dal punto di vista geografico, riscontrando che:
 1. il mercato relativo ai sistemi collettivi e individuali per la gestione dei RAEE sia di dimensioni nazionali, a causa delle diverse normative vigenti in ciascuno Stato
 2. il mercato della raccolta e del trattamento dei RAEE sia anch'esso di dimensioni nazionali e, eventualmente, regionali
 3. il mercato del recupero e della vendita dei materiali riciclati sia di dimensioni nazionali o anche più ampie a seconda del materiale

Nel 2024 il mercato della gestione dei RAEE ha raggiunto il valore di 75 miliardi di \$, cifra destinata a crescere considerevolmente fino ad arrivare a 155,4 miliardi di \$ nel 2030 (Electronic waste worldwide, 2024).

Global electronic waste management market value in 2022 and 2023, with forecasts from 2024 to 2030 (in billion U.S. dollars)

E-waste management market value worldwide 2022-2030

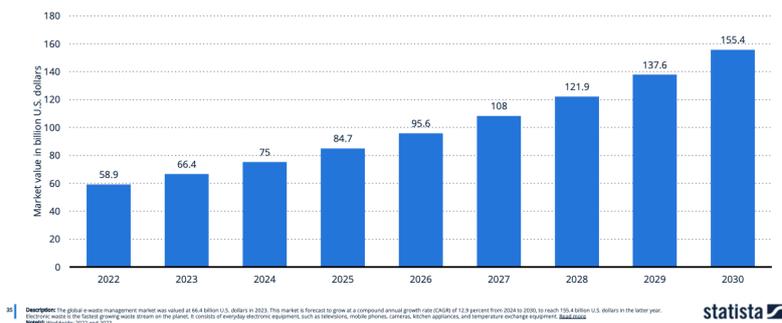


Figura 38 - Valore di mercato della gestione dei RAEE nel mondo dal 2022 al 2030 (Electronic waste worldwide, 2024).

La gestione in Italia dei RAEE si presenta in assoluta coerenza con il panorama europeo, aderendo alle Direttive RAEE già citate nel paragrafo §2.3.1 e incentrata principalmente sulla responsabilità estesa dei produttori e la Direttiva 2012/19/UE. In Italia, l'assetto organizzativo interno è basato sul modello della "clearing house", ovvero un modello costituito da una pluralità di soggetti coordinati da un unico organo centrale: il Centro di Coordinamento RAEE.

Secondo l'Art.33, comma 2, del D. Lgs. 49/2014 (Decreto Legislativo 14 marzo 2014, n.49, 2014), tutti gli impianti autorizzati alla gestione dei RAEE hanno l'obbligo di iscriversi nel registro previsto dal Centro di Coordinamento RAEE:

- indipendentemente dal fatto che siano accreditati o meno al CdC RAEE;
- a prescindere dal fatto che gestiscano rifiuti elettronici provenienti dai nuclei domestici o rifiuti elettronici di provenienza diversa (RAEE professionali);
- sia che svolgano attività di stoccaggio che quella di trattamento (Centro di coordinamento RAEE, 2024)

Nel 2023 il numero di impianti dichiarati in tutto il territorio italiano ammonta a 1.071, maggiormente concentrati nel nord Italia.



Figura 39 - Numero di impianti dichiarati in Italia nel 2023 (Centro di coordinamento RAEE, 2024).

La rete di imprese adibite alla raccolta dei RAEE è molto fitta e composta da diversi attori:

- centri di raccolta pubblici e privati, gestori della raccolta e aperti ai cittadini che possono consegnare i RAEE domestici;
- luoghi di raggruppamento, che accolgono i rifiuti provenienti dal ritiro;
- grandi utilizzatori, che producono grandi quantitativi di rifiuti e che, quindi, ottengono il ritiro in loco;
- installatori, presso i quali sono stoccati i rifiuti provenienti da installazioni

Nel 2024 il numero di centri di raccolta pubblici è stato pari a 4.451, di luoghi di raggruppamento pari a 1.464 e di luoghi di raccolta privati, grandi utilizzatori e installatori pari a 714 (Centro di coordinamento RAEE, 2024).



Figura 40 - Numero di attori per la gestione dei RAEE in Italia nel 2024 (Centro di coordinamento RAEE, 2024).

In particolare, i centri di raccolta si occupano della gestione e del trattamento dei rifiuti derivanti da apparecchiature elettriche ed elettroniche non più funzionanti o inutilizzate. Il loro scopo principale è raccogliere, classificare, selezionare e separare i rifiuti e avviare processi di recupero o allo smaltimento corretto questi materiali. Si occupano, inoltre, della gestione delle sostanze pericolose contenute all'interno dei prodotti e di smaltirli in sicurezza.

Nel mondo, invece, data la presenza della Responsabilità Estesa dei Produttori, anche le maggiori compagnie produttrici di dispositivi elettrici ed elettronici si occupa della raccolta di rifiuti provenienti da apparecchiature elettriche ed elettroniche. Fra le maggiori imprese vi sono Samsung, LG Electronics, Asus e HP. Dal 2018 al 2023 Samsung ha raccolto 6.297 mila tonnellate di RAEE (Electronic waste worldwide, 2024).

Amount of electronic waste collected by Samsung worldwide from 2018 to 2023 (in 1,000 metric tons)

E-waste collected by Samsung worldwide 2018-2023

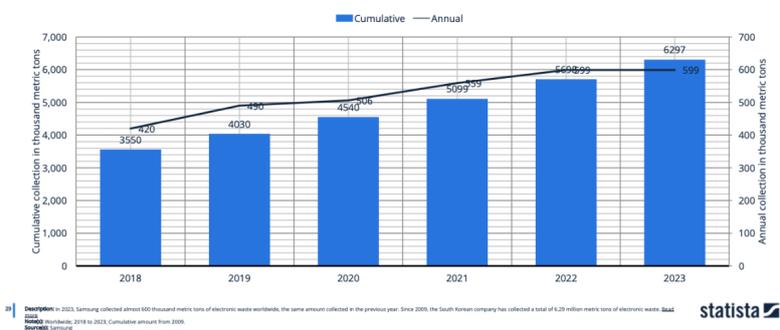


Figura 41 - Volumi di RAEE raccolti da Samsung dal 2018 al 2023 (Electronic waste worldwide, 2024).

LG Electronics dal 2010 al 2022 ha raccolto fino a 3.988 mila tonnellate di RAEE (Electronic waste worldwide, 2024).

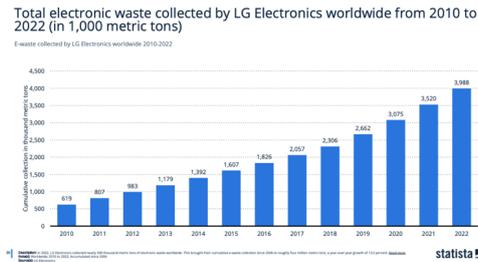


Figura 42 - Volumi di RAEE raccolti da LG Electronics dal 2010 al 2022 (Electronic waste worldwide, 2024).

Asus nel 2020 ha raccolto 12.117 tonnellate di RAEE, nel 2021 11.623 tonnellate e nel 2022 10.790 tonnellate (Electronic waste worldwide, 2024).

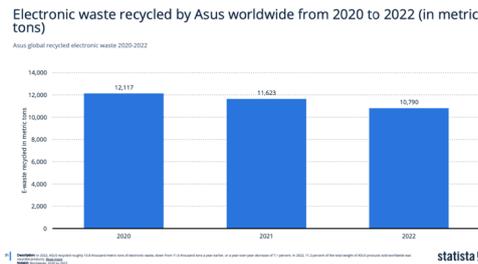


Figura 43 - Volumi di RAEE raccolti da Asus dal 2020 al 2022 (Electronic waste worldwide, 2024).

HP, infine, dal 2016 al 2022 ha raccolto 774,4 mila tonnellate di RAEE (Electronic waste worldwide, 2024).

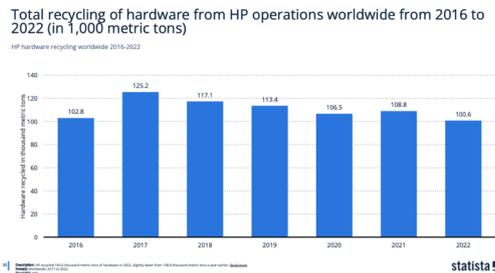


Figura 44 - Volumi di RAEE raccolti da HP dal 2016 al 2022 (Electronic waste worldwide, 2024).

3.1 Il mercato delle apparecchiature elettriche ed elettroniche ricondizionate

Come già introdotto nel paragrafo §2.1, il riutilizzo dei dispositivi elettronici può aumentare il ciclo di vita del prodotto a favore dei principi dell'economia circolare. Tuttavia, ci sono sfide nel riutilizzo di tali apparecchiature che risiedono soprattutto negli aspetti economici e che possono essere riassunte come segue (O.S. Shittu, 2021):

- In alcuni casi, i costi di recupero UEEE sono più alti, il che significa che nonostante i benefici ambientali, gli AEE rigenerati possono essere ancora più costosi dei nuovi AEE;
- Da un punto di vista dei consumatori, la preferenza generale è per i nuovi prodotti perché convincere i clienti ad accettare prodotti contenenti componenti usati o apparecchiature recuperate è problematico;
- Il recupero delle AEE richiede strutture speciali che sono costose. In più, sono necessari anche tecnici e operatori qualificati;
- Nonostante le conseguenze ambientali, convincere le aziende a implementare tecnologie di rigenerazione e commercializzare il recupero dei RAEE nell'attuale catena di approvvigionamento è difficile, pur essendo presenti direttive che impongono ai produttori di garantire il recupero dei prodotti;
- È difficile convincere le persone a scegliere AEE o componenti recuperati rispetto a versioni migliori poiché lo stato di garanzia di questi articoli potrebbe cambiare. Le garanzie devono essere definite separatamente, ad esempio, una garanzia per i componenti recuperati e una garanzia per l'intero prodotto. Infatti, l'assenza di garanzie per prodotti recuperati può rendere i consumatori diffidenti nell'acquisto di questi, dato che gli eventuali costi di riparazione saranno interamente a carico loro.

In questo contesto, nonostante i molteplici aspetti che ancora frenano l'espansione dei prodotti ricondizionati, il mercato di tali dispositivi negli ultimi anni ha registrato una crescita significativa, non solo a livello italiano ed europeo, ma addirittura a livello globale grazie, soprattutto, alla crescente consapevolezza e interesse dei consumatori nei confronti degli aspetti ambientali.

A livello mondiale, di fatti, il mercato dei dispositivi usati e ricondizionati ha visto una crescita del 15% nel 2023 con la previsione di raggiungere un valore pari a 144 miliardi di \$ entro il 2030.

In Europa, in particolare, il settore è in continua crescita grazie soprattutto alla spinta data dall'azienda Refurbed che da sola nel 2024 ha superato i 150 milioni di € in volumi di vendita.

3.2 Il mercato degli elettrodomestici

Il mercato degli elettrodomestici rappresenta un settore chiave nell'economia globale, caratterizzato da una costante crescita e da un'evoluzione tecnologica continua. Questo perché gli elettrodomestici, sia di uso domestico che professionale, svolgono un ruolo essenziale nella vita quotidiana.

Il settore degli elettrodomestici comprende una vastissima gamma di prodotti, suddivisi principalmente in apparecchiature per lo scambio termico, quali frigoriferi e condizionatori (appartenenti alla categoria R1 introdotta nel paragrafo §2.1.1), grandi elettrodomestici, quali lavatrici, asciugatrici, forni, piani cottura e cappe aspiranti (appartenenti alla categoria R2) e piccoli elettrodomestici, come macchine del caffè, frullatori e ferri da stiro.

Dal punto di vista economico, il mercato degli elettrodomestici nel 2024 ha raggiunto un fatturato mondiale pari a 670 miliardi di \$, numero che è destinato a crescere fino ad un valore stimato di 850 miliardi di \$ nel 2029 (Home & household appliances, 2024)

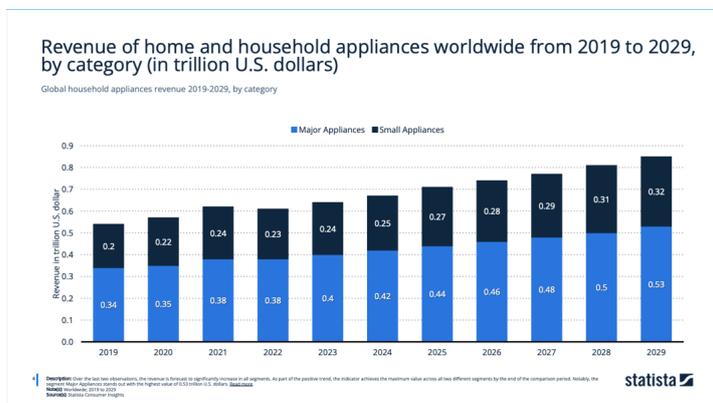


Figura 45 - Fatturato mondiale degli elettrodomestici dal 2019 al 2029 (Home & household appliances, 2024).

con volumi pari a 4,6 milioni di unità vendute nel 2024.

Retail unit volume of home and household appliances worldwide from 2019 to 2029, by category (in billion units)



Figura 46 - Volumi di vendite mondiali degli elettrodomestici dal 2019 al 2029 (Home & household appliances, 2024).

Le categorie con il fatturato più elevato sono quelle dei frigoriferi e delle cucine, quindi piani cottura e forni, con fatturati pari rispettivamente a 121 miliardi di \$ e 115 miliardi di \$ e volumi pari a 191 milioni di unità e più di 227 milioni di unità nel 2024 (Home & household appliances, 2024).

Revenue of major household appliances worldwide from 2019 to 2029, by category (in billion U.S. dollars)

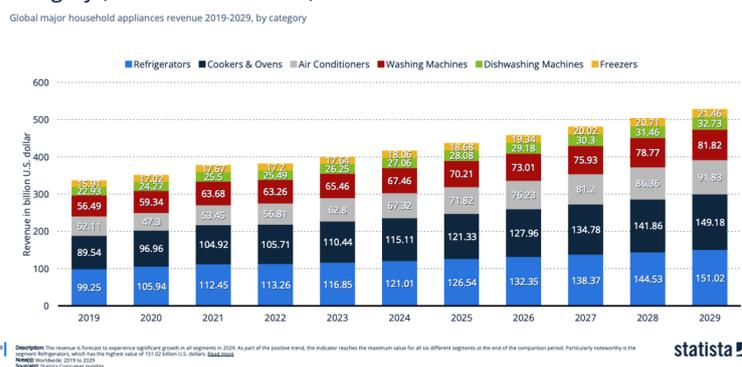


Figura 47 - Fatturato mondiale dei grandi elettrodomestici dal 2019 al 2029 (Home & household appliances, 2024).

Retail unit volume of major household appliances worldwide from 2019 to 2029, by category (in million units)

Global major household appliances retail unit volume 2019-2029, by category

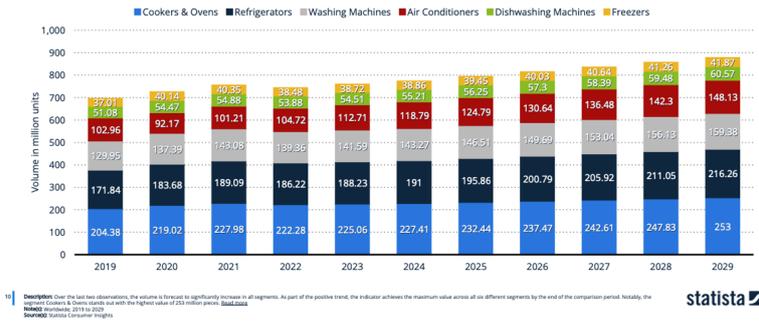


Figura 48 - Volumi di vendita dei grandi elettrodomestici nel mondo dal 2019 al 2029 (Home & household appliances, 2024).

I volumi e il fatturato di tali apparecchiature elettriche ed elettroniche possiedono già una rilevante importanza, la quale è destinata a crescere raggiungendo un fatturato stimato pari a più di 500 miliardi di \$ per i grandi elettrodomestici nel 2029 e volumi di vendita di quasi 900 milioni di unità nello stesso anno (Home & household appliances, 2024).

In questo contesto operano molte aziende sia a livello globale, che nazionale. In particolare, la figura 49 mostra le principali aziende produttrici di grandi elettrodomestici al mondo nel 2024, fra le quali vi è, ad esempio, Whirlpool.

Largest home and kitchen appliances companies globally in 2024, by market capitalization (in billion U.S. dollars)

Leading home and kitchen appliance companies worldwide in 2024, by market cap

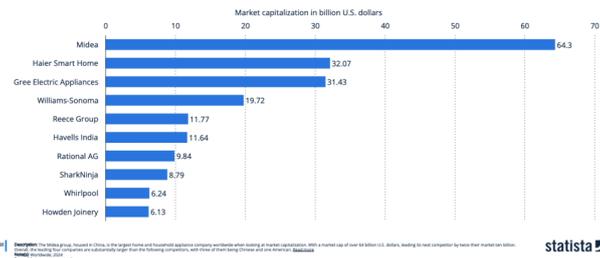


Figura 49 - Principali aziende produttrici di elettrodomestici al mondo nel 2024 (Home & household appliances, 2024).

Oltre a Whirlpool, altre grandi aziende produttrici sono LG Electronics e Miele, i cui fatturati vengono mostrati nelle figure a seguire.

Revenue of Whirlpool worldwide from 2008 to 2023, by segment (in billion U.S. dollars)

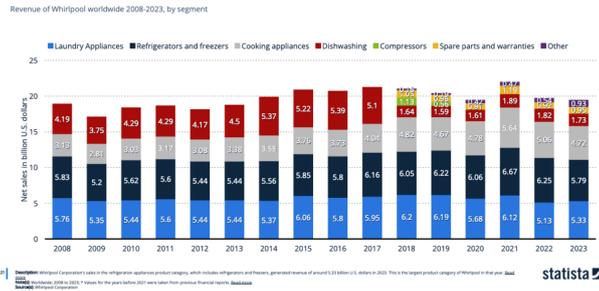


Figura 50 - Fatturato di Whirlpool dal 2008 al 2023 (Home & household appliances, 2024).

Revenue of LG Electronics home appliances & air solution segment from 2017 to 2024, by quarter (in billion U.S. dollars)

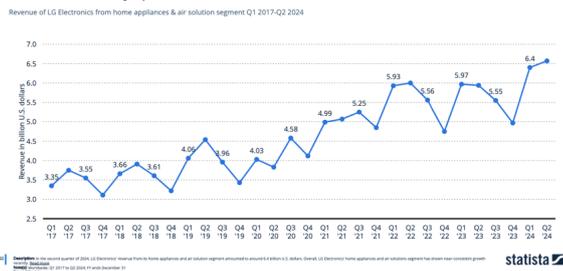


Figura 51 - Fatturato di LG Electronics dal 2017 al 2024 (Home & household appliances, 2024).

Total revenue of Miele from 2006/07 to 2022 (in billion euros)

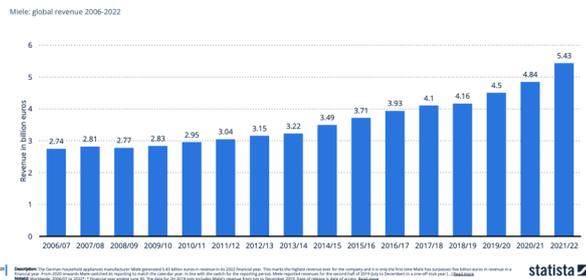


Figura 52 - Fatturato di Miele dal 2006 al 2022 (Home & household appliances, 2024).

4. Trattamento dei RAEE

Il processo di gestione e trattamento dei RAEE ha inizio una volta che le apparecchiature vengono gettate ed è, in linee generali, così suddiviso (Alessandra Cesaro, 2016):

1. Raccolta;
2. Pretrattamento, composto principalmente dallo smantellamento, pulizia e decontaminazione;
3. Triturazione;
4. Smistamento;
5. Riparazione o altri trattamenti;
6. Preparazione per il riutilizzo o altro recupero

Come introdotto nel paragrafo §2.3, il processo di gestione dei RAEE dipende principalmente dalle rotte che questi intraprendono. Risulta, quindi, doveroso spiegare nel dettaglio quali sono i percorsi principali che i RAEE possono percorrere.

Le rotte percorse dai RAEE sono quattro (Cornelis P. Baldé, 2024):

1. Raccolta e riciclo formale;
2. Smaltimento in discariche controllate;
3. Raccolta e riciclo al di fuori dei sistemi formali, ma con gestione sviluppata;
4. Raccolta e riciclo al di fuori dei sistemi formali e senza una gestione sviluppata

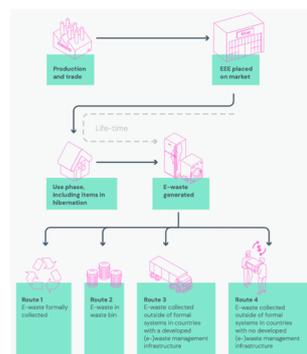


Figura 53 - Ciclo di vita dei RAEE (Cornelis P. Baldé, 2024).

4.1 Raccolta e riciclo formale

Con raccolta e riciclo formale si intendono tutte le attività gestite in linea con le legislazioni presenti all'interno del territorio degli 81 Paesi che possiedono strumenti legali in materia di RAEE. In questo scenario i responsabili della raccolta dei RAEE sono le organizzazioni preposte, i produttori e/o il governo tramite i punti di raccolta o servizi di ritiro autorizzati. In questo caso, una volta raccolti, i RAEE (circa 13,8 miliardi di kg) vengono inviati in impianti di trattamento specializzati in cui le risorse e le materie prime vengono recuperate in modo controllato dal punto di vista ambientale, gestendo le sostanze pericolose. A seguito del trattamento, nel 2022, sono stati persi 1 miliardo di kg di metalli, che sono stati successivamente inceneriti o smaltiti in discariche controllate; mentre sono stati recuperati 6 miliardi di kg di metalli, rientrando nel mercato grazie al loro riciclo (Cornelis P. Baldé, 2024). Questo percorso è, ad oggi, il modo più efficiente e rispettoso dell'ambiente per trattare i rifiuti.



Figura 54 - Ciclo di vita dei RAEE nello scenario 1 (Cornelis P. Baldé, 2024).

4.2 Smaltimento in discariche controllate

Come descritto nel paragrafo §2.3, nel 2022 è stato stimato che circa 14 miliardi di kg di RAEE siano stati smaltiti come normali rifiuti. In questo caso tutti i RAEE vengono spediti in discariche o inceneritori. Nelle discariche i RAEE di piccole dimensioni vengono smaltiti insieme ai rifiuti residui; mentre, i RAEE di grandi dimensioni vengono trattati come rifiuti ingombranti e spesso inceneriti o portati in discariche senza alcun processo di riciclo. Spesso vengono inviati in impianti nei quali vengono utilizzati metodi quali la separazione magnetica e il riciclo della cenere generata dall'incenerimento dei rifiuti, recuperando così circa 80 milioni di kg di metalli (Cornelis P. Baldé, 2024). Tuttavia, questo percorso provoca la perdita ad oggi di circa 7 miliardi di kg di metalli.

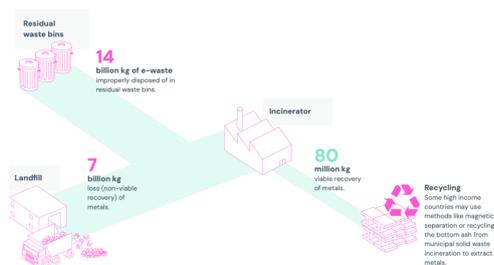


Figura 55 - Ciclo di vita dei RAEE nello scenario 2 (Cornelis P. Baldé, 2024).

L'attività di recupero e raccolta di materiali utili o riciclabili dai rifiuti presenti nelle discariche prende anche il nome di "scavenging" (Federico Magalini, 2019). Questa pratica è una realtà presente in tutta Europa e avviene, per l'appunto, dopo lo scarto da parte degli utenti finali, non solo dei loro apparecchi elettrici ed elettronici, ma di qualunque rifiuto contenente risorse recuperabili.

Si stima che in questo contesto i componenti recuperati attraverso tale pratica siano:

- Negli apparecchi di scambio termico compressori per il 22%, cavi per il 17%, rivestimenti per l'8% e radiatori per il 4%;
- Nei grandi elettrodomestici cavi per il 15%, bobine e trasformatori per il 6% e rivestimenti per il 3%;
- Nei monitor bobine di deflessione per il 21%, cavi per il 14%, dispositivi di memoria per il 14%, batterie e circuiti stampati rispettivamente per il 9% e 5%;

- Nei piccoli elettrodomestici dispositivi di memoria per il 29%, circuiti stampati per il 20%, cavi e batterie rispettivamente per il 21% e 7%

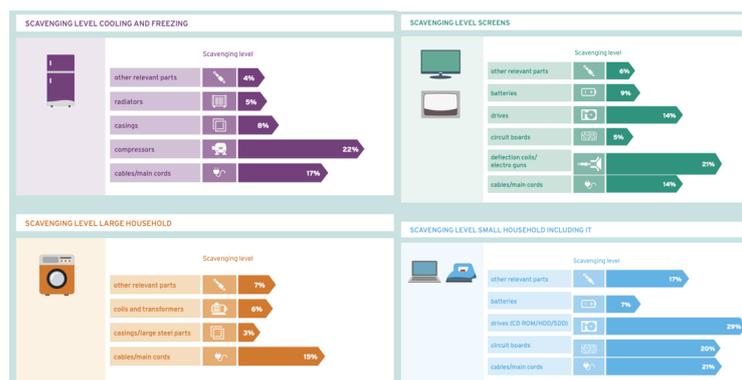


Figura 56 - Tipologie di componenti raccolti tramite la pratica di scavenging (Federico Magalini, 2019).

Lo scavenging, tuttavia, non garantisce il corretto trattamento dei componenti recuperati, generando un impatto negativo dal punto di vista ambientale. In questo modo, infatti, viene perso il potenziale di recupero delle materie prime critiche contenute all'interno di molti componenti. Precisamente, nel 2018 sono stati persi tramite la pratica dello scavenging 51 kt di apparecchi di scambio termico, 11 kt di monitor, 12 kt di grandi elettrodomestici e 77 kt di piccoli elettrodomestici (Federico Magalini, 2019).

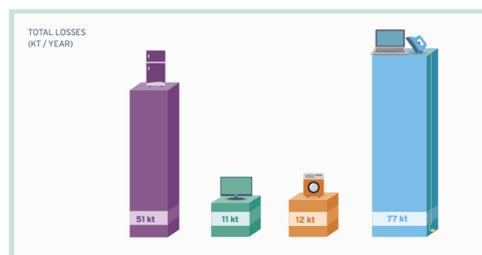


Figura 57 - Quantità di RAEE recuperabili persi a causa dello scavenging (Federico Magalini, 2019).

4.3 Raccolta e riciclo al di fuori dei sistemi formali, ma con gestione sviluppata

Nel 2022 si è stimato che 16 miliardi di kg di rifiuti siano stati raccolti e trattati al di fuori dei sistemi formali, ma in Paesi con un'infrastruttura per la gestione dei rifiuti sviluppata; quali, ad esempio, rivenditori di rifiuti o aziende che svolgono tali attività al di fuori degli schermi formali. In questo modo è possibile che la plastica e i metalli contenuti all'interno dei RAEE vengano riciclati, ma per le sostanze pericolose vi è un'elevata possibilità di non essere adeguatamente smaltite. Dei 16 miliardi di kg, infatti, circa 6 miliardi di kg di metalli sono stati riciclati, 2 miliardi di kg di metalli sono stati persi, ma da cui viene estratta e riciclata la plastica contenuta e, infine, 800 milioni di kg di rifiuti sono stati esportati in Paesi a basso reddito, con infrastrutture inadeguate, in maniera incontrollata, generando, così, importanti danni all'ambiente (Cornelis P. Baldé, 2024).

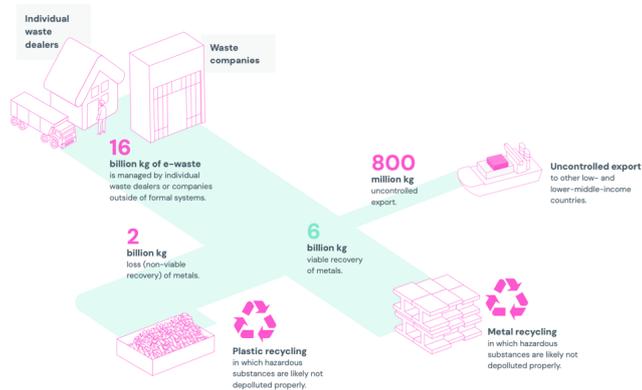


Figura 58 - Ciclo di vita dei RAEE nello scenario 3 (Cornelis P. Baldé, 2024).

4.4 Raccolta e riciclo al di fuori dei sistemi formali e senza gestione sviluppata

L'ultimo percorso che possono seguire i RAEE è rappresentato dalla raccolta e riciclo in Paesi a basso reddito caratterizzati da un numero significativo di lavoratori autonomi che svolgono una gestione informale dei rifiuti. In particolare, tali lavoratori autonomi raccolgono i RAEE porta a porta, li scompongono manualmente nei vari componenti e li vendono per la loro riparazione o smantellamento. Questa tipologia di trattamento è la più dannosa per l'ambiente perché priva di standard, causando ingenti emissioni dannose per l'ambiente e per la salute umana e provocando la perdita di risorse importanti. In questo caso il volume di rifiuti raccolti ammonta a 18 miliardi di kg di metalli, dei quali 2 miliardi di kg vengono persi e 7 miliardi di kg vengono recuperati (Cornelis P. Baldé, 2024). Alla fine, le frazioni preziose vengono vendute ai riciclatori nei Paesi ad alto reddito, grazie ai quali verranno gestite nella maniera corretta.

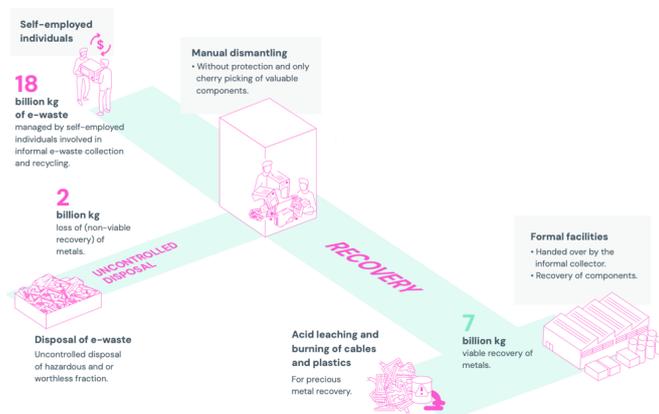


Figura 59 - Ciclo di vita dei RAEE nello scenario 4 (Cornelis P. Baldé, 2024).

5. Pratiche di trattamento dei RAEE

I RAEE sono uno dei flussi più in rapida crescita nel mondo in termini di volumi e di impatto ambientale. È già chiaro che la presenza di metalli e risorse preziose al loro interno fornisca sia un'importante fonte di reddito per le industrie adibite al riciclo, che un vantaggio economico per i produttori grazie al risparmio economico dovuto all'utilizzo di risorse recuperate e non vergini.

Tuttavia, a causa della presenza di sostanze pericolose al loro interno è necessario che le tecniche di trattamento dei rifiuti siano adeguate e coerenti con gli standard previsti dalle direttive presenti in ciascun Paese. Infatti, sebbene l'entità del rischio all'ambiente e alla salute dipenda dal funzionamento di ciascun impianto, tutti i flussi di materiali provenienti dai RAEE presentano sostanze pericolose con diversi livelli di tossicità.

Una volta diventati rifiuti, gli apparecchi elettrici ed elettronici vengono raccolti e separati in base alla tipologia. Il processo di riciclo dei RAEE ha inizio proprio dalla raccolta di questi.

Le pratiche di riciclo e recupero dei RAEE segue, in linee generali, tre passaggi ben definiti (Alessandra Cesaro, 2016):

1. Il pretrattamento, che include lo smontaggio preliminare, la triturazione e la separazione meccanica degli apparecchi per separare i componenti riutilizzabili da quelli pericolosi, come il mercurio e i liquidi refrigeranti, o inutilizzabili, che verranno smaltiti;
2. La lavorazione meccanica, fisica o chimica dei componenti preziosi ottenuti per il loro riciclo;
3. La raffinazione di tali materiali per poterli rivendere.

5.1 Pre-trattamento dei RAEE

Il pretrattamento è il primo processo di lavorazione dei RAEE in ingresso negli impianti di lavorazione. In linee generali le pratiche svolte in questa fase sono (Silvia Fiore, 2018):

- Lo smantellamento manuale degli apparecchi elettrici ed elettronici;
- La rimozione dei materiali pericolosi;
- La triturazione;
- La separazione delle varie tipologie di materiali quali metalli, vetro e plastiche, che seguiranno diversi flussi di trattamento, tramite processi quali la separazione magnetica e gravitazionale;
- La raccolta dei materiali rimanenti che non possono essere separati manualmente o recuperati, che vengono inviati in impianti che procederanno con la loro triturazione e smaltimento.

Il processo di smantellamento ha il fine di rimuovere i materiali pericolosi dai rifiuti e separare manualmente le diverse frazioni di metalli, plastica, vetro e altro (Kaya, 2016). I benefici principali dello smantellamento manuale riguardano la rimozione dei materiali pericolosi generando meno polveri e inquinanti, ottenendo così materiali di qualità superiore per le successive lavorazioni. Tuttavia, con il progredire delle tecnologie tale pratica diventa sempre più complessa da applicare, richiedendo più tempo e costi in termini di manodopera e trasporti.

La frazione di rifiuti che non può essere smantellata manualmente passa alla fase di triturazione, nel quale vengono impiegate tecniche meccaniche per la separazione.

La fase di triturazione comporta la riduzione della dimensione dei materiali al di sotto dei 20 mm. Tipicamente per frantumare e macinare i rifiuti vengono impiegate attrezzature quali trituratori, frantoi e coltelli.

I benefici dati dalla triturazione risiedono nella velocità del processo grazie ai processi automatizzati, generando una maggiore produttività. Di contro, si ha un'elevata emissione di polvere, perdita di materiale (circa il 40%), elevati investimenti e, soprattutto, la diminuzione della qualità delle materie prime.

A seguito della triturazione si ha la separazione meccanica, utilizzata per separare i vari flussi dal materiale triturato prima di subire una seconda fase di triturazione e di separazione. La separazione può essere eseguita tramite processi quali la separazione magnetica e gravitazionale. La separazione magnetica, in particolare, viene utilizzata per separare i materiali ferromagnetici quali ferro e altri metalli. Per i metalli base quali oro, rame e argento vengono utilizzati i separatori di densità quali separatori centrifughi e i cicloni d'aria. Per l'acciaio, invece, vengono impiegati i separatori di correnti parassite. Per quanto riguarda il vetro vengono utilizzati i sensori ottici. Per le materie plastiche, infine, le tecniche più utilizzate sono i sensori a infrarossi e l'utilizzo di un collettore di aspirazione. Attraverso l'utilizzo di questo dispositivo, grazie al movimento elicoidale, gli scarti degli apparecchi elettrici ed elettronici colpiscono le pareti, frantumando i materiali plastici che si staccano, così, dai metalli presenti. Il mix ottenuto di plastiche e metalli viene spesso ulteriormente trattato mediante separazione elettrostatica. La separazione elettrostatica si basa sul fatto che materiali diversi (come plastica e metallo) reagiscono in modo differente quando sottoposti a un campo elettrostatico. I metalli sono conduttori e perdono rapidamente la carica elettrostatica, mentre la plastica, che è un isolante, tende a trattenere la carica più a lungo. Le particelle triturate vengono caricate elettrostaticamente attraverso:

- Attrito (triboelettrico), facendo passare i materiali attraverso un'apparecchiatura ad alta velocità, caricandoli elettricamente per contatto e separazione;
- Applicazione di un campo elettrostatico, in cui le particelle vengono esposte a un campo generato da elettrodi ad alta tensione.

Le particelle caricate entrano in un campo elettrostatico controllato. Qui avviene la separazione. Le particelle metalliche, essendo conduttive, perdono rapidamente la carica e vengono attratte o respinte in base alla polarità. Le particelle plastiche, essendo isolanti, trattengono la carica e si comportano diversamente nel campo, spostandosi verso un'area diversa.

Di norma durante tutto il processo vengono utilizzati dei filtri che rimuovono la polvere creata.

Alla fine del processo si ottengono frazioni di:

- Materie plastiche, quali polistirene, cloruro di polivinile e materiale composito, in percentuali che raggiungono il 35% del peso totale del flusso di rifiuti in ingresso
- Metalli comuni tra il 6% e il 10% che saranno, successivamente, destinati a processi di raffinazione. I metalli vengono divisi in categorie granulometriche dalla più fine (<1 mm) costituita principalmente da rame, alla più grossa (fino a 15 mm) costituita principalmente da alluminio
- Materiali ferrosi per circa il 50%
- Polvere fino all'8%

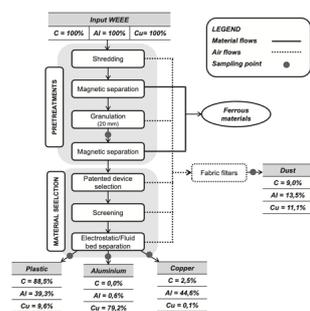


Figura 60- Fasi di pretrattamento dei RAEE (Silvia Fiore, 2018).

Le fasi di pretrattamento dei RAEE svolgono un ruolo chiave nel processo di recupero e riciclo dei materiali. È stato dimostrato, infatti, come la maggior parte delle perdite si verifichi in questa fase e che, data la redditività proveniente dal recupero dei metalli presenti nei RAEE, risulta necessario svolgere correttamente tali processi per poter recuperare il maggior numero possibile di risorse preziose.

5.2 Lavorazione finale

La lavorazione finale comprende processi attuati con l'obiettivo di recuperare i metalli preziosi, quali oro, argento, rame e palladio, ottenuti a seguito delle fasi di pretrattamento dei rifiuti. I processi maggiormente impiegati sono la pirometallurgia, l'idrometallurgia e la biometallurgia (Lingen Zhang, 2016).

Il processo di pirometallurgia prevede la fusione del materiale in un forno ad alta temperatura in modo tale da ottenere una miscela di metalli che verranno, a seguito, raffinati tramite l'elettroraffinazione.

L'elettroraffinazione è un processo elettrochimico utilizzato per purificare metalli grezzi (ottenuti da minerali o da scarti metallici) e ottenere metalli di elevata purezza. Questo metodo sfrutta il principio dell'elettrolisi, in cui una corrente elettrica viene applicata per separare il metallo puro dalle impurità presenti.

Vengono utilizzati un anodo (l'elettrodo positivo) costituito dal metallo grezzo da purificare, un catodo (l'elettrodo negativo) costituito generalmente da una lamina di metallo puro o materiale inerte e una soluzione elettrolitica, ovvero una soluzione contenente i sali del metallo da raffinare. Il principio di funzionamento è basato sull'applicazione di una corrente continua che provoca l'ossidazione dell'anodo, rilasciando ioni metallici, mentre i metalli puri si depositano sul catodo.

In questo modo le impurità non metalliche si accumulano sul fondo della cella elettrolitica, mentre le impurità metalliche rimangono nell'elettrolita.

Il problema principale di questo trattamento è la generazione di metalli volatili che causano problemi di salute e ambientali.

Il trattamento idrometallurgico sfrutta soluzioni chimiche per dissolvere i metalli, applicando il processo di lisciviazione dei materiali con varie sostanze chimiche per sciogliere i metalli preziosi presenti. Per farlo vengono utilizzati agenti liscivianti specifici per separare i metalli dal materiale di scarto e purificarli mediante l'eletto-estrazione, anch'esso basato sui principi dell'elettrolisi.

Le soluzioni chimiche, dette appunto liscivianti, servono per dissolvere i metalli presenti nel materiale da trattare, separandoli dal resto. Le soluzioni liscivianti dissolvono i metalli, trasformandoli in forme ioniche solubili.

Per ciascun metallo si utilizza un particolare agente lisciviante: per i metalli di base si utilizza l'acido nitrico, per il rame l'acido solforico, per l'oro e l'argento il cianuro e per il palladio l'acido cloridrico. Questo metodo è sicuramente più preciso e facilmente controllabile, ma richiede molto tempo e un alto consumo di reagenti.

La biometallurgia, infine, è il processo più rispettoso dell'ambiente in cui il processo di lisciviazione viene attuato utilizzando dei microrganismi, come funghi o batteri, che producono sostanze chimiche, come acidi organici o enzimi, per attaccare i metalli presenti. Il microbo attualmente più utilizzato per il rame e l'oro è il batterio acidofilo (*Thiobacillus Ferrooxidans*) che producono acidi in grado di dissolvere i metalli nella soluzione. Una volta disciolti, i metalli possono essere recuperati tramite elettrolisi o altri metodi chimici. L'utilizzo di microbi permette di ridurre l'utilizzo di sostanze chimiche risultando, così, più rispettoso dell'ambiente, ma è ancora molto poco impiegato per la difficile sostenibilità su scala industriale e richiede, inoltre, tempi elevati, arrivando addirittura a settimane.

5.2.1 Pratiche di riciclo dei Printed Circuit Board

I PCB (*Printed Circuit Board*) o circuiti stampati sono un componente fondamentale negli apparecchi elettrici ed elettronici, utilizzati per sostenere meccanicamente e collegare elettronicamente i diversi componenti elettronici presenti negli AEE.

Esistono due tipologie di PCB: FR-4 e FR-2. Il tipo FR-4 viene impiegato nei piccoli dispositivi come i cellulari, è composto da un multistrato di resina e fibra di vetro rivestita con uno strato di rame ed è, tipicamente, di colore verde. Il tipo FR-2, invece, viene impiegato nei televisori ed elettrodomestici, è composto da un singolo strato in fibra di vetro rivestito da uno strato di rame ed è di colore giallo/marrone. La tipologia FR-4 ha un valore superiore rispetto ai FR-2.

In generale, sono costituiti da tre strati: un substrato laminato o non conduttivo, un substrato conduttore in rame e uno strato di connettori e condensatori collegati.

I PCB rappresentano la parte economicamente più profittevole dei RAEE, incorporando una parte significativa del valore, e costituiscono dal 3% al 6% della loro massa (Federica Cucchiella, 2015). I PCB, infatti, sono una miscela di molti materiali essendo composti da più di venti tipologie diverse di metalli preziosi, tra cui oro, argento e platino, di base, quali rame, alluminio e acciaio e tossici, come arsenico, mercurio, piombo, terre rare e ritardanti di fiamma, nonché ceramica e plastica. Entrando nel dettaglio, i PCB sono composti per quasi il 30% da rame, 10-20% da piombo, 1-5% da nichel, 1-3% da ferro, 1-3% da argento e 0,05% da oro (Kaya, 2016).

La restante parte, il 70%, è composta da materiali non metallici di riempimento, quali plastica e ceramiche, dal basso valore economico.

Metals about 40%	(%)	Ceramics about 30%	(%)	Plastics about 30%	(%)
Cu	6-27	SiO ₂	15-30	PE	10-16
Fe	1.2-8.0	Al ₂ O ₃	6.0-9.4	PP	4.8
Al	2.0-7.2	Alkali-earthoxides	6.0	PS	4.8
Sn	1.0-5.6	Titanates-micas	3.0	Epoxy	4.8
Pb	1.0-4.2			PVC	2.4
Ni	0.3-5.4			PTPE	2.4
Zn	0.2-2.2			Nylon	0.9
Sb	0.1-0.4				
Au (ppm)	250-2050				
Ag (ppm)	110-4500				
Pd (ppm)	50-4000				
Pt (ppm)	5-30				
Co (ppm)	1-4000				

Tabella 6 - Composizione dei PCB (Kaya, 2016).

I PCB, come già detto, contengono una grande frazione di metalli preziosi presenti nei RAEE, arrivando addirittura a contenere tra 80 e 1500 g di argento e tra i 160 e 210 kg di rame in 1 tonnellata di PCB.

Risulta, pertanto, chiaro che, data la purezza e la quantità di materiali preziosi presenti al loro interno, sia economicamente vantaggioso il loro riciclo, nonostante la presenza di materiali tossici e pericolosi, potenzialmente dannosi per l'ecosistema durante i processi di trattamento dei rifiuti.

Nonostante il potenziale valore economico dei PCB dato dalla loro composizione, ad oggi l'attuale riciclo risulta molto impegnativo a causa della complessa struttura fisica di questi, generando una perdita di oltre il 40%. Bisogna sottolineare, infatti, come la composizione, dimensione e forma dei PCB cambi continuamente, rendendo sempre più complesso definire un processo stabile.

Dal punto di vista tecnologico, le attuali tecnologie di lavorazione dei PCB sono processi che richiedono un elevato dispendio di energia, garantendo il recupero di solo il 30-35% dei metalli presenti al loro interno, con livelli di purezza compresi fra l'85% e il 95% a seconda dell'elemento. I materiali rimanenti, quali terre rare e le frazioni non metalliche di plastica e ceramica, non vengono ancora recuperati, ma finiscono spesso per essere inceneriti. È proprio la presenza di materiali non metallici a rendere difficile la separazione dei metalli, ma anche uno dei motivi che ne rende essenziale la corretta gestione a causa del loro potenziale rischio per l'ambiente e la salute (Amirhossein Andooz, 2021).

Il processo di trattamento dei PCB è analogo a quello dei RAEE già analizzato nel paragrafo §5 e comprende tre fasi:

1. Pre-trattamento, composto dall'analisi della composizione e smontaggio selettivo manuale o automatico per separare le parti riutilizzabili da quelle tossiche mediante dissaldatura termica o chimica;
2. Riduzione delle dimensioni e separazione dei materiali mediante trattamenti meccanici o fisici, come la triturazione, frantumazione e polverizzazione;
3. Trattamento finale metallurgico o chimico, raffinazione e purificazione.

I processi di trattamento possono essere di tre tipologie diverse:

1. Fisici;
2. Chimici;
3. Metallurgici

alla fine dei quali vi è la fase di purificazione, attraverso cui il valore dei metalli può essere recuperato mediante tecniche di purificazione come l'estrazione liquido-liquido, la precipitazione e la raffinazione elettrolitica.

5.2.1.1 Processi fisici

I processi fisici vengono impiegati principalmente nella prima fase tramite i quali i metalli e i non metalli vengono separati. Le tecniche principali di recupero fisico includono la frantumazione a secco, polverizzazione, classificazione e separazione elettrostatica ad alta tensione per ottenere una miscela di polvere metallica conduttrice composta da rame, piombo, zinco, alluminio, argento, ecc. e una miscela di polvere di resina non metallica che è, invece, non conduttrice. Data l'elevata generazione di polvere, per contrastare il potenziale inquinamento vengono utilizzate attrezzature per la rimozione, quali cicloni e purificatori d'aria. I processi di trattamento fisico sono caratterizzati da un basso costo e un'elevata efficienza di separazione che può raggiungere anche il 99%, ma, di contro, da un'elevata percentuale di perdita del valore dei metalli di circa il 10-35%.

I processi maggiormente impiegati sono:

1. Smantellamento manuale, automatizzato e semiautomatizzato.

Lo smantellamento consiste nella rimozione di componenti e parti dai rifiuti. Attualmente i componenti vengono uniti tramite fissaggi ad esempio con viti, inserimenti, saldature, rilegature, avvolgimenti e placature, da cui dipenderà l'intensità energetica necessaria per separare i metalli dagli altri materiali come plastica e ceramica. In linea generale, i materiali bloccati attraverso fissaggi, inserimenti o avvolgimenti possono essere facilmente staccati. I materiali bloccati mediante, invece, saldature e rilegature sono più difficili da separare, specialmente i materiali uniti mediante leghe.

Esistono due tipologie di smantellamento:

- Manuale
- Automatico

Lo smantellamento manuale richiede di riscaldare la saldatura al di sopra del punto di fusione e il successivo impiego di scalpelli e martelli per aprire le connessioni e separare i vari tipi di metalli. In questo modo i circuiti elettrici riutilizzabili separati vengono rivenduti, mentre le restanti parti dei PCB vengono portate ad alte temperature su piastre al fine di sciogliere i componenti riscaldati. Questo processo è ad oggi vietato a causa dei fumi tossici prodotti.

Per questo riguarda, di contro, lo smantellamento automatico questo si suddivide in simultaneo o selettivo. Nello smantellamento selettivo, come suggerisce il termine, i componenti specifici vengono determinati e smontati singolarmente ed è per questo che viene anche detto “*look and pick*”, il cui obiettivo è quello di riutilizzare i componenti dal valore elevato per preservarne il valore e di separare i componenti pericolosi.

Nello smantellamento simultaneo, invece, l'intero PCB viene riscaldato e di conseguenza tutti i componenti verranno trattati contemporaneamente. Successivamente, i componenti vengono identificati e ordinati in base a criteri geometrici e fisici secondo il principio detto “*evacuate and sort*”. Lo smantellamento simultaneo ha un'elevata efficienza, ma anche un rischio più elevato di danneggiare i componenti.

2. Triturazione o schiacciamento per il rilascio di frazioni metalliche e non metalliche, con lo scopo principale di rimuovere i metalli dai PCB e liberarli dai materiali di rivestimento quali resine e plastiche.

La frantumazione garantisce un'ulteriore efficienza selettiva e, conseguentemente, un miglior recupero dei PCB.

Per questa fase vengono utilizzati principalmente frantoi a martello, rotanti, a disco e trituratori.

La triturazione, tuttavia, può portare alla perdita del 40% dei metalli e alla formazione di polveri metalliche sottili pericolose, motivo per il quale è fondamentale l'utilizzo di un sistema per la raccolta della polvere.

3. Setacciatura per la classificazione.

Durante la fase di separazione per dimensioni, viene utilizzato un setaccio in grado di classificare le particelle di varie dimensioni. Le particelle di metallo, infatti, hanno proprietà di forma diverse da quelle di plastica e ceramica. La setacciatura viene utilizzata sia per raccogliere le particelle con proprietà di dimensioni uniformi che verranno poi spedite ad un determinato processo, sia per migliorare il contenuto dei metalli.

4. Determinazione della composizione chimica.

Attualmente non sono presenti standard procedurali per la determinazione della composizione chimica dei PCB, ma le tecniche conosciute impiegate sono lo spettrofotometro ad assorbimento atomico, lo spettrofotometro al plasma accoppiato induttivamente, lo spettrometro di massa, la fluorescenza dei raggi X e la diffrazione dei raggi X. Tali tecniche sono generalmente utili a fornire informazioni qualitative, mentre per le analisi quantitative possono generare molti errori a causa dei campioni molto eterogenei.

5. Separazione gravitazionale

La separazione gravitazionale si basa sulle diverse densità e dimensioni specifiche di ciascun materiale. Grazie ai principi gravitazionali è possibile separare i materiali con densità diverse per il loro movimento specifico causato dalla gravità. Oltre alla forza gravitazionale, vengono impiegati diversi fluidi, come aria e acqua, o fluidi pesanti, che esercitano una forza per separare i materiali. Tale pratica è parecchio impiegata nei PCB, sfruttando le diverse composizioni dei materiali presenti. Infatti, all'interno dei PCB è possibile trovare plastica con densità inferiore a 2,0 g/cm³, metalli leggeri come alluminio e vetro con densità di circa 2,7 g/cm³ e metalli pesanti come il rame con una densità superiore a 7g/cm³.

6. Separazione magnetica

La separazione magnetica viene applicata per separare e, quindi, recuperare le particelle metalliche magnetiche, ossia ferrose, da quelle non magnetiche, quali ad esempio plastica e ceramica. Tra i separatori magnetici più utilizzati vi è il separatore a tamburo a bassa intensità. Tuttavia, il problema principale di tale trattamento è rappresentato dall'agglomerato di particelle attaccate alle frazioni ferrose, abbassando notevolmente l'efficienza del processo e generando impurità nella frazione magnetica separata.

7. Separazione elettrostatica

Il processo di separazione elettrostatica si basa sulle diverse conduttività elettriche, o resistività, dei diversi materiali. La capacità di separazione, in questo caso, dipende dalla differenza di polarità e dall'induzione di carica acquisita dalle particelle di materiale da separare.

Esistono tre tipologie di separazione elettrostatica: la separazione elettrostatica della corona, la separazione triboelettrica e la separazione della corrente di vortice. In particolare, la separazione della corona ha maggiore successo, maggiore è la differenza di conduttività delle particelle. Attualmente questo è il processo più rispettoso dell'ambiente, non producendo acqua reflue ed emissioni gassose. La separazione triboelettrica è, a differenza della precedente, più indicata per le particelle che hanno una conduttività simile. La separazione della corrente di vortice, infine, si basa sui principi della forza gravitazionale, centrifuga, di attrito e magnetica, la quale consente la deviazione delle particelle ferrose e viene utilizzata principalmente per recuperare l'alluminio.

5.2.1.2 *Processi chimici*

Il processo di recupero chimico si basa sulla scomposizione dei polimeri di scarto nei loro monomeri o in altre sostanze chimiche utili per mezzo di reazioni chimiche, al fine di convertirli in materie prime o combustibili chimici. Questo permette di separare i materiali metallici da quelli organici. Le tecniche principali sono: la pirolisi, la gassificazione, la depolimerizzazione mediante fluidi supercritici e i processi di degradazione a idrogeno. Il processo di pirolisi, nel dettaglio, comporta la distruzione della resina da alcuni polimeri. Infatti, i materiali organici vengono decomposti in sostanze a basso peso molecolare che possono essere utilizzati come combustibili, mentre i componenti inorganici rimangono solidi relativamente non alterati e, pertanto, possono essere riciclati. Il principale problema, tuttavia, è il potenziale inquinamento di tali processi.

5.2.1.3 *Processi metallurgici*

I processi metallurgici vengono impiegati nelle fasi di raffinazione dei rifiuti lungo la catena di riciclo. In questi processi i metalli vengono sciolti dal calore tramite processi pirometallurgici, o da un liquido mediante processi idro-metallurgici e, successivamente, vengono raggruppati grazie alle loro proprietà metallurgiche. Il difetto delle tecniche metallurgiche risiede nella generazione di grandi quantità di scorie, nella perdita di metalli preziosi e nella difficoltà di recupero di metalli quali alluminio e ferro.

Il processo pirometallurgico include l'incenerimento, la fusione in forni e tostatura ad alta temperatura in presenza di gas per recuperare soprattutto i metalli non ferrosi e ha la qualità di poter accettare qualunque rottame.

Il processo idrometallurgico, invece, permette un recupero più selettivo dei metalli nei PCB di scarto perché più facile controllare la reazione. I processi variano a seconda del materiale, ma tutti hanno meno rischi ambientali, anche se generano grandi quantità di liquidi, e sono più redditizi in quanto consentono di estrarre la frazione metallica dei PCB, che è proprio quella più redditizia. Negli ultimi anni si stanno sviluppando anche tecnologie incentrate sulla biometallurgia, sfruttando l'utilizzo di microrganismi per estrarre metalli generando acidi organici.

Questa tecnica ha un notevole potenziale sia in termini di impatto ambientale, che in termini di selettività dei metalli estratti, grazie soprattutto alle basse temperature e all'utilizzo di microrganismi.

5.2.2 Pratiche di riciclo della plastica nei RAEE

Come visto nel capitolo §2.2 la plastica rappresenta una frazione molto importante dei RAEE, raggiungendo un volume complessivo di oltre 17 miliardi di kg. Dati l'elevata quantità di materiale e il notevole risparmio energetico e di CO₂ che deriva dal riciclo, rispetto alla produzione di materie plastiche vergini, diventa sempre di maggiore importanza il tema di riciclo della plastica, con particolare attenzione al corretto trattamento di questa, data la presenza di sostanze tossiche come i ritardanti di fiamma (F. Wagner, 2019). Ad oggi l'attuale tasso di riciclo risulta poco più del 55% della plastica presente nei RAEE, ma di queste la maggior parte delle sostanze tossiche viene eliminata, lasciando all'interno del flusso di materiale riciclato solo il 2% dei ritardanti di fiamma presenti. Ciò significa che i processi di riciclo della plastica impiegati sono efficaci nella rimozione di tali sostanze che, di conseguenza, non entrano nel percorso ufficiale di raccolta e riciclo dei RAEE.

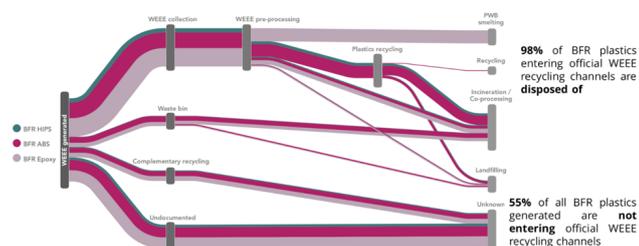


Figura 61 - Riciclo della plastica nei RAEE (F. Wagner, 2019).

Le tecnologie utilizzate per il riciclo della plastica nei RAEE includono lo smistamento, il lavaggio, la purificazione e la trasformazione, tutte basate sulle tecnologie a sensori, ovvero a infrarossi, a raggi X e a fluorescenza. I processi principali si basano su principi fisici o chimici, in cui rientrano la separazione sink-float o elettrostatica. Non è possibile, ad esempio, adoperare il processo di separazione della densità in quanto la densità delle materie plastiche bromurate è pari a 1,14-1,40 g/cm³ interferisce con quella delle materie plastiche riciclabili come la poliammide PA (1,1-1,2 g/cm³), il polimetilmetacrilato PMMA (1,12-1,20 g/cm³), il polipropilene (1,25-1,30 g/cm³) e il policarbonato (1,17-1,22 g/cm³).

Un ulteriore fattore che rende rilevante il processo di riciclo della plastica è la presenza di carbonio e alluminio nel flusso della plastica. Infatti, circa il 90% del carbonio presente nei RAEE è stato rilevato nelle frazioni plastiche, dimostrando l'efficacia dei processi di separazione delle materie plastiche da quelle metalliche. Solo il 10%, infatti, è stato identificato nelle frazioni metalliche e nella polvere proveniente dalle fasi iniziali di trattamento dei RAEE.

Per quanto riguarda l'alluminio, invece, quasi il 40% dell'alluminio proveniente dai RAEE entra nella frazione plastica.

Di contro, il processo di riciclo della plastica viene limitato dalla presenza di materie quali gomma e legno che vengono, in parte, eliminate nelle fasi di lavaggio e filtraggio.

5.3 Caso studio di elettrodomestici di raffreddamento e congelamento

Un esempio chiave del connubio fra il design dei prodotti introdotto nel capitolo §1 e le tecniche di trattamento di fine vita analizzate nel capitolo §5 è rappresentato dai dispositivi domestici di raffreddamento e congelamento, quali frigoriferi, congelatori e condizionatori. Gli apparecchi di refrigerazione sono prodotti con diverse peculiarità come: design personalizzato, elevata gamma di dimensioni, contenuto di componenti elettronici complessi e parti difficili da trattare e riciclare. È anche riconosciuto che un'accurata "progettazione per lo smontaggio" degli apparecchi di refrigerazione, o di alcuni dei loro componenti, può contribuire a migliorare il riciclo dei rifiuti in termini di efficienza e redditività economica e a ridurre l'impatto sull'esaurimento delle risorse.

Nel 2022 sono stati generati 13,3 miliardi di kg di rifiuti appartenenti alla categoria degli apparecchi di scambio termico, ovvero il 21,3% del totale dei RAEE prodotti nel mondo a cui corrispondono, inevitabilmente, impatti ambientali. Ricerche e studi hanno dimostrato che la maggior parte dell'impatto ambientale di questi apparecchi era dovuto all'uso di liquidi refrigeranti come clorofluorocarburi (CFC) e idroclorofluorocarburi (HCFC). Queste sostanze sono state identificate come sostanze che danneggiano l'ozono.

In aggiunta, contengono molte altre sostanze pericolose come: mercurio (in interruttori e lampade), piombo e cadmio (in batterie, condensatori e altri componenti elettronici). Contengono anche varie risorse preziose, tra cui metalli di base, plastica, metalli rari e preziosi.

Attualmente la vita media dei dispositivi domestici di scambio termico ha una media di 14 -15 anni e il loro tasso di raccolta ammonta al 27%, ovvero 3,6 miliardi di kg. Un tale basso tasso di raccolta potrebbe essere in parte spiegato dalla combinazione della crescente quantità di prodotti immessi sul mercato e l'importanza del mercato dell'usato o delle spedizioni illegali di rifiuti.

Il trattamento degli elettrodomestici a fine vita è dato dalla combinazione di pretrattamenti, seguiti da triturazione e selezione meccanica (Fulvio Ardente, 2015). È stato stimato che la lavorazione combinata di smontaggio e triturazione

dei frigoriferi ha il più alto tasso di recupero (più dell'80% in peso). Si stima che il tasso di recupero delle cabine dei frigoriferi possa raggiungere il 98% utilizzando impianti ad alta efficienza, presentando, tuttavia, difficoltà nel riciclare la plastica nei frigoriferi a causa della loro grande varietà e delle loro contaminazioni dopo la triturazione con pezzi di metallo fini. Molteplici studi hanno dimostrato che l'aumento del recupero delle vetrine refrigerate potrebbe impedire la generazione di circa 144.000 tonnellate di CO₂eq/anno, che è equivalente alle emissioni medie annue di quasi 50.000 auto.

Il processo più difficile durante il riciclo degli elettrodomestici è la corretta estrazione e trattamento di refrigeranti e schiume isolanti, che possono entrambi contenere sostanze che danneggiano l'ozono. Gli HFC richiedono quindi anche la loro corretta estrazione. Le restrizioni e i requisiti delle direttive su questi materiali hanno anche stimolato l'uso di alcuni idrocarburi come refrigeranti (ad esempio isobutano) e come agenti soffianti (ad esempio ciclopentano) nell'isolamento in. Questi idrocarburi sono caratterizzati da un'elevata infiammabilità. Al fine di ridurre i rischi di incendio o esplosione durante il riciclo, devono essere applicate procedure e trattamenti speciali nell'impianto di riciclo.

5.3.1 Processo di trattamento degli elettrodomestici di raffreddamento e congelamento

Una volta negli impianti di riciclo, le apparecchiature di scambio termico sono raggruppate in lotti omogenei con componenti e composizione materiale simili per facilitare la loro manipolazione e ottimizzare i processi di riciclo (Fulvio Ardente, 2015).

Il trattamento di fine vita può essere formalizzato in 4 fasi principali:

1. pretrattamento,
2. riduzione delle dimensioni,
3. triturazione
4. smistamento meccanico per il riciclo/recupero di vari materiali.

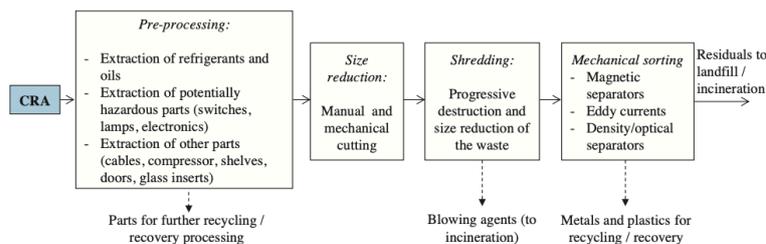


Figura 62 - Processo di trattamento delle apparecchiature di scambio termico (Fulvio Ardente, 2015).

- La preelaborazione consiste nella successiva rimozione manuale di alcuni componenti e/o materiale per ulteriori trattamenti. Questa fase ha un ruolo chiave nel riciclo dei RAEE poiché consente di rispettare la legislazione vigente in materia di sostanze pericolose e rifiuti, evitando potenziali contaminazioni di altre frazioni riciclabili durante le operazioni di riciclo, facilitare e in alcuni casi consentire il recupero di alcuni materiali preziosi ed evitare possibili danni all'impianto nelle fasi successive.

In generale, i gas e gli oli refrigeranti vengono estratti dal circuito di refrigerazione perforando i circuiti e poi aspirandoli via: entrambe le sostanze vengono raccolte e immagazzinate separatamente. In questa fase vengono estratti anche compressori, scaffali e cavi elettrici. Componenti come porte in vetro, componenti elettronici (ad esempio circuiti stampati,

condensatori, interruttori, termostati, display a cristalli liquidi) e sistemi di illuminazione (lampade a scarica di gas) vengono, inoltre, smontati.

- Le apparecchiature vengono, successivamente, ridotte in pezzi più piccoli mediante lavorazione manuale e meccanica per essere introdotte nei trituratori. Di solito devono essere eliminate alcune parti dure, come rinforzi di ferro, prima della triturazione.
- Il terzo passo include l'introduzione dei rifiuti attraverso una serie di trituratori, che li riducono progressivamente in piccoli pezzi da 1 cm a 10 cm. Gli agenti soffianti, quali CFC, HCF e idrocarburi contenuti nelle schiume isolanti vengono solitamente drenati durante la prima fase di triturazione. Pertanto, la triturazione iniziale viene effettuata in un'atmosfera chiusa per evitare emissioni dei gas nell'ambiente. In questa fase viene iniettato un gas di azoto nella camera per ridurre i rischi di esplosioni quando la concentrazione di queste sostanze è eccessiva.
- Infine, viene eseguito lo smistamento di vari materiali con tecnologie diverse. I principali materiali preziosi che vengono ottenuti includono i metalli ferrosi (ordinati per separazione magnetica), i metalli non ferrosi (rame, alluminio e zinco ordinati da separatori di corrente a vortice) e alcune materie plastiche (principalmente PS e ABS ordinati da separatori di densità). Questi si sommano ai materiali e alle parti selezionate durante la preelaborazione. I materiali non riciclabili come le schiume vengono solitamente inceneriti con recupero di energia o in discarica.

Le principali criticità del processo di trattamento di tali apparecchiature risiedono in quattro punti principali:

- a. Le grandi dimensioni e la composizione possono causare problemi durante la raccolta, il trasporto e la movimentazione dei rifiuti presso l'impianto di riciclo. Il trasporto e la movimentazione possono anche causare problemi di sicurezza per i lavoratori, problemi ambientali (ad esempio a causa del rischio di rottura accidentale del circuito di refrigerazione durante il trasporto e il rilascio di sostanze inquinanti) e costi elevati. Le difficoltà maggiori sono, tuttavia, legate alle dimensioni e alla capacità dei trituratori installati negli impianti di riciclo e al loro sistema di carico e capacità.
- b. La presenza di oli e refrigeranti. La corretta gestione dei refrigeranti è, infatti, molto importante durante il riciclo degli apparecchi di refrigerazione. I dispositivi devono essere accuratamente manipolati durante la raccolta e il trattamento per evitare perdite. Quando raggiungono l'impianto di riciclo, i refrigeranti e gli oli vengono estratti e conservati per ulteriori trattamenti. L'estrazione di queste sostanze dovrebbe essere eseguita con attenzione al fine di ridurre i rischi di rottura accidentale del circuito di refrigerazione e di dispersione nell'ambiente, in conformità anche con la legislazione e gli standard ambientali e di sicurezza. L'estrazione e il riciclo di refrigeranti alternativi, come l'anidride carbonica (CO₂) e l'ammoniaca (NH₃) potrebbe anche causare alcuni ulteriori problemi di sicurezza perché i frigoriferi con CO₂ funzionano ad alta pressione, mentre l'NH₃ è una sostanza tossica.
- c. Presenza di parti difficili da trattare o contenenti materiali preziosi. Il riciclo del CRA richiede anche la lavorazione di altre parti potenzialmente pericolose, tra cui vari componenti elettrici ed elettronici. Secondo la direttiva RAEE i seguenti componenti, quando presenti, dovrebbero essere separati dalle altre frazioni riciclabili: circuiti stampati (PCB) più grandi di 10 cm²; grandi condensatori elettrolitici contenenti sostanze pericolose; LCD più grande di 100 cm²; interruttori o lampade di retroilluminazione contenenti mercurio; lampade a gas; batterie. Gli elettrodomestici moderni stanno progressivamente adottando sistemi di illuminazione a diodi emettitori di luce (LED) che potrebbero essere problematici a causa del

potenziale contenuto di sostanze pericolose, come arsenico, piombo, gallio, indio e antimonio, che hanno il potenziale per causare effetti sulla salute umana e tossicità ecologica. Questi componenti possono contenere diversi metalli preziosi e scarsi, ma anche alcune materie prime critiche: oro, argento, palladio, platino (in PCB), indio (in LCD); terre rare (in lampade fluorescenti e PCB); e tantalio (in condensatori). Possono anche contenere varie sostanze pericolose come mercurio, arsenico, antimonio, berillio, cadmio e piombo. Se i componenti non vengono maneggiati ed estratti in modo appropriato, tutti i materiali e le sostanze vengono dispersi in altre frazioni riciclabili. Inoltre, i materiali duri come le parti in vetro devono essere estratti preventivamente per evitare potenziali danni alle lame del trituratore. L'estrazione manuale di materiali duri può, tuttavia, causare rischi per la sicurezza dei lavoratori.

- d. Infine, la presenza di schiume isolanti. Durante il processo di recupero, la separazione delle schiume isolanti, in particolare del poliuretano (PUR), è più difficile rispetto ad altri materiali isolanti. L'isolamento delle schiume può produrre polveri fini che contaminano altri materiali (ad esempio frazioni metalliche) e riducono la loro riciclabilità e il loro valore. La separazione delle schiume isolanti può avvenire prima della triturazione (durante la preelaborazione manuale) o dopo la triturazione (con alcuni separatori di densità). Le schiume PUR contengono generalmente alcuni gas utilizzati come agenti soffianti che devono essere separati e trattati in modo specifico (ad esempio triturazione in ambienti chiusi e controllati). Questi gas rimangono nelle celle di schiuma e contribuiscono alle prestazioni termiche dell'isolamento. Attualmente vengono utilizzati come agenti di soffiaggio HFC, CO₂ e alcuni idrocarburi. La schiuma isolante per frigoriferi contenente agenti di soffiaggio di idrocarburi viene, infatti, classificata come "rifiuto pericoloso" perché altamente infiammabile. A causa di tale infiammabilità, la triturazione e la selezione delle schiume vengono eseguite in camere ermeticamente sigillate sotto una sfera

atmosferica controllata (atmosfera a basso contenuto di ossigeno piena di gas azoto inerte).

Il caso studio degli elettrodomestici di raffreddamento e congelamento è un esempio eclatante, sia di come vengano attuate nella realtà le tecniche e tecnologie spiegate nel capitolo §5, sia di come una corretta progettazione dei dispositivi, attenta ai processi di trattamento a fine vita, possa facilitare il processo di trattamento, garantendo un maggiore tasso di recupero e minori effetti dannosi per l'ambiente.

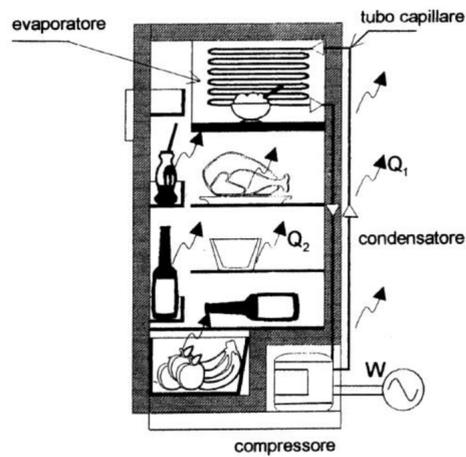


Figura 63 - Composizione di un apparecchio di scambio termico (Fulvio Ardente, 2015).

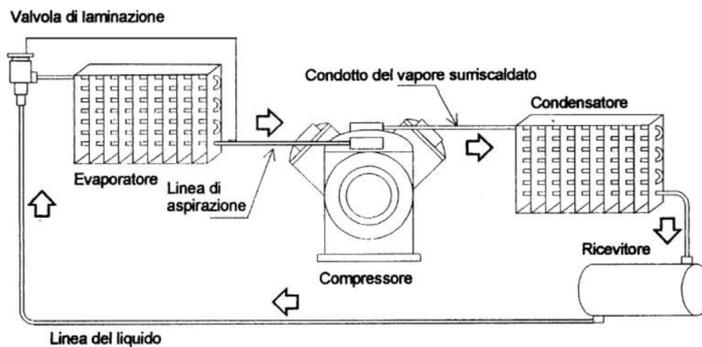


Figura 64 - Componenti di un apparecchio di scambio termico (Fulvio Ardente, 2015).

5.3.2 Processo di trattamento dei grandi elettrodomestici

I grandi elettrodomestici quali, ad esempio, lavatrici e lavastoviglie, subiscono un processo di trattamento analogo a quello dei dispositivi di scambio termico analizzato nel paragrafo precedente. Come visto nel paragrafo §2.2.3.2 le lavatrici contengono una quantità significativa di acciaio, alluminio, ferro, rame cemento e plastiche. Tutti questi materiali rappresentano un'elevata fonte di tossicità se dispersi nell'ambiente in maniera scorretta, richiedendo anni per la degradazione e rilasciando sostanze pericolose nel terreno, soprattutto a causa della loro ossidazione.

Data la fonte, non solo di potenziale tossicità, ma in particolare di risorse preziose, i grandi elettrodomestici, dopo la raccolta e il trasporto negli impianti specializzati, subiscono la prima fase di trattamento: il trattamento preliminare. Durante questa fase gli elettrodomestici vengono ispezionati per verificare eventuali danni o perdite di oli lubrificanti e separare i componenti riciclabili da quelli pericolosi.

Successivamente, si passa alla fase di smantellamento, separazione ed eventuale triturazione delle parti che non possono essere riutilizzate, ma dalle quali è possibile ricavarne le materie prime.

In particolare, se si prende come esempio una lavatrice, questa viene smontata per separare i materiali principali:

- Sportelli, cerniere e parti in plastica;
- Motore e altri componenti elettrici che contengono rame, alluminio, ferro ed altri materiali preziosi;
- Contrappesi in cemento o ghisa, che vengono frantumati e destinati molto spesso al settore delle costruzioni o fonderie.

Il prodotto ottenuto dalla fase di triturazione viene lavorato e separato secondo i processi meccanici, fisici o chimici esplicitati nel paragrafo §5.

Infine, dopo la separazione, i diversi materiali ottenuti dalla separazione subiscono specifici trattamenti per recuperarne il valore e poterli riutilizzare e rivendere.

Tuttavia, anche all'interno dei grandi elettrodomestici sono presenti parti e componenti non recuperabili che devono essere smaltite in discariche controllate per non generare danni ambientali.

5.4 Riutilizzo delle apparecchiature elettriche ed elettroniche

I dati e i processi di trattamento ufficialmente documentati dei RAEE raccolti riguardano per lo più le operazioni di riciclo utilizzati, quali ad esempio, come visto nel capitolo §5, processi meccanici come lo smontaggio manuale e la triturazione per estrarre i componenti, in particolare metalli ferrosi e metalli non ferrosi, vetro e plastica (O.S. Shittu, 2021).

Tuttavia, il riciclo dei prodotti non utilizza il potenziale valore di riutilizzo residuo dei prodotti alla fine del loro utilizzo o vita. Per utilizzare questo, è necessario il recupero del prodotto per il riutilizzo.

Le AEE con funzionalità residua, infatti, vengono spesso gettate a favore di versioni più recenti e alla moda. Questi prodotti mantengono il valore funzionale residuo, rendendo il recupero per il riutilizzo il risultato più desiderabile rispetto al classico riciclo dei materiali.

Il riciclo, pur essendo un percorso desiderabile verso la circolarità di materiali e risorse, dovrebbe essere preferito come opzione di gestione, ma solo quando l'opportunità di riutilizzare il prodotto è stata esaurita. Il recupero di AEE è, pertanto, la soluzione migliore per la gestione di prodotti che non sono più richiesti da un individuo ma mantengono la loro funzionalità, consentendone così l'estensione del ciclo di vita dei prodotti.

Questo percorso dovrebbe diventare la prima scelta degli utenti prima del riciclo per evitare la perdita di valore di riutilizzo.

Un prodotto, infatti, mantiene il valore di riciclo finché i componenti sono intatti, mentre il valore di riutilizzo è sensibile al tempo e dipende da fattori come le condizioni fisiche, la riparabilità e la disponibilità di pezzi di ricambio e componenti per la riparazione.

Di contro, il recupero dei dispositivi in questo modo, in particolare dei dispositivi con un alto tasso tecnologico, può essere difficile a causa dei brevi tempi entro i quali diventano obsoleti (cioè l'obsolescenza programmata). Con la rapida evoluzione delle tecnologie, i prodotti stanno raggiungendo l'obsolescenza più velocemente. Oltre a questo, i dispositivi spesso non sono progettati per essere riparati e la loro riutilizzabilità è ridotta.

Infatti, per poter essere riparati e immessi nuovamente nel mercato, è necessario che i dispositivi siano progettati in modo tale da poter essere facilmente smontati e, conseguentemente, sostituire i componenti danneggiati con dei nuovi componenti funzionanti.

Il processo di ricondizionamento viene eseguito dal produttore stesso o da aziende specializzate.

Come prima cosa l'apparecchio viene testato al fine di valutare l'entità di eventuali danni estetici e funzionali e, qualora vi fossero dei difetti, questi vengono riparati o sostituiti utilizzando pezzi nuovi ed originali.

Dopo essere stato igienizzato, il dispositivo, prima di essere reimesso sul mercato viene catalogato secondo le seguenti categorie:

- Come nuovo nel caso in cui, a fronte dei test svolti, non viene rilevato alcun difetto ed è, pertanto, funzionante al 100%;
- Grado A se il dispositivo è funzionante al 100%, ma la sua confezione è stata aperta o vi è un imballo generico. Questo accade soprattutto quando il prodotto non è mai stato utilizzato, ma ha subito danni durante il trasporto o sono stati restituiti al fornitore e non più rivenduti;
- Grado B se sono presenti lievi difetti, specialmente a livello estetico come piccoli graffi e ammaccature, ma mantiene integre le sue funzionalità;
- Grado C se il prodotto presenta danni estetici lievi e segni d'usura funzionali, ma rimane comunque efficiente dal punto di vista tecnologico;
- Grado D se ha evidenti danni estetici, ma è funzionante;
- Grado inferiore a D se il dispositivo non è funzionante e può essere acquistato da tecnici esperti per poter essere riparati.

Il processo di rigenerazione è ampiamente diffuso soprattutto per gli smartphone e gli elettrodomestici, quali in particolar modo frigoriferi, forni, lavatrici e lavastoviglie.

Il ciclo di rigenerazione di tutte le AEE, ma in particolare degli elettrodomestici segue il seguente iter:

1. Diagnosi dello stato di funzionamento dell'elettrodomestico, in modo tale da quantificare l'entità degli eventuali danni estetici e funzionali e stabilire quali pezzi di ricambio sono necessari;
2. Riparazione dei componenti danneggiati sostituendoli con pezzi originali o sistemandoli;
3. Test elettrici e collaudo, in cui viene testata l'effettiva operatività del prodotto a seguito degli interventi eseguiti. Durante il collaudo viene verificato il ciclo di funzionamento per verificare che il processo di rigenerazione sia andato a buon fine;
4. Infine, vi è la pulizia estetica di ogni parte del prodotto, il confezionamento e la spedizione.

6. Bilancio economico e ambientale del trattamento dei RAEE

Il riutilizzo delle apparecchiature elettriche ed elettroniche, nonché il riciclo delle materie prime dai RAEE ha un evidente e importante impatto sia dal punto di vista economico, che da quello ambientale per il mondo intero. Lo scopo principale dell'elaborato risiede nell'analisi economica e ambientale al fine di valutare i benefici e gli svantaggi delle pratiche e tecnologie applicate e analizzate nel riciclo dei RAEE e nel riutilizzo delle apparecchiature che possiedono ancora un valore intrinseco.

6.1 Bilancio economico del riciclo

La valutazione economica complessiva del processo di gestione dei RAEE è stata stimata valutando il tasso di recupero dei metalli presenti al loro interno, i costi di gestione, il valore economico delle emissioni di gas serra generate dai processi e delle emissioni, invece, evitate di gas serra grazie al recupero.

In particolare, il valore generato dal recupero dei metalli è dato dal prodotto delle quantità recuperabili per i loro prezzi.

La figura 65 mostra i prezzi di mercato di alcuni dei principali materiali presenti all'interno dei RAEE nel mondo nel 2022.

Market price of selected critical materials in electronic waste worldwide in 2022 (in U.S. dollars per kilogram)

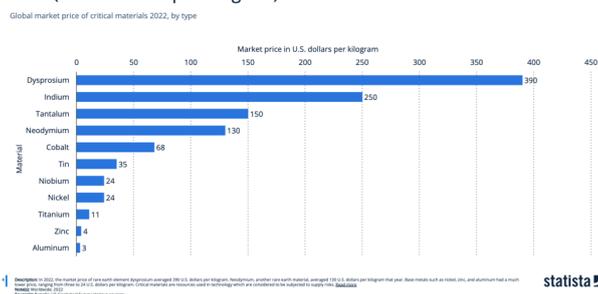


Figura 65 - Prezzi di mercato dei materiali critici nei RAEE nel 2022 (Electronic waste worldwide, 2024).

Dal punto di vista economico i processi di recupero e riciclo dei RAEE sono caratterizzati da costi, specialmente investimenti in nuove attrezzature e tecnologie, e benefici (Patrizia Ghisellini, 2015).

I benefici che ne derivano possono essere distinti in:

- Diretti, quali i ricavi dalla vendita delle materie recuperate, i risparmi di costi dello smaltimento, del recupero di energia e dell'acquisto di materie riciclate a prezzi più bassi rispetto alle materie prime vergini;
- Indiretti, quali l'evitamento di investimenti, l'aumento della sicurezza, l'innovazione e l'incremento di reputazione.

È certo che la sostenibilità di tali processi si basi sulla quantità di materiali che è possibile riciclare. Come visto nel paragrafo §2.3, da tutti i flussi di trattamento dei RAEE sono stati stimati circa 19 miliardi di kg di metalli recuperati, sia comuni come il ferro, che preziosi come l'oro, l'argento e il platino per i quali, seppur presenti in quantità inferiori, il valore elevato di mercato rende sostenibile il loro trattamento.

Diverso è, invece, il discorso per le terre rare le quali, nonostante l'importanza fondamentale per le nuove tecnologie grazie alle loro proprietà uniche quali la generazione di energia rinnovabile, non consentono la sostenibilità su larga scala dei processi di trattamento a causa delle tecnologie poco sviluppate e del prezzo di mercato ancora troppo basso riuscendo a coprire, così, solo l'1% della domanda (Cornelis P. Baldé, 2024).

I più importanti materiali recuperati, quindi ferro, rame, alluminio e platino, provengono principalmente dagli schermi di raccolta e recupero formali. Il settore informale, invece, si stima gestisca circa 12 miliardi di \$ di metalli e recuperi circa 7 miliardi di \$ di metalli.

Nel 2022 il valore economico complessivo dei metalli presenti nei RAEE dato dal prodotto del loro prezzo di mercato con i volumi di materiali presenti è stato stimato intorno ai 91 miliardi di \$. Le fonti principali di valore sono i metalli quali il rame, con un valore totale di 19 miliardi di \$, l'oro con 15 miliardi di \$, il ferro con 16 miliardi di \$ e il nichel con 14 miliardi di dollari. Seguono poi l'alluminio con 11 miliardi di \$, il piombo con 8 miliardi di \$, il rodio con 2,3 miliardi di \$, il cobalto con 2,3 miliardi di \$, lo stagno con 1,4 miliardi di \$ e l'argento con 0,9 miliardi di \$ (Cornelis P. Baldé, 2024).

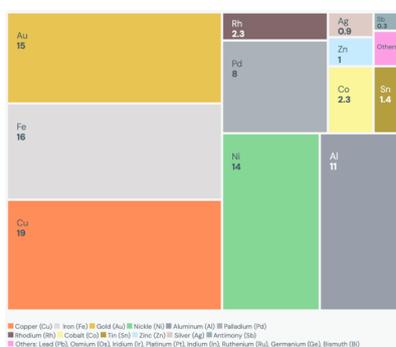


Figura 66 - Valore economico potenziale dei metalli nei RAEE (Cornelis P. Baldé, 2024).

Tuttavia, bisogna ricordare che ad oggi solo il 22,3% dei RAEE viene recuperato, per cui il valore effettivo generato dal recupero delle materie prime ammonta a circa 28 miliardi di \$.

I benefici indiretti, ovvero quelli derivanti soprattutto dal valore monetizzato delle emissioni di gas serra evitate, hanno un valore pari a 23 miliardi di \$.

Quindi i benefici economici della gestione dei RAEE vengono calcolati in termini di recupero dei materiali e di contributo al cambiamento climatico.

Allo stato attuale la gestione dei RAEE, oltre ai benefici, ha anche ingenti costi derivanti dal trattamento dei rifiuti e dai costi esternalizzati sommersi per la società. I costi sono anch'essi, come i benefici, classificabili in diretti e indiretti. Con diretti si intendono i costi sostenuti per il trattamento dei RAEE e ammontano a circa 10 miliardi di \$, nettamente inferiori ai ricavi. La maggior parte di questi costi viene sostenuta dai produttori situati nei paesi in cui vige il regolamento della

Responsabilità Estesa dei Produttori. I costi diretti riguardano principalmente i costi di trattamento dei rifiuti, costi amministrativi e costi per la gestione delle sostanze pericolose.

Di questi 10 miliardi, circa la metà ossia 5 miliardi di \$ è sostenuta per il trattamento dei RAEE in linea con gli standard di salute e rispetto ambientale, per la maggior parte per il raggiungimento degli standard e amministrazione. L'altra metà, invece, riguarda lo smaltimento dei rifiuti al di fuori dei sistemi formali.

La differenza sostanziale risiede nel costo per trattamento dei RAEE nei sistemi formali, in cui ammonta a 0,36\$/kg (variabile a seconda delle tecnologie impiegate) e al di fuori dei sistemi formali, in cui ammonta a 0,12\$/kg, ovvero un terzo.

I costi indiretti, invece, comprendono tutti i costi esternalizzati, ovvero nascosti, per la popolazione e l'ambiente, derivanti dalle emissioni prodotte dai processi di trattamento che contribuiscono al riscaldamento globale e inficiano la salute umana, perdite di plastica e dispersione nell'ambiente di sostanze pericolose non adeguatamente gestite.

Questi costi sorgono maggiormente quando i rifiuti non vengono gestiti in linea con gli standard di salute e sicurezza ambientale. Esempi eclatanti riguardano la triturazione di interi dispositivi insieme a rottami metallici, il rilascio di sostanze pericolose e di gas serra dei refrigeranti nell'ambiente e i rifiuti lasciati in discariche incontrollate.

Il valore dei costi esternalizzati ammonta a circa 78 miliardi di \$, 42 miliardi di \$ sono i costi socioeconomici a lungo termine e ambientali derivanti dall'emissione dei gas serra che causano il cambiamento climatico (Global E-waste monitor 2024 electronic waste rising five times faster documented E-waste recycling, 2024).

Questi 42 miliardi di \$ sono così suddivisi:

- 22 miliardi di \$ rappresentano il costo delle malattie e il valore medio monetizzato della vita lavorativa causato dalle emissioni tossiche;
- 19 miliardi di \$ derivano dal rilascio di rifiuti di plastica nell'ambiente;
- 1 miliardo di \$ dati dal rilascio di piombo nell'ambiente e dai suoi effetti sulla fauna e gli esseri umani.

Entrando nei dettagli i costi medi per il trattamento dei rifiuti, secondo diversi studi, ammonta a circa 372 \$ per 1000 kg di rifiuti che, moltiplicati per i 13,8 miliardi di kg di rifiuti trattati all'interno dei sistemi formali costituisce il totale di circa 5 miliardi di \$.

Per quanto riguarda, invece, il trattamento al di fuori dei sistemi formali, il costo medio ammonta a un terzo del costo all'interno dei sistemi formali, ovvero 100\$ circa per 1000 kg di rifiuti che, moltiplicati per i 48 miliardi di kg di rifiuti trattati, costituisce gli altri 5 miliardi di \$.

I costi socioeconomici e ambientali medi a lungo termine sono dati per la maggior parte dal valore economico delle emissioni di CO2 causate in maggioranza da mercurio, plastica e piombo. Il costo equivalente per kg di mercurio è pari a 712\$, per kg di piombo a 20\$ e per kg di plastica. Le restanti emissioni causate dai processi e da altri materiali ammontano a 250\$ per tonnellata di emissioni equivalenti di CO2.

A fronte di quanto analizzato, il costo monetario annuo complessivo per la gestione dei RAEE nel mondo, dato dal bilancio fra i costi e i benefici, è pari a circa 37 miliardi di \$. Il risultato ottenuto mostra come, seppur i ricavi provenienti dalla vendita di materie prime recuperate siano superiori dei semplici costi operativi, i costi esternalizzati sulla popolazione e l'ambiente rendono ancora negativo l'impatto della gestione dei RAEE a causa dei grandi volumi di rifiuti ancora trattati in maniera scorretta.

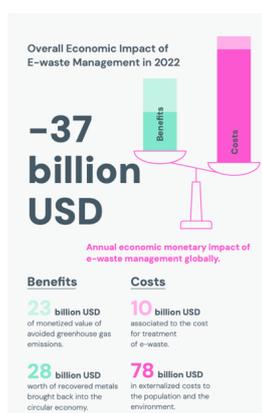


Figura 67 - Bilancio economico del riciclo dei RAEE nel mondo (Cornelis P. Baldé, 2024).

6.1.1 Analisi economica in Italia

In Italia la gestione dei rifiuti è in mano ai Centri di raccolta ed è basata sulle normative vigenti in Italia e in Europa. Nel 2017 il costo medio di gestione e raccolta dei RAEE è stato pari a 190€ per tonnellata che, moltiplicato per 510.708 tonnellate raccolte nel 2023, si raggiungono costi pari a circa 97 milioni di €. Di questi 190€, quasi la metà cioè tra 80 e 100€ provengono dai costi di logistica dei rifiuti

Tuttavia, è bene specificare che lo Stato prevede dei contributi e degli incentivi per la raccolta dei rifiuti, quali ad esempio dei Premi di Efficienza e Premi Incrementali. Nel 2023 sono stati distribuiti premi di efficienza pari a 23.800.000€ (I premi per la gestione virtuosa dei RAEE riconosciuti nel 2023, 2024) arrivando così, ad un netto di 73,2 milioni di €.

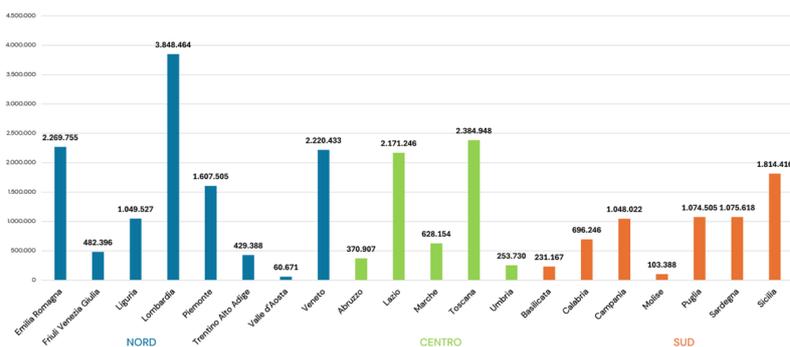


Figura 68 - Premi erogati ai gestori dei centri di raccolta in Italia nel 2023 (www.cdcaee.it, 2024).

Per quanto riguarda, invece, i costi di trattamento dei RAEE, questi variano da 165€/ton per i RAEE non pericolosi a 300 €/ton per i RAEE pericolosi, arrivando ad un prezzo medio di 240€/ton. I ricavi ottenuti, invece, dipendono dai prezzi delle materie prima ottenute dalle pratiche di riciclo. Il ricavo medio stimato varia tra i 120 e i 210 €/ton di RAEE.

6.1.1.1 Impatto economico dei processi di riciclo dei dispositivi di raffreddamento

Gli elettrodomestici costituiscono la categoria con una delle più elevate quantità di rifiuti generati nel mondo. Risulta, pertanto, di particolare interesse svolgere un bilancio economico ad alto livello della convenienza dei processi di riciclo di una tipologia di dispositivi rappresentativa dell'intera categoria, quale è un frigorifero. L'analisi condotta considera la convenienza economica che si può ottenere recuperando e rivendendo le materie prime ottenute dai processi di riciclo, piuttosto che acquistarne di nuove per realizzare un nuovo prodotto.

Nel caso di un frigorifero i principali componenti sono costituiti in ferro, rame, acciaio e plastica.

Nel 2025 il costo del ferro ha raggiunto i 0,102 USD/kg (Prezzo del minerale ferro, 2025), ovvero circa 0,09 €/kg con un tasso di cambio pari a 0,9194 EUR/USD. Considerando un frigorifero che pesa in media 50 kg, è possibile recuperare fino a 25 kg di ferro risparmiando, così, 2,25€ circa.

In modo analogo, da un classico frigorifero si possono recuperare fino a 5 kg di plastica. Il prezzo medio della plastica è pari a 1,57 €/kg, valore che varia a seconda del tipo di plastica, a cui corrisponde di conseguenza un risparmio pari a quasi 8€.

Al 21 marzo 2025, il prezzo del rame è di circa 9.842,5 \$/tonnellata (Prezzo del rame, 2025), ovvero pari a 8,86 EUR/kg. Considerando un peso pari a 3 kg di rame contenuti in un dispositivo, il risparmio è pari a 26,5 €.

Infine, l'acciaio vergine ha un costo pari a 0,72 €/kg da cui deriva un risparmio di circa 10€.

Se, pertanto, si considera un costo medio di trattamento dei RAEE pericolosi pari a 0,30 €/kg che spesso vengono coperti da incentivi statali, si giunge ad un risparmio complessivo di quasi 50€ per singolo dispositivo.

Dall'analisi condotta risulta evidente come riciclare le materie prime, evitando così l'acquisto di nuove materie prime vergini, generi un importante risparmio economico anche rispetto al costo sostenuto per recuperarle dai rifiuti.

Il valore aumenta qualora si decidesse di rivendere tali materie prime ad un valore certamente inferiore al valore dei materiali vergini, ma sicuramente superiore ai costi che si sostengono per ottenerli.

6.1.2 Perdita economica dello scavenging

La pratica dello scavenging spiegata nel paragrafo §4.2 provoca ingenti perdite economiche a causa delle tonnellate di RAEE potenzialmente riciclabili che vengono, invece, smaltiti in discarica. Difatti, a fronte di una perdita di più di 152.000 tonnellate di materiale, corrisponde una perdita di oltre 150 milioni di € così ripartiti: 17 milioni di € per apparecchiature di scambio termico, 15 milioni di € per i monitor, 6 milioni di € per gli elettrodomestici di grandi dimensioni e 112 milioni di € per gli elettrodomestici di piccole dimensioni. Dalle categorie di rifiuti è possibile anche ottenere il valore economico perso dei singoli componenti contenuti in essi. Vengono persi, infatti, circa 55 milioni di € per i driver, 36 milioni di € per i circuiti stampati, 40 milioni di € per i cavi, 15 milioni di € per i compressori e 174.000€ per le batterie.

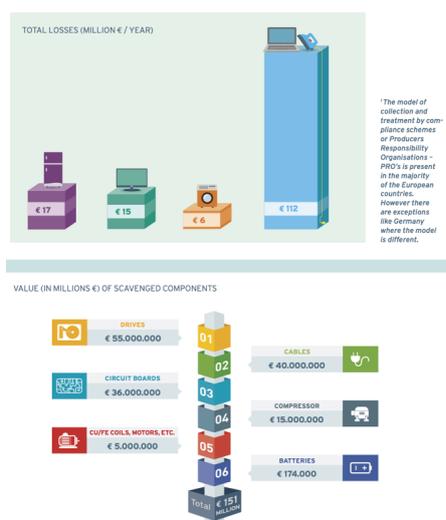


Figura 69 - Valore perso dalla perdita causata dallo scavenging (Federico Magalini, 2019).

6.2 Bilancio ambientale

Risulta immediato credere che le attività di recupero e riciclo dei rifiuti abbiano unicamente impatto positivo sull'ambiente e sulla salute dell'uomo. Tuttavia, anche i processi adottati per il trattamento dei RAEE generano effetti dannosi i quali, però, non superano gli effetti positivi dati dalle emissioni dannose evitate grazie alla riduzione delle pratiche di smaltimento in discarica, incenerimento ed estrazione di materie prime.

Difatti, l'uso di risorse riciclate rappresenta l'approccio più sostenibile rispetto alle classiche attività minerarie, conservando le proprietà delle risorse, riducendo l'impatto ambientale e l'utilizzo di energia, nonché rispettando il territorio e diminuendo la dipendenza dall'estrazione mineraria. L'estrazione di minerali dalla crosta terrestre comporta evidenti rischi ambientali, specificatamente inquinamento atmosferico e dell'acqua, danni alla terra e perdita di biodiversità.

Non solo l'ambiente viene danneggiato dall'estrazione mineraria, ma bensì anche la salute dell'uomo. Basti pensare agli effetti dannosi al livello respiratorio generati dall'uso di mercurio per estrarre l'oro, o allo sfruttamento della forza lavoro nel mancato rispetto dei diritti umani fondamentali.

Nel 2022 sono state stimate 900 milioni di tonnellate di estrazioni minerarie evitate grazie al solo riciclo formale dei RAEE, delle quali il 50% di rame, il 20% di oro, il 10% di ferro e meno del 5% di palladio (Cornelis P. Baldé, 2024).

Precisamente, da vari studi è emerso come la gestione formale dei RAEE prevenga 93 miliardi di kg di emissioni equivalenti di CO₂ sotto forma di liquidi refrigeranti presenti nelle apparecchiature di scambio termico (41 miliardi di kg) e di estrazione mineraria (52 miliardi di kg). Ogni anno, infatti, a causa della cattiva gestione dei rifiuti, vengono generati 145 miliardi di kg di emissioni equivalenti di CO₂ solo per i liquidi refrigeranti. A questi si devono aggiungere anche i kg di mercurio e plastica che, contenendo sostanze tossiche e ritardanti di fiamma, sono causa di danni all'ambiente e alla salute. Attualmente vengono rilasciati nell'ambiente 58.000 kg di mercurio e 17 miliardi di kg di plastica. Dei 17 miliardi di kg di plastica, 59 milioni di kg contengono circa 1 milione di kg di ritardanti di fiamma non gestiti correttamente, di cui la maggior parte situata nei monitor. Si stima che il riciclo della plastica consenta di risparmiare fino a 1.535 kg di CO₂ per kg di prodotto. Il

95% del mercurio si trova, invece, nelle sorgenti luminose a cui corrispondono 58 tonnellate di emissioni equivalenti di CO2.

La corretta gestione dei rifiuti, invece, genera all'incirca 118 miliardi di kg (pari allo 0,2% della CO2 generata globalmente dall'uomo) di emissioni equivalenti di CO2 i quali, bilanciati con i 93 miliardi di kg di emissioni prevenute, risultano nettamente inferiori già solo alle emissioni causate dal cattivo smaltimento dei liquidi refrigeranti.

6.2.1 Life Cycle Assessment

Il “*Life Cycle Assessment*” (LCA), ovvero la valutazione del ciclo di vita, è uno strumento metodologico utilizzato per analizzare quantitativamente il ciclo di vita di prodotti nel contesto dell’impatto ambientale. Nella LCA, viene considerato il ciclo di vita totale di un prodotto o di un’attività, dall’estrazione di materiali di base alla fase di trattamento dei rifiuti, indicato anche come “*from the cradle to the grave*”, cioè dalla culla alla tomba. Questo strumento è ampiamente utilizzato per poter valutare l’impatto ambientale degli AEE e dei loro processi di riciclo e, di conseguenza, per progettare dispositivi elettrici ed elettronici più rispettosi dell’ambiente (Peeranart Kiddee, 2013). Il LCA, nel contesto della gestione dei RAEE, viene ampiamente impiegato per supportarla stimandone gli effetti ambientali ed economici, consentendo così un migliore processo decisionale per gli smaltimenti dei RAEE. Anche tramite l’utilizzo di questo potente strumento è stato dimostrato come attraverso la prevenzione, il riciclo e il recupero, sia possibile ridurre in maniera sostanziale gli impatti ambientali rispetto allo smaltimento nelle discariche (Patrizia Ghisellini, 2015).

Da diversi studi in cui è stato impiegato il LCA è emerso che tramite il riciclo di 10 kg di alluminio sia possibile risparmiare il 90% del consumo energetico che si avrebbe trattandolo in discarica ed evitare la creazione di 20 kg di gas di CO₂ e 0,11 kg di gas di SO₂. Allo stesso modo, riciclare materiali quali ferro e acciaio consente di risparmiare il 74% dell’energia, l’86% di inquinamento atmosferico, il 40% del consumo di acqua con il rispettivo 76% di inquinamento dell’acqua, il 97% dei rifiuti minerari e il 90% nell’uso di materiali vergini (Amit Kumar, 2017). La figura 55 mostra i risultati di uno studio condotto mediante l’applicazione del metodo LCA.

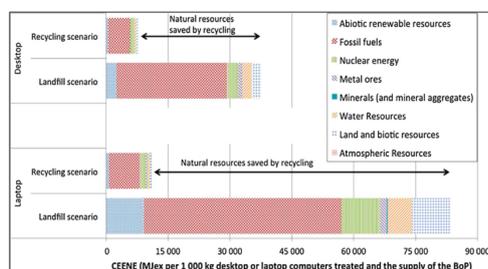


Figura 70 - Risorse recuperate dal riciclo di monitor e computer con il metodo LCA (Amit Kumar, 2017).

6.2.1.1 Impatto ambientale dei processi di riciclo dei dispositivi di raffreddamento mediante il metodo del Life Cycle Assessment

Dopo aver analizzato il processo di trattamento dei dispositivi di scambio termico nel paragrafo §5.3.1 è doveroso analizzare anche gli effetti ambientali di tali processi, al fine di verificare se i benefici ambientali del riciclo dei frigoriferi possano essere bilanciati con le emissioni derivanti dai processi di bonifica e riciclo. Per affrontare questo problema, gli impatti ambientali dei frigoriferi di riciclo in diversi scenari sono stati quantificati attraverso l'utilizzo del metodo LCA. I risultati mostrano che i benefici ambientali derivanti dal riciclo provengono principalmente dal risparmio di risorse ed energia nella produzione a monte, come nelle fasi di riciclo del polistirolo (22,17%), dell'acciaio (23,94%) e del rame (8,10%) (Rufeng Xiao, 2016). Tuttavia, date le dimensioni, gli impatti ambientali del trasporto possono superare il beneficio ambientale del riciclo.

Le analisi svolte per definire l'impatto ambientale studiano diversi scenari di trattamento dei rifiuti, quali ad esempio il trasporto mediante mezzi alimentati a benzina o diesel e mezzi elettrici o ibridi. Diversamente da come si possa credere, nella maggior parte dei casi l'utilizzo di mezzi elettrici richiede più energia rispetto ai comuni mezzi di trasporto alimentati con carburante date soprattutto le grandi dimensioni dei prodotti e le lunghe distanze percorse.

Se, ad esempio, si considera il caso del trasporto mediante mezzi di trasporto elettrici o ibridi, questi provocano la generazione di 0,294 kg di CO₂ equivalente per 1 kg di dispositivi di raffreddamento. Considerando i 3,6 miliardi di kg di dispositivi riciclati nel 2022, questo corrisponde a circa 1 miliardo di kg di CO₂ equivalente generati.

Tuttavia, il processo di trattamento non è composto solo dal trasporto, bensì da una moltitudine di processi quali, ad esempio il trattamento di riciclo dell'acciaio, del rame, della plastica e dei compressori. È il bilancio di tutti questi processi che consente di stabilire quanto il processo di riciclo impatti positivamente o meno sull'ambiente. Il maggior contributo all'ambiente è rappresentato dal processo di riciclo dell'acciaio, della plastica e del rame. Di contro, la maggior parte delle emissioni di CO₂ sono dovute al trasporto.

È possibile, inoltre, effettuare un bilancio sull'impatto ambientale confrontando il recupero dei materiali di un frigorifero con l'opzione di smaltimento in discarica.

L'analisi è basata su dati generali circa l'utilizzo e le operazioni di smaltimento di un dispositivo senza entrare nel dettaglio dei singoli processi e casi particolari.

Il bilancio è stato condotto considerando che ad 1 kWh corrispondono circa 0,53 kg di CO₂ equivalenti emessi nell'aria e un frigorifero da 200 litri utilizzato per 10 anni.

Tipicamente un frigorifero a fine vita smaltito in discarica provoca il rilascio nell'ambiente, non solo di plastiche e metalli, ma anche dei gas refrigeranti, sostanze altamente tossiche per l'ambiente e per la salute dell'uomo. Le sole emissioni dei gas refrigeranti giungono a generare fino a circa 3000 kg di CO₂ equivalenti. Di contro, il processo di recupero dei materiali richiede in media 200 kWh di energia, a cui corrispondono circa 100 kg di CO₂ equivalenti, consentendo inoltre il recupero di un'elevata percentuale dei materiali contenuti.

Risulta chiaro, così, come la sola corretta gestione dei gas refrigeranti consenta un risparmio di circa 2900 kg di CO₂ equivalenti.

Per quanto riguarda i materiali, invece, è difficile stabilire un valore numerico per le emissioni prodotte dal processo di decomposizione che nella maggior parte dei casi dura centinaia di anni, in quanto gli effetti si esplicano nei danni all'ecosistema alterandoli e rilasciando sostanze tossiche con l'ossidazione e l'esposizione alla luce solare. È certo, però, che il riciclo di questi consenta di evitare la produzione di CO₂ generata dal processo di estrazione e lavorazione.

Nel caso del ferro, ad esempio, la produzione di 1 kg di ferro comporta l'emissione di 1,83 kg di CO₂ equivalenti. Considerando, pertanto, un frigorifero che pesa in media 50 kg, è possibile recuperare fino a 25 kg di ferro consentendo, così, di evitare l'emissione di 45 kg di CO₂ per singolo dispositivo.

In maniera analoga, la produzione di 1 kg di plastica provoca l'emissione di circa 2,5 kg di CO₂ equivalenti. Da un frigorifero è possibile recuperare fino a 5 kg di plastica, evitando l'emissione di circa 12 kg di CO₂, senza considerare il fatto che 1 kg di plastica disperso nell'ambiente provochi con l'esposizione al sole il rilascio di 23 mg di metano e 6 mg di etilene l'anno.

Infine, da un frigorifero standard è possibile recuperare fino a 3 kg di rame e 15 kg di acciaio. Il recupero di questi materiali consente di evitare l'emissione di 30 kg di CO₂ per l'acciaio e 5 kg di CO₂ per il rame.

In conclusione, è possibile affermare in linea generale che dal riciclo di un frigorifero è possibile evitare l'emissione di più di 90 kg di CO₂ equivalente dal solo riutilizzo delle principali materie prime, senza considerare gli evidenti effetti positivi che si hanno sull'ambiente e i microrganismi.

Risulta evidente come gli stessi ragionamenti siano applicabili a ciascuna categoria di elettrodomestici in quanto, come visto nei paragrafi del capitolo §2, il fattore da cui dipende il processo di trattamento è rappresentato dai materiali di cui sono costituiti i prodotti.

Conclusioni

La costante elettronicazione dei prodotti negli ultimi decenni ha portato ad una crescita esponenziale di apparecchiature elettriche ed elettroniche. Nel 2022 sono stati prodotti 96 miliardi di kg di nuove apparecchiature elettroniche ed è prevista un aumento del volume mondiale fino a 120 miliardi di kg nel 2030. In parallelo, vi è la costante crescita del volume dei RAEE pari a 62 miliardi di kg nel 2022.

Il problema della gestione dei RAEE è ad oggi un argomento di grande interesse a causa degli elevati volumi generati e dell'importante valore economico e ambientale che questi rappresentano.

I RAEE, infatti, sono composti da materiali preziosi che, se trattate correttamente, possono rappresentare una fonte di risorse rispettosa per l'ambiente. Dei 62 miliardi di kg, 31 miliardi sono metalli, 17 miliardi plastica e 14 miliardi gomma, ceramiche ed altri materiali.

Il mondo della gestione dei RAEE si pone le sue radici sui principi dell'Economia Circolare: riduzione, riutilizzo e riciclo. Dei 62 miliardi di kg di RAEE generati, solo il 22.3% è stato gestito correttamente secondo le direttive previste dai Paesi, pari a 13,8 miliardi di kg. La restante parte viene trattata, ancora oggi, al di fuori di sistemi formali, finendo per essere inceneriti o smaltiti in modo incorretto in discarica, generando elevatissime perdite economiche e danni all'ambiente.

Le principali pratiche impiegate all'interno dei sistemi formali e, di conseguenza, rispettando le normative vigenti, sono strutturate dai seguenti passaggi: il pretrattamento, che include lo smontaggio preliminare, la triturazione e la separazione meccanica degli apparecchi per separare i componenti riutilizzabili da quelli pericolosi; la lavorazione meccanica, fisica o chimica dei componenti preziosi ottenuti per il loro riciclo; infine, la raffinazione.

Nell'elaborato sono state definite le diverse tecnologie impiegate per la lavorazione dei diversi materiali al fine di separare le frazioni metalliche da quelle non metalliche, come i processi pirometallurgici, l'idrometallurgici e la biometallurgici. Successivamente, sono state definite le tecniche adottate per il recupero della plastica e dei PCB contenuti all'interno dei RAEE. I PCB, in particolare, sono

composti da molti materiali preziosi, ma la loro struttura sempre più complessa rende difficile il processo di recupero e riciclo. Ad oggi i PCB vengono trattati con tre processi: fisici, chimici e metallurgici.

Dati gli elevati volumi di RAEE e conseguenti materiali trattati, nel 2024 il mercato dei RAEE ha raggiunto il valore di 75 miliardi di \$.

Lo scopo finale dell'elaborato è stato quello di analizzare i benefici e i costi derivanti dalle pratiche di riciclo, al fine di valutarne l'effettiva convenienza rispetto ai classici metodi di smaltimento dei rifiuti.

È stato individuato come a livello ambientale il riciclo abbia effetti assolutamente positivi, nonostante anche i processi di recupero abbiano essi stessi effetti negativi sull'ambiente. La quantità di emissioni evitate grazie al riciclo, infatti, supera di gran lunga la quantità di emissioni prodotte.

Anche dal punto di vista economico il riciclo dei materiali provenienti dai RAEE è profittevole, generando ricavi per 28 miliardi di \$ a fronte di costi operativi di 10 miliardi di \$. Il bilancio negativo che si ottiene alla fine è dovuto alla ancora grande maggioranza di rifiuti che vengono trattati scorrettamente, generando ingenti costi indiretti sull'ambiente e sulla salute dell'uomo sia a causa delle emissioni negative generate da discariche e inceneritori, sia per le emissioni di CO₂ generate dai trasporti illegali di rifiuti che percorrono lunghe tratte fino ai Paesi in via di sviluppo.

Nel caso specifico di un classico elettrodomestico, come il frigorifero, è stato possibile effettuare un bilancio preliminare ad alto livello dei benefici ambientali generati dal riciclo dei suoi componenti. Il risultato evidenzia chiaramente come dal solo riutilizzo delle materie prime, evitando perciò di estrarne delle nuove dall'ambiente, e dal corretto smaltimento delle sostanze tossiche come i gas refrigeranti, sia possibile evitare l'emissione di più di 2000 kg di CO₂ equivalenti. Il valore aumenta vertiginosamente se si considerano anche gli effetti positivi che si hanno sull'ambiente evitando di disperdere nella natura materie prime che rilasciano sostanze tossiche con l'ossidazione e l'esposizione alla luce solare.

Lo studio condotto, pertanto, ha messo alla luce come le pratiche di riciclo dei rifiuti abbiano effetti positivi sull'ambiente e sull'economia, evidenziando quanto sia

fondamentale impegnarsi per poter incrementare la corretta gestione di questi, riducendo, invece, le pratiche informali di trattamento che, come analizzato, hanno effetti molto negativi sull'ambiente e sulla salute dell'uomo.

In conclusione è sicuramente possibile affermare quanto la gestione e il riciclo dei Rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche rappresentino una sfida cruciale per la sostenibilità ambientale ed economica. Le tecniche di riciclo analizzate in questa tesi dimostrano come sia possibile recuperare materiali preziosi, ridurre l'impatto ambientale e contribuire a un'economia circolare più efficiente. Tuttavia, vi sono ancora numerose sfide da affrontare, tra cui l'ottimizzazione dei processi, il miglioramento della raccolta differenziata e la sensibilizzazione dei consumatori.

Le prospettive future in questo ambito si concentrano sullo sviluppo di tecnologie sempre più avanzate per il trattamento dei RAEE, con l'obiettivo di incrementare i tassi di recupero e ridurre le emissioni inquinanti. L'automazione e l'intelligenza artificiale potranno giocare un ruolo chiave nel migliorare l'efficienza dei processi di separazione e smaltimento. Inoltre, l'adozione di modelli di business basati su principi di economia circolare, come il design eco-compatibile e il riutilizzo dei componenti, potrà favorire un sistema più sostenibile nel lungo periodo.

In tal senso, anche le normative avranno un impatto determinante sul futuro del settore. L'Unione Europea e altri organismi internazionali stanno introducendo regolamenti più stringenti per incentivare il riciclo e responsabilizzare i produttori. La collaborazione tra industria, istituzioni e cittadini sarà essenziale per garantire un progresso efficace nella gestione dei RAEE.

Sicuramente le scelte dell'Unione Europea rappresentano un punto di partenza per riuscire a raggiungere una buona gestione, ma altrettanto importante è agire sulla conoscenza e la consapevolezza degli individui, sia nelle loro scelte di acquisto sia nell'adeguato trattamento. La consapevolezza dell'importanza di raccogliere e gestire correttamente i RAEE è ancora scarsa, così come i servizi di riparazione.

Un primo segnale positivo per quanto riguarda l'acquisto arriva dal mercato dei prodotti ricondizionati, che sta crescendo rapidamente in tutto il mondo. È una scelta, quella di acquistare dei beni ricondizionati, che offre vantaggi sia economici sia ambientali, in quanto oltre ad avere un costo minore permette di ridurre l'uso

delle materie prime critiche e di conseguenza le emissioni di CO2 associate alla produzione di nuovi dispositivi.

Bibliografia

- (2024). Tratto da https://ec.europa.eu/eurostat/web/main/search/-/search/estastsearchportlet_WAR_estastsearchportlet_INSTANCE_bHVzuvn1SZ8J?text=weee
- (2024). Tratto da www.cdcrace.it: <https://www.cdcrace.it/sistema-raee/attori-del-sistema-raee/produttori-di-ae/>
- (2024). Tratto da Direttiva UE 2024/1799: https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=OJ:L_202401799
23. Horta Arduin, R., Grimaud, G., Martínez Leal, J., Pompidou, S., Charbuillet, C., Laratte, B., . . . Perry, N. (2019). Influence of scope definition in recycling rate calculation for European e-waste extended producer responsibility.
- Alessandra Cesaro, A. M. (2016). *Effectiveness of WEEE mechanical treatment: Separation yields and recovered material toxicity*.
- Amirhossein Andooz, M. E. (2021). *A comprehensive review on pyrolysis of E-waste and its sustainability*.
- Amit Kumar, M. H. (2017). *E-waste: An overview on generation, collection, legislation and recycling practises*.
- Art. 4 lettera e del D. Lgs. 49/2014. (2014). Tratto da <https://www.governo.it/sites/governo.it/files/75158-9343.pdf>
- Batinic, B., Vaccari, M., Savvilotidou, V., Kousaiti, A., Gidakos, E., Marinkovic, T., & Fiore, S. (2019). Applied WEEE pre-treatment methods: Opportunities to maximizing the recovery of critical metals.
- Capuzzi, S., & Timelli, G. (2018). Preparation and Melting of Scrap in Aluminum Recycling: A Review.
- Centro di coordinamento RAEE. (2024). Tratto da <https://www.cdcrace.it/ae-e-raee/rifiuti-da-apparecchiature-elettriche-ed-elettroniche/>
- Chagnes A., C. G. (2016). *WEEE RECYCLING: Research, Development and Police*. Tratto da https://www.researchgate.net/profile/Dominique-Guyonnet/publication/305727241_Dynamic_Representation_of_Flows_and_Stocks_of_Metals_in_the_Economy/links/5b4ddba945851507a7a6e347

/Dynamic-Representation-of-Flows-and-Stocks-of-Metals-in-the-Economy.pdf

- Chancerel, P., Marwede, M., Mathieux, F., & Talens Peiró, L. (2016). Feasibility Study for Setting-Up Reference Values to Support the Calculation of Recyclability/Recoverability Rates of Electr(on)ic Products.
- Cornelis P. Baldé, R. K.-C. (2024). *The Global E-Waste Monitor 2024*.
- Dalhammar, C. M. (2014). Addressing resource efficiency through the Ecodesign Directive. A review of opportunities and barriers.
- de Oliveira, C., Bellopede, R., Tori, A., Zanetti, G., & Marini, P. (2022). Gravity and Electrostatic Separation for Recovering Metals from Obsolete Printed Circuit Board.
- Decreto Legislativo 14 marzo 2014, n.49.* (2014). Tratto da <https://www.governo.it/sites/governo.it/files/75158-9343.pdf>
- Devasahayam, S., Raman, R., Chennakesavulu, K., & Bhattacharya, S. (2019). Plastics-Villain or Hero? Polymers and Recycled Polymers in Mineral and Metallurgical Processing-A Review.
- Direttiva 2008/98/CE . (2008). *Direttiva 2008/98/CE del Parlamento Europeo e del Consiglio.*
- Direttiva 2011/65/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio.* (2012). Tratto da <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/?uri=CELEX%3A32011L0065>
- Direttiva 2012/19/UE del Parlamento Europeo e del Consiglio sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche.* (2012). Tratto da <https://eur-lex.europa.eu/legal-content/IT/TXT/PDF/?uri=CELEX:32012L0019>
- DM 185, 2007.* (2007). Tratto da <https://www.normattiva.it/uri-res/N2Ls?urn:nir::regolamento:2007-09-25;185~art3>
- Economia circolare: in che modo l'UE intende realizzarla entro il 2050.* (2024). Tratto da <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20210128STO96607/economia-circolare-in-che-modo-l-ue-intende-realizzarla-entro-il-2050>
- Electronic waste worldwide.* (2024). Tratto da Statista: www.statista.com

- F. Wagner, J. P. (2019). *Towards a more circular economy for WEEE plastics - Part A: Development of innovative recycling strategies.*
- F.O. Ongondo, I. W. (2010). *How are WEEE doing? A global review of the management of electrical and electronic wastes.*
- Federica Cucchiella, I. D. (2015). *Recycling of WEEE: An economic assessment of present and future e-waste streams.*
- Federico Magalini, R. S. (2019). *Scavenging of WEEE: environmental and economic consequences for society.*
- Fizaine, F. (2020). *The economics of recycling rate: New insights from waste electrical and electronic equipment.*
- Fröhlich, P., Lorenz, T., Martin, G., Brett, B., & Bertau, M. (2017). Valuable Metals-Recovery Processes, Current Trends, and Recycling Strategies.
- Fulvio Ardente, M. C. (2015). *Analysis of end-of-life treatments of commercial refrigerating appliances: Bridging product and waste policies.*
- Gaustad, G., Olivetti, E., & Kirchain, R. (2015). Improving aluminum recycling: A survey of sorting and impurity removal technologies.
- Gestione RAEE Report 2023.* (2024). Tratto da <https://www.cdcrree.it/rapporti-raee/rapporto-annuale-2023/>
- Giovanni Francesco Cardamone, F. A. (2021). *About the environmental sustainability of the European management of WEEE plastics.*
- Global E-waste monitor 2024 electronic waste rising five times faster documented E-waste recycling.* (2024). Tratto da <https://unitar.org/about/news-stories/press/global-e-waste-monitor-2024-electronic-waste-rising-five-times-faster-documented-e-waste-recycling>
- Holgersson S, S. B. (2018). Analysis of the metal content of small-size Waste Electric and Electronic Equipment (WEEE) printed circuit boards part 1: internet routers, mobile phones and smartphones.
- Home & household appliances.* (2024). Tratto da Statista: <https://www.statista.com>
- Hool, A., Schrijvers, D., van Nielen, S., Clifton, A., Ganzeboom, S., Hagelueken, C., . . . Meese- Marktscheffel, J. (2022). How companies improve critical raw material circularity: 5 use cases.

- I premi per la gestione virtuosa dei RAEE riconosciuti nel 2023.* (2024). Tratto da <https://www.cdcaee.it/news/i-premi-per-la-gestione-virtuosa-dei-raee-riconosciuti-nel-2023/>
- Kaya, M. (2016). Recovery of metals and nonmetals from electronic waste by physical and chemical recycling processes.
- Lingen Zhang, Z. X. (2016). *A review of current progress of recycling technologies for metals from waste electrical and electronic equipment.*
- Luxuan Sun, H. D. (2024). *Environmental benefit of recycling plastics from waste electrical & electronic equipment.*
- Mählitz, P., Korf, N., Chryssos, G., & Rotter, V. (2022). Contributions of extended batch tests for assessing technical recyclability: A case study of low-value battery flows.
- Maisel, F., Chancerel, P., Dimitrova, G., Emmerich, J., Nissen, N., & Schneider-Ramelow, M. (2020). Preparing WEEE plastics for recycling— How optimal particle sizes in pre-processing can improve the separation efficiency of high quality plastics.
- Marra, A., Cesaro, A., & Belgiorno, V. (2018). Separation efficiency of valuable and critical metals in WEEE mechanical treatments.
- Moons, H. V. (2014). Ecodesign for Commercial Refrigeration – Preparatory study update – Final report.
- O.S. Shittu, I. W. (2021). *The 'WEEE' challenge: Is reuse the "new recycling"?*
- Otsuki A, G. P. (2019). Non- destructive characterization of mechanically processed waste printed circuit boards: X-ray fluorescence spectroscopy and prompt gamma activation analysis.
- Patrizia Ghisellini, C. C. (2015). *A review on circular economy: the expected transition to a balances interplay of environmental and economic systems.*
- Peeranart Kiddee, R. N. (2013). *Electronic waste management approaches: An overview.*
- Prezzo del minerale ferro.* (2025). Tratto da <https://it.tradingeconomics.com/commodity/iron-ore>
- Prezzo del rame.* (2025). Tratto da https://mercati.ilsole24ore.com/materie-prime/commodities/rame/EFCUDWZ.LME?utm_source=chatgpt.com

- RAEE Italia - la dichiarazione degli impianti.* (2023). Tratto da <https://www.raeeitalia.it/la-dichiarazione-impianti/>
- RAEE Italia - la raccolta negli anni.* (2024). Tratto da <https://www.raeeitalia.it/la-raccolta-negli-anni/>
- Reck, B., & Graedel, T. (2012). Challenges in metal recycling.
- Rifiuti elettronici nell'UE dati e cifre.* (2024). Tratto da <https://www.europarl.europa.eu/topics/it/article/20201208STO93325/rifiuti-elettronici-nell-ue-dati-e-cifre-infografica>
- Rocchetti, L., Amato, A., & Beolchini, F. (2018). Printed circuit board recycling: A patent review.
- Rufeng Xiao, Y. Z. (2016). *Environmental impacts of reclamation and recycling processes of refrigerators using life cycle assessment (LCA) methods.*
- Sansotera, M. N. (2013). Italian WEEE management system and treatment of end-of-life cooling and freezing equipment for CFCs removal.
- Silvia Fiore, D. I. (2018). *Improving waste electric and electronic equipment management at full-scale by using material flow analysis and life cycle assessment.*
- Slijkhuis, C. (2022). *Improving the loops of plastics in electronics.* Tratto da <https://www.eera-recyclers.com>
- Slovenian Institute for Standardization. (2020). General Methods for Assessing the Recyclability and Recoverability of Energy-Related Products.
- Ueberschaar, M., Geiping, J., Zamzow, M., Flamme, S., & Rotter, V. (2017). Assessment of element-specific recycling efficiency in WEEE pre-processing.
- Wambach, M. H. (2024). *Methodology and Database for the Quantification of the Technical Recyclability of Electrical and Electronical Equipment Demonstrated on a Smartphone Case Study.*
- Zahra Ansari Cheshmeh, Z. B. (2023). *A comprehensive review of used electrical and electronic equipment management with a focus on the circular economy-based policy-making.*

Zeller, M., Netsch, N., Richter, F., Leibold, H., & Stapf, D. (2021). Chemical Recycling of Mixed Plastic Wastes by Pyrolysis—Pilot Scale Investigations.

Zhang S, D. Y. (2017). Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE.