



POLITECNICO DI TORINO

Corso di Laurea Magistrale in Ingegneria per l'Ambiente e il Territorio

A.A. 2017/2018

18 luglio 2018

Analisi delle prospettive di recupero di materie prime secondarie da telefoni cellulari a fine vita

Relatore:

prof.ssa Silvia Fiore

Correlatore:

ing. Alessandro Ronco, AMIAT SpA

Studente:

Luigi Sotera

Indice

Indice delle figure	2
Indice delle tabelle	3
1. Introduzione	4
2. La gestione dei telefoni cellulari e degli smartphone a fine vita	5
2.1. Definizione di RAEE, telefoni cellulari e Smartphone.	5
2.2. Quadro normativo e sistema di gestione RAEE	9
2.2.1. Normativa UE.....	9
2.2.2. Normativa italiana	10
2.2.3. Sistemi collettivi e Centro di Coordinamento RAEE	14
2.3. Percentuale d'intercettazione e classificazione	17
2.4. Trattamento dopo la raccolta	20
2.5. Componenti preziose nei telefoni cellulari	21
3. Attività sperimentale	24
3.1. L'impianto TBD gestito da AMIAT SpA.....	24
3.2. Il test industriale	25
3.3. Inventario.....	27
3.3.1. Determinazione della vita utile dei dispositivi	31
3.3.2. Caratteristiche qualitative e quantitative	33
3.4. Smontaggio manuale	35
3.4.1. Bilancio di massa dei Cellphone.....	37
3.4.2. Bilancio di massa degli Smartphone.....	41
3.4.3. Bilancio di massa dei cordless.....	45
3.5. Analisi risultati e confronto con i dati di letteratura	46
3.6. Valutazione delle prospettive di recupero di frazioni utili	50
3.7. Analisi tecnica ed economica	51
4. Analisi delle prospettive di valorizzazione delle schede a circuiti stampati.	53
4.1. Che cosa sono le PCB.....	53
4.2. Evoluzione storica della composizione e della dimensione delle PCB	54
4.3. Significatività delle PCB rispetto a metalli preziosi e CRM	56
4.4. Analisi di due campioni di PCB nell'ambito del test industriale.....	57
5. Conclusioni	63
Riferimenti bibliografici	64

Indice delle figure

Figura 1: Paesi esportatori di CRMs nei Paesi dell'Unione Europea (fonte http://ec.europa.eu)	7
Figura 2: Schema di gestione 1 contro 1	12
Figura 3: Schema di gestione 1 contro 0 (fonte: U1292_2017_2017-Guida_RAEE_To promosso da Camera di Comm Industria artigianato e agricoltura torino realizzato da ecocerved).....	13
Figura 4: dati di raccolta RAEE e differenza con UE (fonte CdC RAEE).....	16
Figura 5: Telefoni cellulari scartati e rispettive vendite negli anni.	19
Figura 6: Composizione chimica e merceologica di un telefono cellulare (Bachér et al., 201; Chancerel e Rotter, 2009; Huisman, 2004; UNEP, 2009, 2013).....	22
Figura 7: Schema dell'approccio metodologico al test industriale.....	26
Figura 8: Esempio di una scheda tecnica utilizzata per il riconoscimento del dispositivo.....	27
Figura 9: Numero di cellphone per singoli produttori. I valori riportati sono in percentuale (%)......	28
Figura 10: Numero di smartphone per singoli produttori. I valori riportati sono in percentuale (%).	28
Figura 11: Numero di cordless per singoli produttori. I valori riportati sono in percentuale (%).	28
Figura 12: Valutazione della vita utile degli Smartphone (i valori sono espressi in anni).	32
Figura 13: Valutazione della vita utile dei Cellphone (i valori sono espressi in anni)	33
Figura 14: Caratteristiche qualitative di alcuni dispositivi: a sinistra 3 cellphone, a destra uno smartphone.	34
Figura 15: Caratterizzazione campione, parti trovate.....	34
Figura 16: Strumenti utilizzati per lo smontaggio dei dispositivi.....	35
Figura 17: Identificazione delle componenti di un telefono cellulare	36
Figura 18: Contenuto di plastica di ogni Cellphone. I dati sono espressi in mg/kg.	37
Figura 19: Contenuto di metalli di ogni Cellphone. I dati sono espressi in mg/kg.	38
Figura 20: Peso delle PCBs in ogni Cellphone. I dati sono espressi in mg/kg	39
Figura 21: Peso delle componenti elettromeccaniche di ogni Cellphone. I dati sono espressi in mg/kg.	40
Figura 22: Peso della componente "Altro" di ogni Cellphone. I dati sono espressi in mg/kg.....	40
Figura 23 e Figura 24: Immagini relative alla diversa dimensione di PCBs contenute all'interno dei dispositivi, cerchiare in rosso. A sinistra per lo Smartphone, a destra per il Cellphone.....	42
Figura 25: Analisi della composizione di ogni singolo Smartphone	43
Figura 26: Bilancio di massa delle frazioni contenute nei Cordless.....	45
Figura 27: Abbondanze relative delle diverse componenti dei dispositivi nel periodo 1989-2016 (i dati sono espressi in mg/kg).....	47
Figura 28: Percentuali di frazioni ottenute per le categorie analizzate e confronto con i dati di letteratura. ..	49
Figura 29: Variazione dei valori economici delle frazioni recuperabili in funzione delle categorie dei dispositivi e dell'anno di produzione.....	51
Figura 30: Quantità in mg/kg di PCB dei telefoni cellulari prodotti in diversi anni.	56
Figura 31: Risultati ottenuti da un test XRF per uno specifico campione.....	58
Figura 32: Composizione delle PCB derivanti da cellphone, smartphone e desktop computer provenienti dall'impianto TBD.....	60
Figura 33: Concentrazione di palladio, oro e argento in mg/kg in PCB nel periodo 2011-2107	61
Figura 34: Concentrazione di rame, zinco e piombo nelle PCB nel periodo 1997-2017	62
Figura 35: Concentrazione di ferro e alluminio nelle PCB nel periodo 1997-2017	62

Indice delle tabelle

Tabella 1: Lista dei CRMs (fonte: uropean CommissIOn http://ec.europa.eu)	6
Tabella 2: Obiettivi posti dall'Unione Europea sulla raccolta RAEE.....	9
Tabella 3: Quantità di RAEE raccolti in Italia (fonte: CdC RAEEEE, dati aggiornati al 18/06/2018)	15
Tabella 4: Dati sui RAEE prodotti (fonte: CdC RAEE Dichiarazione annuale impianti).....	16
Tabella 5: Usi principali dei metalli preziosi nelle AEE.	23
Tabella 6: Caratterizzazione del campione Cellphone.	30
Tabella 7: Caratterizzazione del campione Smartphone.	31
Tabella 8: Caratterizzazione del campione Cordless.....	31
Tabella 9: Componenti analizzate nei Cellphone	37
Tabella 10: frazioni merceologiche delle componenti analizzate degli Smartphone	41
Tabella 11: Bilancio di massa delle frazioni separate dai Cellphone	44
Tabella 12: Bilancio di massa delle frazioni separate dagli Smartphone	44
Tabella 13: Abbondanze relative delle componenti dei dispositivi in funzione dell'anno di produzione.....	46
Tabella 14: Analisi risultati ottenuti dal bilancio di massa e confronto con i dati di letteratura (Manivannan, 2016).....	48
Tabella 15: Valori ricavati dal T-test per la valutazione dei risultati ottenuti nel bilancio di massa.....	50
Tabella 16: Valori di mercato di materie prime secondarie derivate da RAEE, cellphone e smartphone.....	50
Tabella 17: Valori economici delle frazioni recuperabili dal campione analizzato nel test industriale.	50
Tabella 18: Valori economici lo smontaggio manuale (manodopera e strumenti) dei telefoni cellulari stimati in base ai risultati del test industriale svolto.	52
Tabella 19: Valori economici calcolati per lo scenario 1 (i dispositivi non sono smontati).....	52
Tabella 20: Valori economici calcolati per lo scenario 2 (i dispositivi sono smontati secondo le modalità T1 e T2).	53
Tabella 21: Esempi di schede a circuiti stampati (PCB) estratte dai dispositivi in esame.	55

1. Introduzione

L'analisi svolta in questo lavoro di tesi di laurea magistrale, in collaborazione con AMIAT SpA (IREN Group) e in particolare con la gestione dell'impianto Trattamento Beni Durevoli (TBD) di Volpiano (TO), identifica e stima il recupero di materie prime secondarie, quali plastiche, metalli ferrosi e non ferrosi e metalli preziosi, a partire da una specifica categoria di rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE): telefoni cellulari, cordless e smartphone. L'evoluzione del sistema di gestione dei RAEE in ottica di un'Economia Circolare avrà un impatto ambientale e sociale non indifferente. Tre macro-dati sono sufficienti per comprendere la portata di questo cambiamento: il risparmio nell'acquisto di materie prime, grazie al recupero dei materiali contenuti nei RAEE; l'impatto occupazionale, legato alle operazioni di trattamento e riciclo dei RAEE "nuovi"; le emissioni di gas climalteranti risparmiate, grazie alla corretta gestione dei RAEE ed il valore economico generato, legato alle emissioni risparmiate. Una gestione non corretta di tali rifiuti invece, potrebbe causare elevati danni ambientali e alla salute umana, dovuto al loro contenuto di sostanze pericolose, tossiche e cancerogene le quali devono essere estratte dalle apparecchiature e trattate prima del conferimento finale. Tra le apparecchiature elettriche ed elettroniche più utilizzate troviamo i telefoni cellulari, cordless e smartphone ormai, oggetti indispensabili per la nostra vita, con un numero spropositato di unità immesse sul mercato ma con vita utile piuttosto limitata diventando subito rifiuti (RAEE). Essi rappresentano una percentuale significativa per i quali non esistono, al momento, procedure di riferimento in merito a un trattamento che sia coerente con i principi dell'Economia Circolare.

L'obiettivo primario di questo lavoro di tesi è l'analisi tecnica ed economica delle prospettive di trattamento finalizzato al recupero di telefoni cellulari, cordless e smartphone nel contesto Italiano, pienamente rappresentativo della realtà della Comunità Europea. Con queste premesse, il lavoro svolto ha previsto le seguenti fasi:

1. Campionamento presso l'impianto TBD di 105 dispositivi (le abbondanze relative di cellulari, smartphone e cordless a fine vita hanno rispecchiato le caratteristiche qualitative dei flussi in ingresso all'impianto);
2. Identificazione per ciascuna unità di modello, marca, anno di produzione, peso nello stato in cui è avvenuto lo smaltimento;
3. Smontaggio manuale e bilancio di massa dei dispositivi rispetto a componenti meccaniche, elettromeccaniche e elettroniche;
4. Caratterizzazione chimica di schede a circuiti stampati (PCB), secondo la letteratura le più ricche di rame e metalli preziosi, estratte da cellulari e smartphone;
5. Analisi economica di due scenari alternativi di gestione, basati sulle ipotesi di vendita diretta dei dispositivi o di uno smontaggio manuale, più o meno spinto, per realizzare la separazione delle principali componenti merceologiche.

2. *La gestione dei telefoni cellulari e degli smartphone a fine vita*

2.1. **Definizione di RAEE, telefoni cellulari e Smartphone.**

Nella generazione attuale la tecnologia gioca un ruolo fondamentale e l'uomo non può farne a meno. Ciò si manifesta in un sostanziale incremento di strumenti ed apparecchiature elettriche ed elettroniche (AEE) immesse sul mercato globale tali da semplificare e facilitare la vita di tutti noi. I rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE o rifiuti elettronici) rappresentano uno delle categorie di rifiuti a più rapida crescita, con 44.7 Mt stimati nel 2017 in tutto il mondo (Balde et al., 2017), di cui 7.2 Mt/a prodotti negli Stati Uniti, 6.2 Mt in Cina e 12.3 Mt/a nell'Unione Europea (Kumar et al., 2017).

Tra le apparecchiature elettriche ed elettroniche, il telefono cellulare è diventato una parte intrinseca della vita quotidiana, che consente la comunicazione con la famiglia e gli amici, accedere a dati di lavoro e personali, navigare su internet, ascoltare musica e giocare. Secondo Cucchiella et al. (2015), nel 2014 smartphone e telefoni cellulari sono stati i flussi di rifiuti elettronici con il tasso di generazione più elevato (in volumi). Con l'avanzare della tecnologia, infatti, i telefoni cellulari hanno subito delle sostanziali variazioni: dai primi modelli che operavano attraverso segnali radio analogici e quindi ingombranti, scomodi e pesanti, si è passati a modelli che utilizzano segnali digitali diventando così più piccoli e leggeri. Gli smartphone di ultima generazione sono telefoni cellulari che combinano la funzione di questi alla gestione dei dati personali.

A valle della panoramica riguardante le funzionalità degli smartphone, è importante sottolineare il ruolo che questa tipologia di dispositivi è giunta a ricoprire nella vita degli individui. A partire da un utilizzo esclusivamente professionale dei primi cellulari, si è passati a una crescente diffusione personale a seconda delle esigenze delle diverse fasce di età. Benché sia ancora estremamente diffuso un uso per fini lavorativi, il cellulare è divenuto uno dei principali mezzi di comunicazione personale, sia all'interno delle famiglie sia a livello trasversale nei diversi ambiti di rapporto sociale. La durata tecnica dei telefoni cellulari è pari a circa 10 anni (secondo quanto dichiarato dai produttori) ma la maggior parte degli utenti sostituisce il vecchio dispositivo per usufruire di tutti i vantaggi proposti ed offerti dai nuovi modelli, che hanno visto in questi anni non solo un cambiamento dal punto di vista strutturale ed estetico (con un'evidente diversificazione nei materiali utilizzati per fabbricarli), ma anche un incremento in quantità dovuto alle continue modifiche multimediali, ai prezzi in calo tra i concorrenti sul mercato e alle strategie di marketing di produttori e operatori di rete. La vita utile dei telefoni cellulari dunque è stimata a 1-2 anni nei paesi più sviluppati e 3 anni (Huang et al., 2008) nei paesi in via di sviluppo, di conseguenza essi vengono considerati prodotti elettronici a ciclo breve.

La presenza di materie prime critiche (CRM) rende il riciclaggio dei RAEE interessante e redditizio, per questo la Commissione europea ha definito i CRM come "i materiali grezzi che raggiungono o superano le soglie per importanza economica e rischio della loro fornitura. Essi sono fondamentali per una forte base industriale europea, essenziale per la crescita e competitività nell'UE, in particolare per prodotti high-tech e innovazioni emergenti" (Commissione europea, 2018). Inoltre, gli obiettivi della CE sono di promuovere l'economia

circolare e di evitare il grande sfruttamento di materie prime scarse e non rinnovabili. Tutti i metalli preziosi di base appartengono ai CRM. La lista dei “critical raw materials” aggiornata dall’UE nel 2017 prevede l’aggiunta di 9 nuovi materiali in più rispetto al 2014 arrivando così a 27 in totale; 3 di queste sono nuove alla lista: bismuto, elio, fosforo. Le altre 17 materie prime critiche sono incluse nella Tabella 1 e sono suddivise in tre gruppi di metalli: HREE (*heavy rare earth elements*), LREE (*light rare earth elements*) e PGMs (*platinum group metals*).

Tabella 1: Lista dei CRMs (fonte: EUROPEAN COMMISSION <http://ec.europa.eu>)

2017 CRMs (27)			
Antimonio	Fluoro	LREEs	Fosforo
Bario	Gallio	Magnesio	Scandio
Berilio	Germanio	Grafite naturale	Silicio
Bismuto	Hafnio	Gomma naturale	Tantalio
Borio	Elio	Niobio	Tungsteno
Cobalto	HREEs	PGMs	Vanadio
carbone coke	Indio	Roccia fosfata	

Un consumo in continua crescita di telefoni cellulari e smartphone produce volumi di rifiuti che, in generale, contribuiscono solo in minima parte al peso totale dei RAEE, tuttavia le quantità di metalli preziosi contenute in ogni singolo dispositivo mobile (come oro, argento, rame etc.) sono molto elevate rispetto quelle contenute in altre categorie di RAEE. Essi sono infatti costituiti da una combinazione eterogenea di materiali (Tuncuk et al., 2012), le principali frazioni sono metalli (alluminio, rame e ferro), materie plastiche e vetro (Arnold et al., 2010); molte componenti, in generale, sono fabbricate con metalli pesanti come cadmio, piombo, litio, mercurio e bromurati (Buchert et al., 2012) ed includono "materie prime critiche" (CRM, critical raw materials) come i metalli delle terre rare come l’indio e del gruppo del platino o l’oro, argento e rame che vengono impiegati principalmente nelle schede elettroniche a circuiti stampati (PCB, printed circuit board) e nelle varie componenti elettroniche.

L’elevata disponibilità e la mancanza di una prospettiva consolidata di recupero causa un problema di gestione di questa specifica tipologia di RAEE. Diventa una seria sfida per la comunità scientifica, i professionisti della gestione dei rifiuti e i governi di tutto il mondo trovare la soluzione più efficace da un punto di vista tecnico ed economico e meno impattante possibile dal punto di vista ambientale. Molti elementi rendono i RAEE potenzialmente significativi come risorsa secondaria se gestiti in maniera corretta (Li et al., 2007). Infatti il trattamento di queste apparecchiature una volta diventate rifiuti è fondamentale ed indispensabile in quanto

negli ultimi anni, la domanda per l'acquisto di materiali critici e quindi preziosi è aumentata (Pecket al., 2015). Ciò ha provocato preoccupazioni in tutti i Paesi del mondo sull'approvvigionamento di CRM, soprattutto nell'UE, che è fortemente dipendente da materie prime importate da Paesi produttori esteri (soprattutto Cina e Russia) (vedere Figura 1) (CE, 2010, 2014). Diventa così strategico attuare una buona gestione dei RAEE fondata sul riciclo dei rifiuti in questione e sul recupero di elementi preziosi e non come plastiche e frazioni vetrose, tale da avere dei benefici sia dal punto di vista economico (il riciclaggio ha un effetto attivo perché riduce dei rischi di approvvigionamento ed abbassa i prezzi sull'estrazione dei minerali e materiali vergini), che dal punto di vista ambientale, evitandone il conferimento in discarica (scongiorando così la lisciviazione dei metalli dovuta agli eventi atmosferici), o l'incenerimento (in quanto molti elementi contenuti nei RAEE sono tossici e producono diossine e furani) riducendo così un grave danno ambientale ed il rischio per la salute dell'uomo (Tsydenova and Bengtsson, 2011; Song and Li, 2014).

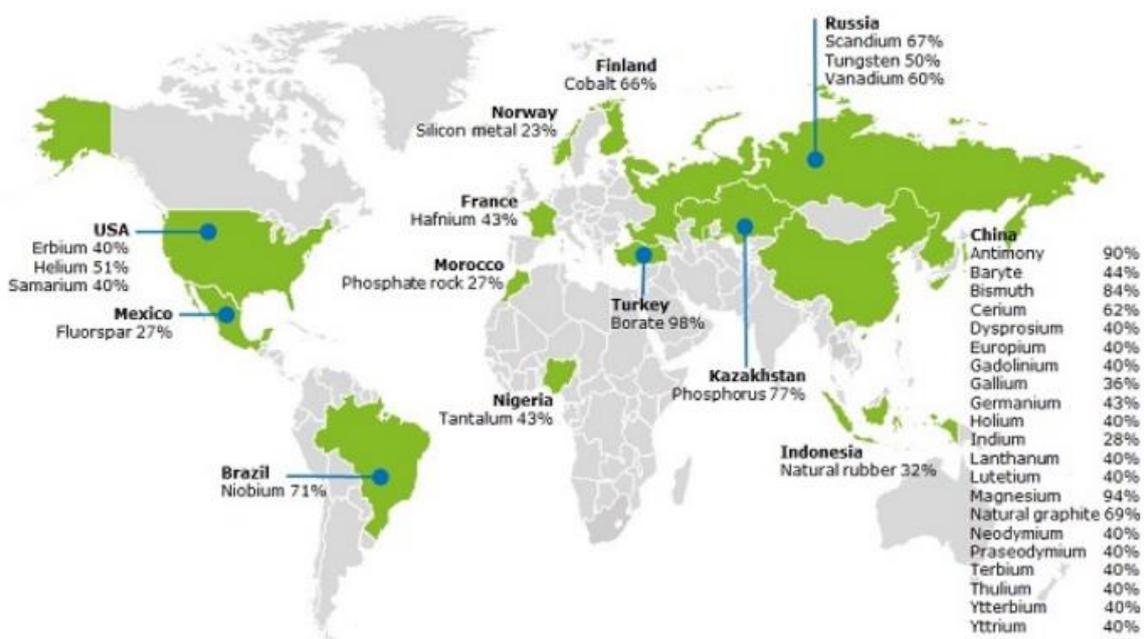


Figura 1: Paesi esportatori di CRMs nei Paesi dell'Unione Europea (fonte <http://ec.europa.eu>)

I rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE o rifiuti elettronici) rappresentano uno delle categorie di rifiuti solidi a più rapida crescita, con 44,7 Mt stimati nel 2017 in tutto il mondo (Balde et al., 2017), di cui 7,2 Mt/a sono prodotti negli Stati Uniti, 6,2 Mt in Cina e 12,3 Mt / a nell'Unione Europea (Kumar et al., 2017). La presenza di materie prime critiche (CRM) rende il riciclaggio dei RAEE interessante e redditizio, per questo la Commissione europea ha definito i CRM come "i materiali grezzi quelli che raggiungono o superano le soglie per importanza economica e rischio della loro fornitura. Sono fondamentali per una forte base industriale europea, essenziale per la crescita e competitività nell'UE, in particolare per prodotti high-tech e innovazioni emergenti" (Commissione europea, 2018). Inoltre, gli obiettivi della CE sono

di promuovere l'economia circolare e di evitare il grande sfruttamento di materie prime scarse e non rinnovabili. Tutti i metalli preziosi di base, appartengono ai CRM.

Uno degli oggetti appartenenti ad una determinata categoria delle apparecchiature elettriche ed elettroniche, è il telefono cellulare che è diventato una parte intrinseca della vita di molte persone e merita una particolare considerazione riguardo il suo ciclo di vita. Un telefono cellulare ha diversi vantaggi, consente la comunicazione con la famiglia e gli amici, collegandoli in tutto il mondo e consente agli utenti di accedere ai dati di lavoro, navigare su internet, ascoltare musica e giocare (grazie anche alle nuove scoperte tecnologiche) per cui è il dispositivo che viene utilizzato quotidianamente dall'uomo. Secondo [Cucchiella et al. \(2015\)](#), nel 2014 smartphone e telefoni cellulari sono stati i flussi di rifiuti elettronici con il tasso di generazione più elevato (in volumi). Con l'avanzare della tecnologia, infatti, i telefoni cellulari subiscono delle sostanziali variazioni, dai primi modelli che operavano attraverso segnali radio analogici quindi ingombranti, scomodi e pesanti e si è passati a modelli che utilizzano segnali digitali diventando così più piccoli e leggeri. Gli smartphone di ultima generazione sono telefoni cellulari che combinano la funzione di questi a quella della gestione dei dati personali, infatti proprio il nome smartphone tradotto in italiano significa telefono intelligente. A valle della panoramica riguardante le funzionalità degli smartphone, è importante sottolineare il ruolo che questa tipologia di device (dispositivi) è giunta a ricoprire nella vita degli individui. A partire da un utilizzo esclusivamente professionale dei primi cellulari, si è passati a una crescente diffusione anche domestica e personale a seconda delle esigenze delle diverse fasce di età. Benché sia ancora estremamente diffuso un uso per fini lavorativi il cellulare è divenuto anche uno dei principali mezzi di comunicazione personale, sia all'interno delle famiglie (anche i giovanissimi oggi ne possiedono uno) sia a livello trasversale nei diversi ambiti di rapporto sociale. La durata tecnica dei telefoni cellulari può essere di circa 10 anni ma la maggior parte degli utenti sostituisce il vecchio dispositivo per usufruire di tutti i vantaggi proposti ed offerti dai nuovi modelli tecnologici, che hanno visto in questi anni non solo un cambiamento dal punto di vista strutturale ed estetico (con un'evidente diversificazione nella loro composizione di materiali utilizzati per fabbricarli) ma anche un incremento in quantità dovuto alle continue modifiche multimediali, ai prezzi in calo tra i concorrenti sul mercato e dalle strategie di marketing dei produttori ed operatori di rete che promuovono i loro nuovi dispositivi. La vita utile dei telefoni cellulari dunque è stimata a 1-2 anni nei paesi più sviluppati e 3 anni ([Huang et al., 2008](#)) nei paesi in via di sviluppo, di conseguenza vengono considerati prodotti elettronici a ciclo breve. Così come i rifiuti elettrici ed elettronici di piccola dimensione, i telefoni cellulari contribuiscono solo in minima parte al peso totale dei RAEE generati, tuttavia le quantità di metalli preziosi contenute in ogni singolo telefono mobile (come oro, argento, rame etc.) sono molto elevate rispetto quelle contenute nelle altre apparecchiature quindi è importante focalizzare l'attenzione su questi rifiuti, così che il loro recupero, possa diventare un'importante risorsa per l'uomo e limitare gli impatti ambientali.

2.2. Quadro normativo e sistema di gestione RAEE

2.2.1. Normativa UE

La normativa Europea in materia di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche regola la gestione e il corretto trattamento dei rifiuti secondo il principio europeo del “chi inquina paga”. La Direttiva Europea 2012/19/UE sui RAEE, entrata in vigore il 13 agosto 2012, sostituisce le direttive precedenti e disciplina tale gestione. Le categorie di AEE presenti nella seguente direttiva sono suddivise nella maniera seguente:

- 1) Grandi elettrodomestici
- 2) Piccoli elettrodomestici
- 3) Apparecchiature informatiche e per telecomunicazioni
- 4) Apparecchiature di consumo e pannelli fotovoltaici
- 5) Apparecchiature di illuminazione
- 6) Strumenti elettrici ed elettronici (ad eccezione degli utensili industriali fissi di grande dimensione)
- 7) Giocattoli e apparecchiature per il tempo libero e lo sport
- 8) Dispositivi medici (ad eccezione di tutti i prodotti impiantati ed infettati)
- 9) Strumenti di monitoraggio e di controllo
- 10) Distributori automatici

Le normative comunitarie hanno il compito di fornire indicazioni agli stati membri per implementare una gestione dei RAEE con le seguenti finalità primarie:

- prevenire la produzione di rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche
- promuovere il reimpiego, il riciclaggio ed il recupero dei RAEE
- migliorare, sotto il profilo ambientale, l'intervento dei soggetti che partecipano al ciclo di vita di dette apparecchiature (produttori, distributori, consumatori)
- ridurre l'uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elettriche ed elettroniche

L'UE a seguito dell'emanazione del decreto sopra citato, pone come obiettivi l'obbligo, dal 2016, di raccogliere 45 tonnellate di RAEE per ogni 100 tonnellate di nuove AEE prodotte e fissa, entro il 2019, inoltre il target di raccolta a cui devono tendere i Paesi europei è pari al 65% del peso medio delle AEE immesse sul mercato nei tre anni precedenti (Tabella 2).

Tabella 2: Obiettivi posti dall'Unione Europea sulla raccolta RAEE.

Anno	2012	2013	2014	2015	2016	2017	2018	2019	2020
<i>Target</i>	4Kg/abitante oppure media kg/abitante raccolti nei tre anni precedenti				45% immesso sul mercato (media dei tre anni precedenti)			65% immesso sul mercato oppure 85% RAEE generati	

2.2.2. Normativa italiana

Le direttive europee sono state recepite in Italia dapprima dal Decreto Legislativo 151 del 25 novembre 2005, con il quale si è definito il funzionamento del Sistema di gestione dei RAEE in Italia. Oggi tale decreto è sostituito dal Decreto Legislativo n. 49 del 14 marzo 2014 e si attiene al principio della *Responsabilità Estesa del Produttore (EPR, extended producer responsibility)*. Esso sancisce la riduzione degli impatti ambientali negativi derivanti dalla progettazione e dalla produzione delle AEE e dalla gestione dei rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche, RAEE con i relativi obiettivi di raccolta, riciclaggio e recupero. Le finalità della normativa riguardano e stabiliscono:

- Classificazione dei RAEE
- l'obbligo, per i produttori ed i distributori, di finanziamento al sistema di recupero e riciclo dei prodotti immessi sul mercato (principio della "responsabilità estesa del produttore");
- misure miranti in via prioritaria a prevenire la produzione di rifiuti di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (RAEE) ed inoltre al loro reimpiego, riciclo e ad altre forme di recupero in modo da ridurre il volume dei rifiuti da smaltire.

Il decreto sostituisce in parte anche i decreti attuativi:

- Decreto ministeriale 25 settembre 2007 (Istituzione del Comitato di Vigilanza e Controllo)
- Decreto ministeriale 185/2007 (Istituzione del Registro Nazionale dei Produttori, del Centro di Coordinamento RAEE e del Comitato di Indirizzo)
- Decreto ministeriale 65/2010 (regolamento di introduzione delle semplificazioni per il ritiro "1 contro1")

DECRETI MINISTERIALI: Decreto Ministeriale 9 marzo 2017, n.68; Decreto Ministeriale 17 giugno 2016; Decreto Ministeriale 31 maggio 2016, n.121.

I RAEE vengono classificati in due grandi categorie, a seconda del loro uso in ambito domestico o professionale, stabilendo diversi percorsi di recupero e smaltimento:

- RAEE Domestici → utilizzati nelle case o assimilabili per uso anche se provenienti da altri ambiti
- RAEE Professionali → provenienti da attività economiche o amministrative

Sono considerati RAEE domestici (art. 4 comma 1 punto l) del D.lgs. 49/2014 quelli originati da nuclei domestici e quelli di origine commerciale, industriale e istituzionale che per natura e quantità possono essere considerati analoghi a quelli originati dai nuclei domestici.

Il finanziamento dei costi di gestione dei RAEE domestici può avvenire attraverso l'applicazione dell'eco-contributo, ossia un sovrapprezzo applicato alla vendita di nuovi prodotti, evidenziato in fattura, che racchiude le spese sostenute per il trattamento, recupero e smaltimento di questa categoria. La normativa definisce:

Produttore di AEE è la persona fisica o giuridica che, indipendentemente dalla tecnica di vendita utilizzata, fabbrica, rivende e immetta AEE sul mercato nazionale. I produttori adempiono ai propri obblighi derivanti

dalle disposizioni del decreto mediante sistemi di gestione individuali o collettivi, operanti in modo uniforme sull'intero territorio nazionale. I cittadini hanno un ruolo importante all'interno di questa normativa, sono infatti tenuti a:

- Separare i RAEE dagli altri rifiuti
- Non togliere e/o smontare parte delle apparecchiature e non manometterle;
- Conferire questi rifiuti alla distribuzione o in alternativa, al Centro comunale di raccolta o al servizio su chiamata attivato dal Comune.

I distributori di AEE sono obbligati a ritirare gratuitamente un RAEE domestico del quale l'utente/cliente intende disfarsi, nel momento in cui viene consegnata un'apparecchiatura nuova, a condizione che questa sia di tipo equivalente e la vecchia abbia svolto le stesse funzioni della nuova apparecchiatura fornita. I distributori hanno facoltà di provvedere ad organizzare luoghi di raggruppamento anche tramite un soggetto terzo (gestore del Luogo di Raggruppamento) e/o scegliere l'opzione del ritiro da parte dei Sistemi Collettivi direttamente presso i luoghi di raggruppamento organizzati da altri distributori, secondo le modalità indicate nel DM 8 marzo 2010, n. 65.

Il luogo di raggruppamento diverso dal punto vendita, anche più di uno, può consistere in un magazzino, un deposito, locali di proprietà di un privato o locali di un centro logistico gestito anche da terzi e deve essere idoneo, non accessibile da parte di estranei e pavimentato. I RAEE devono essere protetti da pioggia e vento, con mezzi di copertura anche mobili; devono essere prese tutte le precauzioni necessarie per mantenerli integri (mantenuti nello stato in cui sono stati consegnati senza manomissioni), evitare il deterioramento e impedire la fuoriuscita di sostanze pericolose.

Il trasporto dei RAEE in modalità semplificata, effettuato direttamente dal distributore o da un trasportatore incaricato, devono essere registrati i mezzi impiegati con il rispettivo limite di capacità, compilato il documento di trasporto con la descrizione del tragitto compiuto. Compete al distributore l'obbligo di informare i consumatori della gratuità del ritiro del RAEE al momento della fornitura di una AEE nuova.

L'Albo Nazionale Gestori Ambientali è stato istituito dal D.lgs. 152/2006. E' costituito presso il Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare ed è articolato in un Comitato Nazionale e in Sezioni regionali e provinciali. Devono iscriversi all'Albo:

- Gli enti e le imprese che svolgono attività di raccolta e trasporto di rifiuti
- Le imprese che svolgono attività di commercio e intermediazione dei rifiuti senza avere la detenzione dei rifiuti stessi
- Le imprese che svolgono attività di bonifica dei siti
- Le imprese che svolgono attività di bonifica dei beni contenenti amianto
- Le imprese che svolgono esclusivamente il trasporto transfrontaliero dei rifiuti
- I produttori iniziali di rifiuti non pericolosi che effettuano operazioni di raccolta e trasporto dei propri rifiuti.

Le Diverse modalità di gestione dei RAEE:

- A) Consegna del RAEE da parte del cliente direttamente al punto vendita del distributore (non si genererà alcuna tipologia di trasporto).
- B) Ritiro dei RAEE
 - B1) Dal cliente e rientro al punto vendita del distributore che funge anche da deposito preliminare
 - B2) Dal cliente e rientro al deposito preliminare alla raccolta in luogo diverso dai locali di vendita (Il trasporto in entrambi i casi avviene con documento di trasporto)
 - B3) Al punto vendita e deposito preliminare alla raccolta in luogo diverso dai locali di vendita
- C) Trasporto RAEE dal deposito preliminare alla raccolta al centro comunale di raccolta.
- D) Trasporto RAEE dal cliente al centro comunale di raccolta.
- E) Trasporto RAEE direttamente dal cliente all'impianto o centro di raccolta.

Vi è una gestione semplificata introdotta dal DM. 8 marzo 2010, n. 65, riguardo il cosiddetto “uno contro uno” (Figura 2) obbligatorio dal 18 giugno 2010, ma anche al ritiro “dell'uno contro zero” (Figura 3), modalità semplificata introdotta dal DM 121 del 31 maggio 2016.

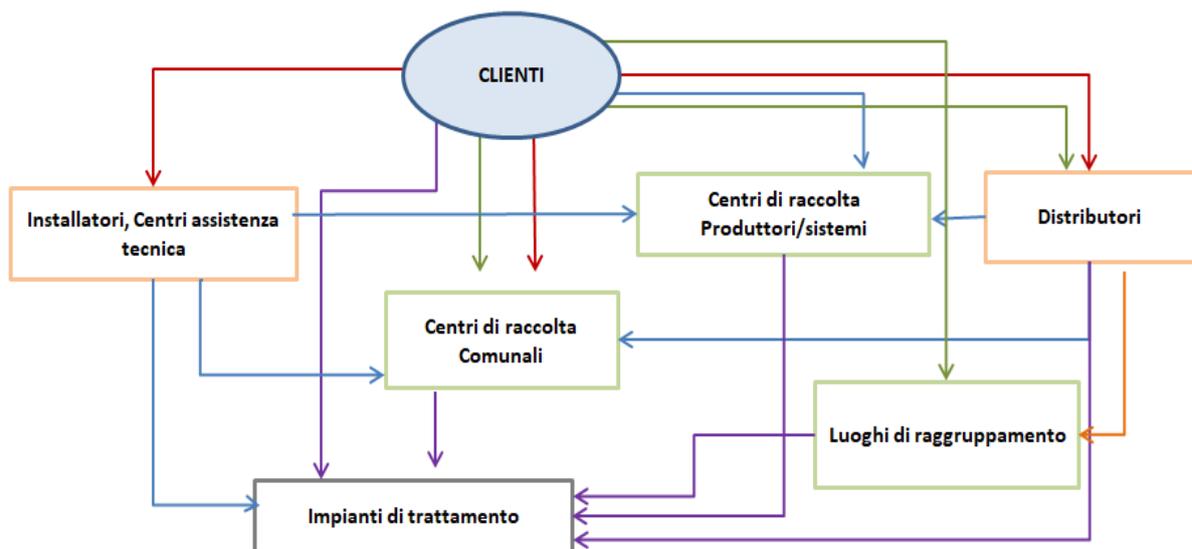


Figura 2: Schema di gestione 1 contro 1

- Conferimento dei RAEE diretto da parte del cliente al:
 - Centro di raccolta comunale
 - Distributore
 - Installatore/Centro assistenza
- Ritiro dei RAEE da parte dei distributori/installatori- Centro assistenza con conferimento alla sede:
 - Del distributore o su un luogo di raggruppamento
 - Del Centro assistenza

- Al centro di raccolta comunale
- Ritiro dei RAEE dal punto vendita del distributore e conferimento al proprio luogo di raggruppamento
- Trasporto dei RAEE dal punto vendita del Distributore/Luogo di raggruppamento, dalla sede del Centro Assistenza al centro di raccolta Comunale o privato.
- Trasporto dei RAEE dal punto vendita del Distributore/Luogo di raggruppamento, dalla sede del Centro Assistenza, dal Cliente verso gli impianti di trattamento.

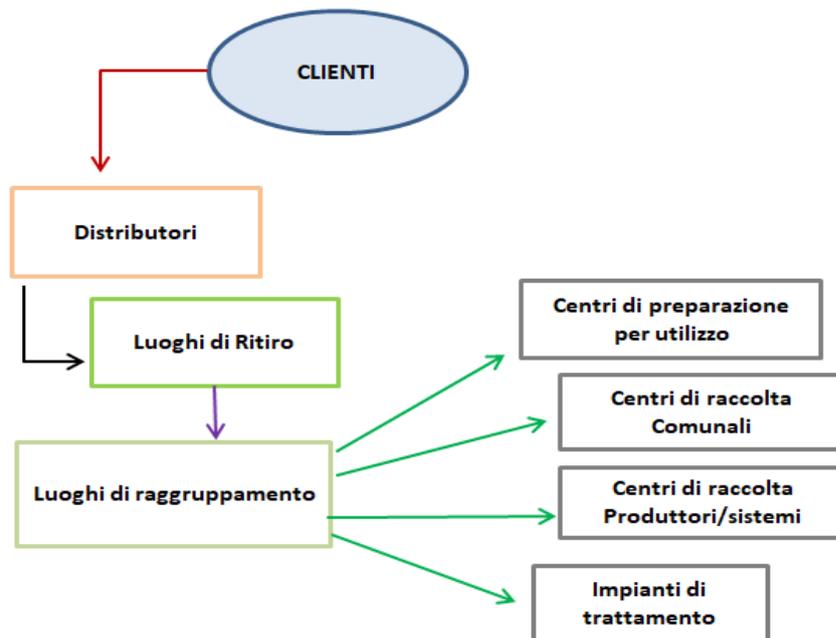


Figura 3: Schema di gestione 1 contro 0 (fonte: U1292_2017_2017-Guida_RAEE_To promosso da Camera di Comm Industria artigianato e agricoltura torino realizzato da ecocerved)

- Conferimento dei RAEE di piccolissime dimensioni direttamente da parte del cliente al Distributore sul luogo di ritiro allestito nei locali del punto vendita o in prossimità immediata.
- Il Distributore effettua periodicamente lo svuotamento verso il successivo luogo di raggruppamento/deposito preliminare con conferimento alle varie sedi.
- Il trasporto dei RAEE dal luogo di raggruppamento alle diverse destinazioni avviene con documento di trasporto predisposto in 3 copie.

2.2.3. Sistemi collettivi e Centro di Coordinamento RAEE

I RAEE domestici sono in genere conferiti a un Centro di Raccolta comunale o a un Centro di Raccolta privato, mentre quelli professionali sono destinati agli impianti di trattamento autorizzati indicati dal produttore (o dal Sistema Collettivo di riferimento).

La normativa suddivide i rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche in 5 raggruppamenti, al fine di ottimizzare la logistica e il trattamento. I raggruppamenti sono quelli definiti all'Allegato I del regolamento 25 settembre 2007, n. 185:

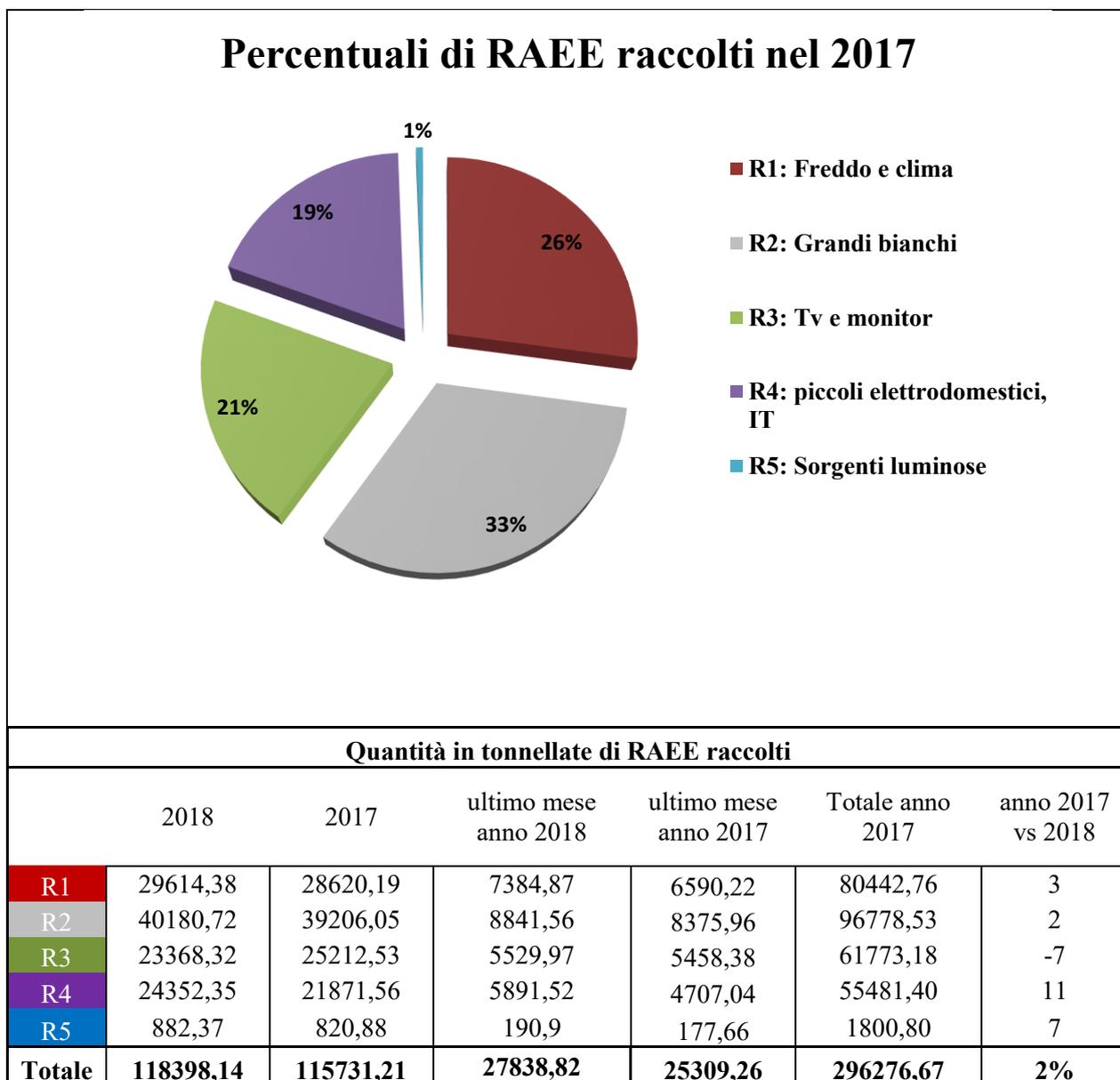
- R1 - Grandi elettrodomestici: frigoriferi, condizionatori, congelatori, ecc.;
- R2 - Altri grandi elettrodomestici: lavatrici, forni, cappe, ecc.;
- R3 - TV e monitor;
- R4 - Elettronica di consumo: aspirapolvere, PC, telefoni, hi-fi, ecc.;
- R5 - Sorgenti luminose.

L'art. 10 del D.lgs. 49/2014 prevede che "I produttori che non adempiono ai propri obblighi mediante un sistema individuale devono aderire ad un Sistema Collettivo".

- Tramite i Sistemi Collettivi i produttori possono assolvere agli obblighi di finanziamento delle operazioni di raccolta, trattamento, recupero e smaltimento dei RAEE domestici.
- I Sistemi Collettivi dei produttori di AEE, provenienti dai nuclei domestici, hanno l'obbligo di iscrizione al Centro di Coordinamento.
- I Sistemi Individuali e Collettivi di gestione dei RAEE professionali non hanno obbligo di iscrizione.

Il Centro di Coordinamento RAEE (CdC RAEE) è l'organismo centrale che si occupa di ottimizzare la raccolta, il ritiro e la gestione dei RAEE nel territorio italiano, coordina tutte le attività attraverso la gestione di una banca dati a cui devono iscriversi tutti gli impianti di trattamento dei suddetti rifiuti. Il CdC RAEE è gestito e governato dai Sistemi Collettivi sotto la supervisione del Ministero dell'Ambiente e della Tutela del Territorio e del Mare e del Ministero dello Sviluppo Economico. E' il punto di riferimento per tutti i soggetti coinvolti nella filiera dei RAEE, opera secondo regole definite dall'Assemblea dei Soci e mediante procedure e regolamenti derivanti da specifici accordi e convenzioni. I Sistemi Collettivi dei produttori di Apparecchiature Elettriche ed Elettroniche (AEE) provenienti dai nuclei domestici che operano sul territorio, hanno l'obbligo di iscrizione al Centro di Coordinamento, mentre i Sistemi Individuali e Collettivi di gestione dei RAEE professionali non hanno obbligo di iscrizione. Oltre a operare, in modo omogeneo, su tutto il territorio nazionale il CdC RAEE agisce al fine di incrementare la raccolta di questa tipologia di rifiuti da parte dei Comuni italiani e di conseguire i nuovi obiettivi di raccolta europei a salvaguardia, tutela e miglioramento della qualità dell'ambiente e della salute umana.

Tabella 3: *Quantità di RAEE raccolti in Italia (fonte: CdC RAEEE, dati aggiornati al 18/06/2018)*



La responsabilità estesa del produttore (EPR) adottata in Italia si concentra sull'aspetto tecnico e sulle prestazioni economiche delle organizzazioni di gestione dei RAEE, essendo attori chiave di questo sistema nazionale. L'obiettivo della prima direttiva RAEE (4 kg pro capite) è stato superato, per cui sono necessari dei miglioramenti per raggiungere gli obiettivi fissati dalla normativa europea per il 2019. Analizzando la situazione italiana nel panorama Europeo è importante osservare l'andamento della raccolta RAEE sul territorio nazionale (Tabella 3): con un quantitativo assoluto pari a 296276.67 kg di rifiuti elettrici ed elettronici raccolti nel 2017, il CdC RAEE registra un incremento del 6% rispetto allo stesso periodo dell'anno precedente, concentrato prevalentemente nei raggruppamenti R2 (grandi bianchi) e R4 (piccoli

elettrodomestici). Da notare invece la discesa della categoria R3 (Tv e monitor), in linea con il consumo negli ultimi anni.

Il CdC RAEE ha inoltre illustrato lo status degli impianti di trattamento di questi rifiuti in Italia (Tabella 4). A fronte di circa 358mila tonnellate trattate, la maggior parte (218 mila pari al 61%) viene gestita in impianti del Nord Italia, mentre la restante parte si divide quasi equamente tra Centro Italia (75mila tonnellate), Sud e Isole (65mila tonnellate). Inoltre, un totale di 3.045 strutture registrate al Centro di Coordinamento, risultano distribuite per la maggior parte al Nord con 1.968 impianti, al Centro Italia 522 impianti e 555 nel Sud e nelle Isole. I dati mostrano un numero di impianti per il trattamento dei RAEE ancora insufficiente a coprire il fabbisogno di gestione attuale e futura anche in virtù di un ulteriore incremento della raccolta di questi rifiuti.

Tabella 4: Dati sui RAEE prodotti (fonte: CdC RAEE Dichiarazione annuale impianti).

Anno	Imnesso totale negli ultimi 3 anni (tonn)	Valore medio (tonn)	Raccolta (tonn)	Tasso di raccolta (%)	Target (%)	Tasso vs Target (%)
2015	2.595.962	865.017	322.09	37,23	45	-7,77
2016	2.630.270	876.757	358.383	40,87	45	-4,13
2017	2.807.847	935.949	935.949	40,89	45	-4,11

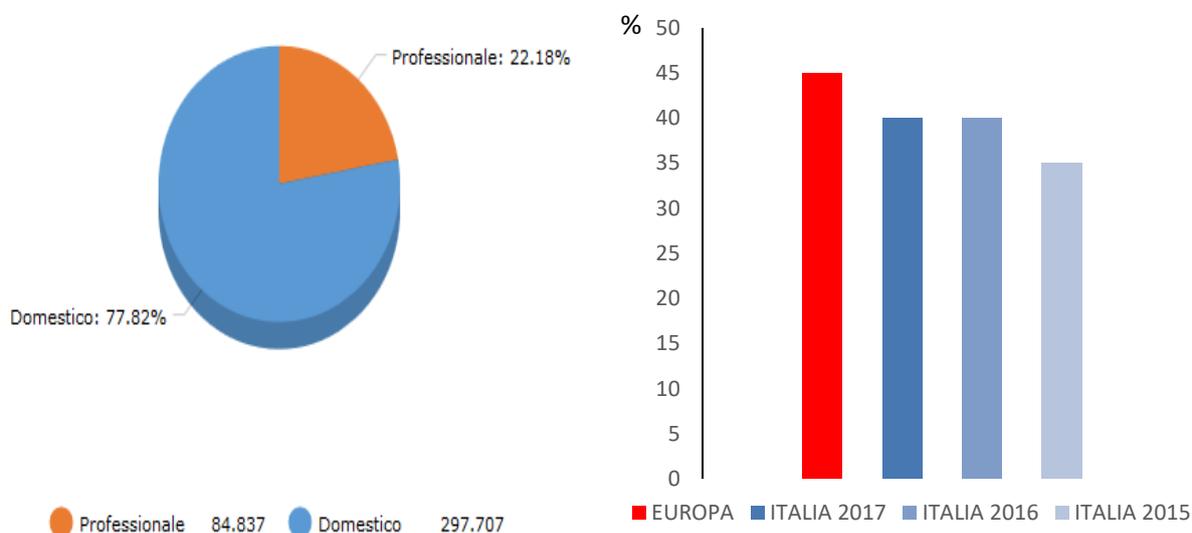


Figura 4: dati di raccolta RAEE e differenza con UE (fonte CdC RAEE).

Nella Figura 4 è possibile vedere le percentuali di RAEE raccolti in Italia divisi in professionali (22,18%) e domestici (77,82%). A destra invece è possibile notare il miglioramento di percentuale di raccolta RAEE in Italia nel 2016 e 2017 (40%) rispetto l'anno 2015 (35%), al di sotto però ancora del target europeo (45%).

2.3. Percentuale d'intercettazione e classificazione

La stima dei RAEE generati è indispensabile per una gestione sostenibile e per determinare l'efficacia di trattamento di queste apparecchiature al fine di recuperare quanto più materiale utile e prezioso. Per stimare i flussi di apparecchiature elettriche ed elettroniche, e quindi i relativi rifiuti prodotti, si hanno delle complicazioni soprattutto per i telefoni cellulari in quanto si presentano in numero relativamente grande ma le dimensioni del singolo oggetto sono piuttosto piccole. Questo porta a scartare tali dispositivi insieme ai rifiuti solidi urbani (RSU) e costituisce il 5% di questi che è in netta crescita nei paesi più sviluppati. E' utile quindi capire quali sono i flussi in input e output per determinare il numero di dispositivi ancora fluttuanti in circolazione potenzialmente recuperabili e trattabili. Definire infatti quanti telefoni cellulari sono obsoleti e quindi smaltiti dagli utenti porta a delle imprecisioni di stima e degli errori di calcolo perché molti di questi non si trovano in uno stato prossimo allo smaltimento bensì vengono accantonati e conservati da molti utenti per permetterne un secondo riutilizzo o una probabile rivendita. Per tale motivo è utile conoscere le abitudini, gli usi e la gestione dei telefoni cellulari da parte degli utilizzatori ed in quale contesto sociale, economico e politico fanno riferimento. Ciò è possibile utilizzando dei modelli che si fondono attraverso tre tipi di analisi: proiezioni del flusso di massa dei prodotti, durata della vita utile del prodotto, ovvero da quando è AEE a quando diventa RAEE e composizione dei materiali di cui sono costituiti; in tal modo è possibile stimare la quantità di RAEE smaltite nel tempo, evidenziando i potenziali ricavi dal riciclaggio ed i benefici ambientali ad essi connessi. Negli studi precedenti sono stati individuati parecchi metodi e modelli, usati per stimare la produzione di RAEE (UNEP, 2007; Li and Liu, 2013) e tutti ovviamente, dipendono principalmente dalla disponibilità e dalla qualità dei dati. Uno dei modelli utilizzato per stimare la quantità di RAEE in circolazione è il modello input-output. Il modello input-output è finora il più promettente e comunemente usato per la stima dei flussi RAEE costituito da molte varianti, si valutano quantitativamente le fonti, i percorsi e la destinazione finale dei flussi di materiali. E' applicato in molte regioni e paesi e sono necessarie le informazioni riguardo la vita utile del prodotto. Questo modello può svilupparsi con altri approcci come il metodo dell'offerta di mercato (incluso il mercato classico, metodo di approvvigionamento, offerta di mercato metodo A e metodo Stanford), approccio al consumo e all'utilizzo, metodo time-step, metodo MFA, analisi della fase d'uso, modello ICER e metodo Carnegie Mellon. Le vendite, il possesso, la durata e la distribuzione sono informazioni essenziali per il modello input-output. Concentrandosi sui RAEE costituiti da telefoni cellulari a fine vita, si può stimare la produzione di questi attraverso approcci che sono principalmente un'estensione del modello input-output. Con i dati a mia disposizione è stato possibile utilizzare il "Market supply method" (Kim et al., 2013; Li et al., 2015; Tan and Li, 2014; Song et al., 2016), per prevedere la stima dei rifiuti di telefoni cellulari:

$$Q_w = \sum_i S_{w-i} * P_i \quad (1)$$

Dove:

Q_w è la quantità di rifiuti di telefoni cellulari prodotta nell'anno di riferimento w ;

S_{w-i} è la quantità di telefoni cellulari venduti nell'anno $w-i$;

P_i è la percentuale di telefoni cellulari con vita utile i

Usando il Metodo "Gompertz Curve" (vedi Formula (2)) si riesce a prevedere quali possono essere le future vendite e quindi i rifiuti generati negli anni avvenire;

$$y^t = ka^{b^t} \quad (2)$$

Dove:

y^t è il volume delle vendite di telefoni cellulari nell'anno t ;

k , a e b sono parametri ($K > 0$, $0 < a < 1$, $0 < b < 1$)

Attraverso l'analisi dei dati relativi alle vendite dei telefoni cellulari (dati: [ISTAT](#)) sono riuscito ad intercettare un valore di unità vendute nel 2006 e ricercando le variazioni in percentuale di queste nel corso degli anni ho calcolato le vendite effettive che ci sono state successivamente ed ho ipotizzato quelle che avverranno in futuro.

La quantità di telefoni cellulari smaltiti per ogni anno, calcolata attraverso la formula 1, con un valore medio di vita utile i pari a 3 anni ed una probabilità P_i del 40%, che rappresenta la popolazione di dispositivi che ha proprio quella vita utile. La sommatoria quindi fa riferimento alle quantità vendute nei 3 anni precedenti moltiplicata per la percentuale P_i . Per trovare il volume di vendite stimato con la formula 2, ho dovuto ipotizzare le variabili che mancano, le quali stanno a rappresentare ed indicare le condizioni sociali, politiche ed economiche oltre alle abitudini della popolazione; nel caso in esame si è scelto di attribuire i seguenti valori alle rispettive variabili mancanti: $k=2$, $a=0,9$ e $b=0,9$. I risultati ottenuti del possibile trend di unità vendute e rifiuti prodotti, sono mostrati in Figura 5.

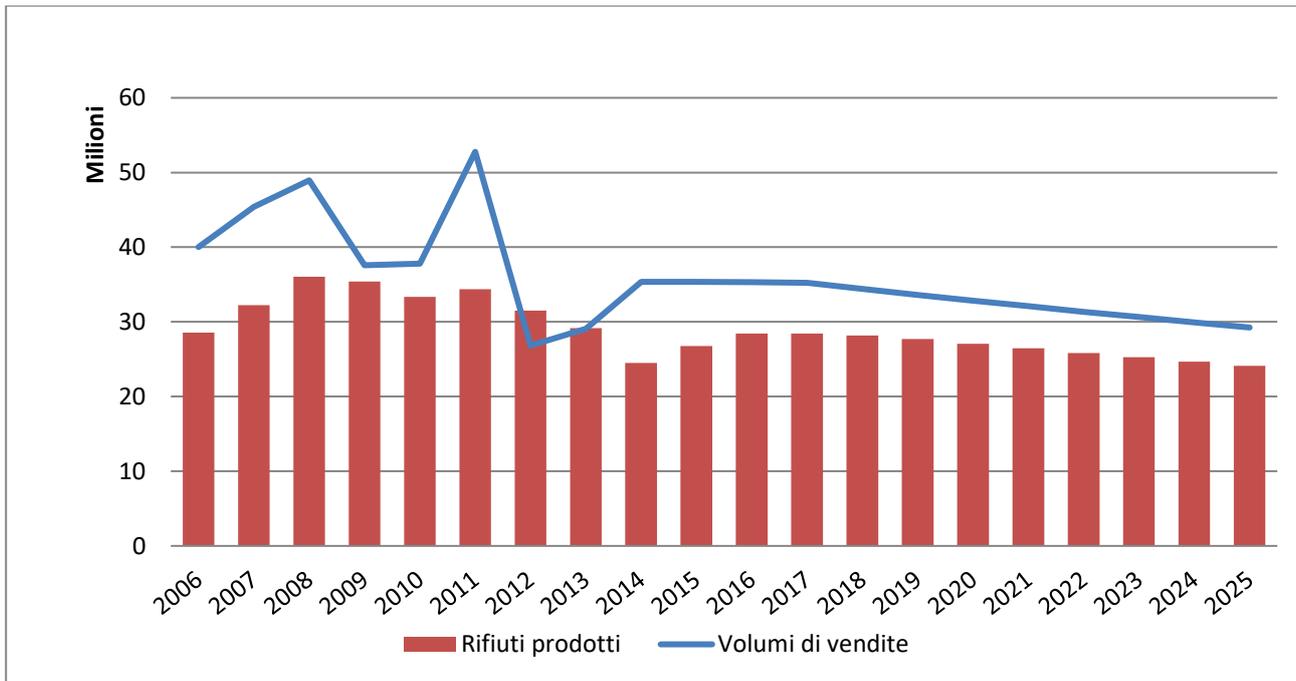


Figura 5: Telefoni cellulari scartati e rispettive vendite negli anni.

Molti dati necessari alle stime delle quantità di oggetti e delle loro intercettazioni sono stati estrapolati da ogni singola fase elencata precedentemente, anche se molte variabili non sono rimaste costanti ed uniformi nel tempo, modificando la vita utile di qualsiasi AEE attraverso il l'evoluzione della tecnologia nei diversi Paesi e regioni del mondo. Inoltre la vastità e la varietà di questi nuovi modelli immessi sul mercato ha causato una difficoltà nella loro classificazione ed uniformità d'analisi. Molti autori tra cui [Quanyin Tan et al.](#) hanno classificato tali dispositivi in funzione dell'estetica e delle funzioni meccaniche (ad esempio la dimensione dello schermo) oltre alle molteplici funzioni tecnologiche che negli anni sono state implementate e fanno sì che ci siano caratteristiche diverse nelle componenti che costituiscono il dispositivo.

In questo lavoro di tesi ho scelto di suddividere i dispositivi analizzati in due macro categorie:

- smartphone (con touchscreen e sistemi operativi)
- cellphone o feature phone (senza touchscreen e/o sistema operativo)

Attualmente, i dispositivi più vecchi (feature phone) vengono abbandonati più frequentemente rispetto i nuovi modelli e smartphone ma verranno analizzati anche quest'ultimi nella stima di critical raw material recuperato. L'intercettazione dei RAEE in generale e dei telefoni cellulari a fine vita in particolare è una fase molto delicata che deve essere eseguita in modo da garantire l'integrità del bene dismesso durante la raccolta ed il trasporto di essi.

2.4. Trattamento dopo la raccolta

Dopo che i telefoni cellulari vengono intercettati e raccolti, essi vengono portati in impianti di trattamento per essere smontati insieme alle altre categorie di RAEE. La prima fase è quella di pre-trattamento e messa in sicurezza, nella quale i rifiuti in ingresso al centro di smaltimento vengono sottoposti, come previsto dalla legge, a controllo radiometrico per verificare l'eventuale presenza di sostanze radioattive. Tutti seguono una linea composta da una cernita e smontaggio manuale da parte di operatori qualificati, attraverso una lavorazione preliminare che consiste nell'asportazione di parti mobili e nella rimozione di eventuali materiali pericolosi. A differenza di altre apparecchiature il trattamento di telefoni cellulari in questa fase presenta delle notevoli differenze, dovuto alla piccola e complessa struttura ed al materiale prezioso contenuto nelle schede elettroniche, le PCBs (printed circuit board), difficilmente estraibili attraverso processi meccanici. In questa fase è opportuno quindi rimuovere tutte le componenti che contengono sostanze dannose per l'ambiente e difficilmente recuperabili con i trattamenti successivi (ad esempio batterie, carica batterie ec.) oltre appunto alle PCBs.

Tolte queste componenti, i telefoni cellulari possono essere inviati in linea di trattamento che consiste in una fase automatizzata di frantumazione e separazione dei materiali. In questa fase vengono ridotte le dimensioni delle particelle per avere un efficiente recupero di materiale nelle fasi di trattamento successive, separati attraverso sistemi meccanici in funzione della composizione, densità e forma delle particelle. Tuttavia, le diverse tipologie e modelli poco omogenei tra loro contengono ancora tracce di materiali e metalli preziosi nelle varie componenti che costituiscono i dispositivi (scocche, cover ecc.).

I processi automatizzati che riguardano la riduzione di pezzatura dei dispositivi incluse le PCBs prevedono sì non solo una separazione delle frazioni ma anche delle perdite significative di materiale da recuperare. Gli studi hanno mostrato infatti che quando si impiegano tali processi si ha un'efficienza di recupero di oro e palladio da queste apparecchiature fino al 25%, nello smontaggio manuale invece si hanno tassi di recupero più elevati (fino a 95% per l'oro) (Hagelüken e Meskers, 2013). Il problema sta nelle polveri generate durante questo processo perché ancora ricche di materiale prezioso difficile da separare, oltre al fatto che contengono metalli ed elementi pericolosi e delicati da smaltire come piombo e stagno, nonché elementi alogeni, (Wang et al., 2015). Le polveri rappresentano in massa una percentuale bassa rispetto l'input di materia che entra in impianto per cui non è rilevante la quantità di materiale prezioso recuperato da esse (van Schaik e Reuter, 2014). E' da notare però che la composizione delle polveri è poco omogenea e pura, quindi bisogna tenerne in conto in termini di sicurezza ed impatti ambientali e della salute umana (Wang et al., 2015; Deng et al., 2014; Tesar et al., 2014; Xiang et al., 2007; Zheng et al., 2015).

Inoltre, le tecnologie di separazione meccanica a livello industriale mostrano un'efficienza di separazione relativamente bassa per il trattamento dei telefoni cellulari a fine vita, con alti dispendi energetici. Pertanto, la soluzione sta nello sviluppo e nell'adozione della tecnica più efficace e meno costosa che possa soddisfarci. Molti autori (Geyer and Blass (2010) Sebo and Fedorcáková (2013) Navazo et al. (2014) Chancerel et al., 2009; Chancerel and Rotter, 2009; Hagelüken, 2006; Morley and Eatherley, 2008) mettono a confronto i due

trattamenti (automatico e manuale) e giungono sempre alla conclusione che il metodo manuale è più efficiente, in quanto una separazione effettuata con l'impiego di strumenti comuni ma adatti allo smontaggio (mini cacciavite, pinze e martelli) permette una nitida distinzione delle parti che compongono i telefoni cellulari, vista la loro complessa struttura. E' un procedimento lungo, che richiede la manodopera di personale qualificato, e quindi risulta più oneroso, tuttavia rimane il metodo più efficiente per analizzare, quantificare e stimare il materiale presente all'interno dei telefoni cellulari che si può recuperare.

Quando i dispositivi sono difficili da smontare a causa di un design sofisticato o quando si ha un valore basso di materiale recuperato a causa dello scarso isolamento manuale delle varie componenti, si utilizzano approcci semi-automatici attraverso pretrattamenti intermedi con frantumazione grossolana che consentono di rompere gli involucri e facilitare il prelievo manuale delle PCBs tale da avere tassi di recupero per i metalli preziosi elevati (fino a 70% per l'oro) ed un costo inferiore rispetto ai processi manuali (Hagelüken and Meskers, 2013). Sono ancora attuali e frequenti i dubbi sulla futura sostenibilità dei RAEE e del loro riciclaggio, per cui è opportuna una riduzione del contenuto di metalli preziosi presenti in queste apparecchiature. Un'evidente riduzione si è avuta nell'industria dell'elettronica grazie alla "miniaturizzazione" delle componenti e grazie alla parsimonia nell'utilizzo di queste materie. La possibilità che un'apparecchiatura possa essere riciclata e recuperata dipende anche dalle difficoltà che si hanno nella separazione delle sue componenti attraverso i trattamenti meccanici, manuali e chimici, per cui diventa essenziale per il futuro rivedere ed analizzare le caratteristiche strutturali dei telefoni cellulari, migliorarne il design limitando l'uso di sostanze pericolose e favorirne la produzione utilizzando materiali biodegradabili, così da semplificare il trattamento e lo smaltimento di essi.

2.5. Componenti preziose nei telefoni cellulari

È possibile estrarre e recuperare il materiale prezioso che si trova nei dispositivi di comunicazione mobile in concentrazioni molto più elevate rispetto ai rifiuti di altre categorie di AEE, in funzione ovviamente del loro peso unitario (in un telefono cellulare è contenuto circa lo 0,04% di oro, pari a 400 g/t) (Takahashi et al., 2009). In Figura 6 vengono identificate le tipologie di materiali e sostanze che costituiscono un telefono cellulare; esso, in funzione dell'anno di produzione, è costituito all'incirca tra il 20% ed il 35% in peso da metalli (compresi quelli preziosi), tra il 40% ed il 60% in peso da plastiche e da circa un 10% in peso di ceramica (Bachér et al., 201; Chancerel e Rotter, 2009; Huisman, 2004; UNEP, 2009, 2013).

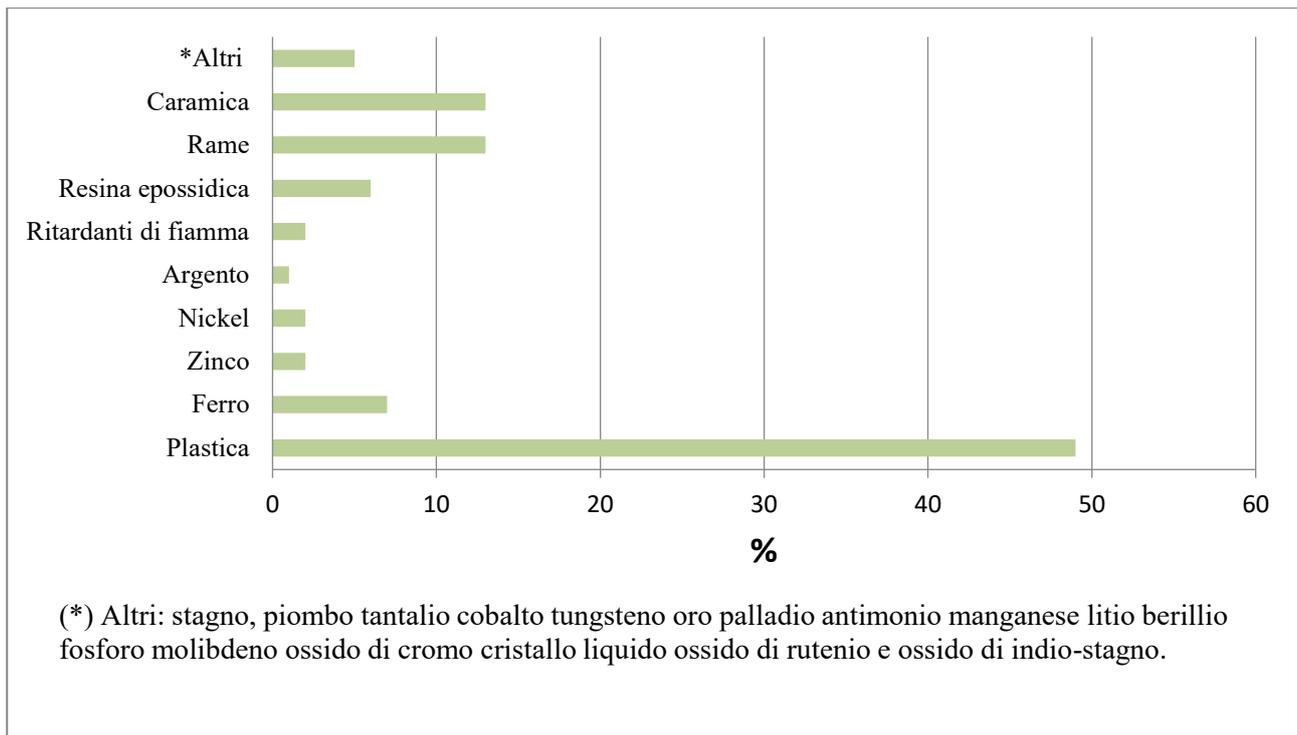


Figura 6: Composizione chimica e merceologica di un telefono cellulare (Bachér et al., 2011; Chancerel e Rotter, 2009; Huisman, 2004; UNEP, 2009, 2013)

Secondo Yamane et al. (2011), la composizione di PCB derivante da telefoni cellulari (PCB-MP) è 63% di metalli, 24% di ceramica e 13% di polimeri rispetto al peso della singola unità.

Un metodo efficace per determinare la tipologia e la quantità dei materiali presenti in una componente elettronica come una PCB è la spettrometria in fluorescenza a raggi X (XRF, x-ray fluorescence). Con questo metodo sono stati rilevati più di 20 metalli in una PCB (Yamane et al., 2011; Hall and Williams, 2007). Il rame (Cu) è il metallo con il più alto contenuto: circa 0,66 e 1,77 grammi in ogni PCB. Altri metalli come: Ca, Ba, Ag, Al e Ni, hanno contenuti relativamente elevati (0,2 grammi per ogni telefono). È interessante notare che uno dei dieci elementi più abbondanti nei telefoni cellulari è il trizio (Ti) mentre non sono mai stati rilevati cadmio (Cd) e mercurio (Hg) in nessun telefono cellulare secondo i dati in letteratura, ma cromo (Cr) e piombo (Pb) sono stati entrambi rilevati con un contenuto di circa 0,01 grammi. Sono stati rilevati elementi di terre rare (Nd, Y con contenuti medi rispettivamente di 0,01 e 0,04 grammi); il metallo alcalino-terroso (Rb) con 0,01 grammi; lo stronzio (Sr) con contenuto pari a 0,01 grammi e un altro metallo, Zr, di solito utilizzato in leghe, con un contenuto medio di 0,03 grammi (Kasper et al., 2011). Dal punto di vista del recupero economico, i metalli di grande interesse da recuperare dai telefoni cellulari a fine vita sono ovviamente i metalli nobili, tra cui Ag, Au, Hg, Pd e Pt che si trovano nelle componenti che costituiscono gli AEE (Tabella 5). Riferendoci ai dati di letteratura precedentemente analizzati (Yamane et al., 2011; Hall and Williams, 2007; Kasper et al., 2011), in funzione del peso medio di un dispositivo e del peso medio di una PCB, si può affermare che essa abbia un contenuto totale di metalli preziosi pari a 0,17 mg/kg.

Tabella 5: Usi principali dei metalli preziosi nelle AEE.

<i>Metalli critici</i>	<i>Usi principali nelle AEE</i>
Palladio (Pd)	Condensatori multistrato, connettori, PWB etc.
Platino (Pt)	Dischi rigidi, resistori, pannelli conduttivi al plasma
Oro (Au)	Fili di collegamento, contatti, circuiti stampati, circuiti integrati (IC)
Argento (Ag)	Contatti, interruttori, saldature (senza piombo), conduttori, MLCC,
Cobalto (Co)	Batterie ricaricabili
Litio (Li)	Batterie ricaricabili
Indio (In)	Vetri LCD, saldature (senza piombo), semiconduttori/LED etc.

Il recupero di metalli preziosi come oro, argento e palladio, contenuti nelle componenti elettroniche dei telefoni cellulari, avviene attraverso metodi di separazione chimica e fisica, lisciviazione con acqua regia, con soluzione di trifosfato, tecnologia di cianidazione e altri processi idrometallurgici come la fluidizzazione (tecnica molto promettente) dove l'efficienza della segregazione delle particelle solide dipende in gran parte dalla tipologia di processo e dai parametri fisici (come dimensione, densità e forma) e che consente l'estrazione di metalli preziosi in forma pura [V.S. Patwardhan et al., H.P. Liu et al., J.F. He et al.].

3. Attività sperimentale

3.1. L'impianto TBD gestito da AMIAT SpA

Lo stabilimento TBD (Trattamento Beni Durevoli) localizzato a Volpiano, a pochi km da Torino, è gestito da AMIAT (Azienda Multiservizi Igiene Ambientale Torino) SpA, che appartiene al Gruppo IREN (www.gruppoiren.it). Amiat SpA è responsabile della raccolta e della gestione dei rifiuti solidi nella città di Torino (900.000 abitanti). L'impianto TBD si estende su un'area coperta di 7000 m² e 5000 m² all'aperto, ed ospita quattro linee di trattamento dedicate alle categorie RAEE R1, R2, R3 e R4. Secondo i Bilanci di Esercizio Amiat degli anni 2014 e 2015 (disponibili su www.amiat.it), i rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche gestiti in impianto erano pari a circa 9500 tonnellate. La quantità di R4 si è attestata tra 1850 e 2100 tonn/anno dal 2014 in poi. L'impianto TBD opera in Autorizzazione Integrata Ambientale (AIA) ed è certificato Qualità, Ambiente e Sicurezza, CDC RAEE e WEE LABEX.

Le diverse lavorazioni prevedono la bonifica delle componenti pericolose e il recupero delle materie prime secondarie su quattro linee produttive in base alla tipologia di apparecchiature trattate. A fine processo dall'impianto escono materiali selezionati come rame, ferro, alluminio, plastiche, legno, schede a circuiti stampati e componenti elettronici.

L'origine dei materiali di scarto che entrano nell'impianto TBD è rappresentata da RAEE domestici e professionali. AMIAT Spa gestisce 9 Centri di Raccolta Rifiuti nell'area della Città Metropolitana di Torino, a fronte del 14,15% dei RAEE della stessa area (Rapporto CDC RAEE, 2016). Oltre alla quantità proveniente dalle proprie strutture di raccolta, l'impianto TBD riceve RAEE da consorzi associati operanti nella Città Metropolitana di Torino, e in province e regioni vicine (Lombardia ed Emilia Romagna). Per quanto riguarda i flussi in ingresso all'impianto, si può affermare che il 44% provenga dall'area della Città Metropolitana di Torino (di cui il 13% dai centri di raccolta rifiuti gestiti da AMIAT) e il restante 56% da consorzi associati operanti altrove (fonte: <http://www.amiat.it/cms/azienda/115-impianti/trattamento-beni-durevoli-raee>). Come stabilito dalla normativa, i sistemi collettivi sono autorizzati a vendere lotti dei loro RAEE agli impianti di trattamento, pagando una commissione calcolata dal costo per unità di peso relativo a ogni categoria. Questo è valido per R3 e R4, mentre per R1 e R2, la commissione è pagata dai sistemi collettivi all'impianto ricevente. Nella primavera 2018 il prezzo di mercato dei RAEE R4 era compreso tra 120 e 150 €/tonnellata.

Quando i RAEE arrivano in impianto vengono subito pesati e passati a controllo radiometrico, successivamente vi è una cernita manuale che separa le varie categorie di rifiuti, poi destinate a bonifica delle componenti pericolose in testa alle rispettive linee di trattamento.

3.2. Il test industriale

L'obiettivo primario di questo lavoro di tesi è l'analisi tecnica ed economica delle prospettive di trattamento finalizzate al recupero di telefoni cellulari, cordless e smartphone nel contesto Italiano. L'approccio concordato con i miei relatori ha previsto l'esecuzione di un test su scala industriale organizzato secondo le fasi seguenti (Figura 7):

1. **Campionamento** presso l'impianto TBD di 105 dispositivi mobili a fine vita (73 cellulari, 27 smartphone e 5 cordless): le abbondanze relative delle tre tipologie sono state definite coerentemente con le caratteristiche qualitative dei flussi in ingresso all'impianto;
2. Identificazione per ciascun dispositivo di modello, marca, anno di produzione, peso nello stato in cui è avvenuto lo smaltimento: la fase di **Inventario** ha permesso di valutare il tempo di vita utile e le caratteristiche quantitative e qualitative dei dispositivi;
3. Smontaggio manuale e **bilancio di massa** rispetto a componenti meccaniche, elettro-meccaniche e elettroniche;
4. **Caratterizzazione** chimica di schede a circuiti stampati (PCB) estratte da cellulari e smartphone (sono stati tralasciati i cordless, in quanto categoria poco significativa dal punto di vista quantitativo) mediante spettrometria in fluorescenza ai raggi X (XRF) e confronto con i dati di letteratura;
5. **Analisi economica** di due scenari alternativi di gestione, basati su ipotesi di vendita dei dispositivi tal quali o di un loro smontaggio manuale più o meno spinto.

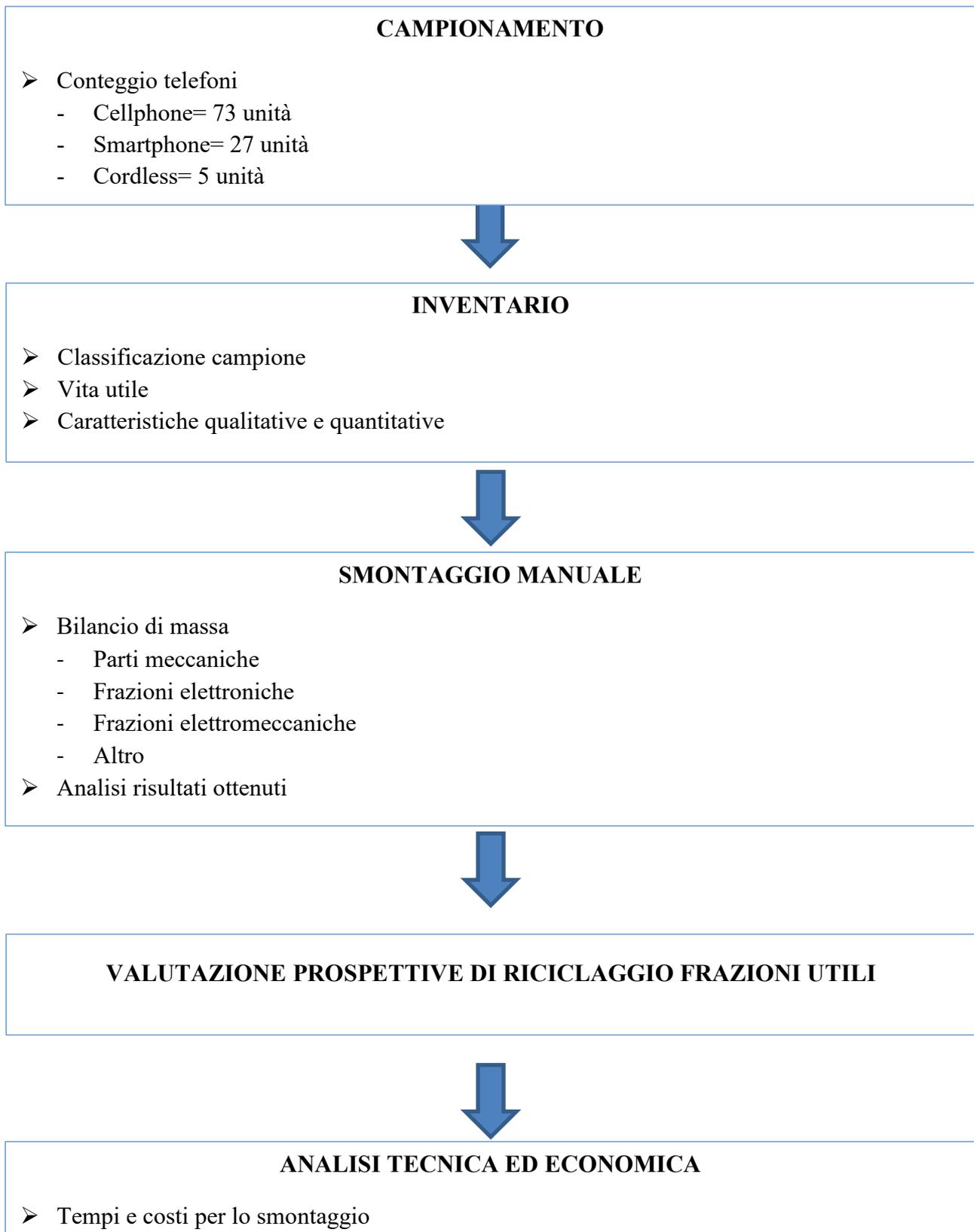


Figura 7: Schema dell'approccio metodologico al test industriale.

3.3. Inventario

L'identificazione della tipologia dei dispositivi è stata fatta sulla base delle proprietà interne (multimediali e innovative come touch screen, sistema operativo e memoria) e delle caratteristiche estetiche (dimensione dello schermo, presenza di antenne e tastiere) e soprattutto, attraverso il riconoscimento del produttore (brand) e del modello, che ha permesso di risalire alla scheda tecnica (Figura 8) ricavata da internet (<https://puntocellulare.it/cercafonino/index.html>). Essa funge da motore di ricerca dei telefoni cellulari, dandone la descrizione completa sulle proprietà del singolo dispositivo così da individuare il peso a nuovo, ed individuare le funzionalità operative, confrontarle tra i vari modelli e quindi classificarli come smartphone o cellphone.

Marca	Nokia
Modello	C2-02
Lancio sul mercato	Terzo trimestre 2011
Miglior Prezzo	Non disponibile
Indice popolarità	0,02

	<ul style="list-style-type: none">  Proprietario  2.6 pollici (QVGA)  2 MP  EDGE  10MB  1020mAh  Single SIM  SEGNALA ERRORI
--	--

SCocca	
Dimensioni	103 x 51,4 x 17 mm
Peso	115 g
Antenna	Integrata
Form factor	Apertura a scorrimento
Tastiera QWERTY	NO
Scocca resistente	NO
Colori scocca	Chrome Black Golden White

DISPLAY	
Ampiezza	2.6 pollici (66,04 mm)
Risoluzione	240x320 punti (QVGA)
Aspect Ratio	4:3
Densità pixel	154 ppi
Screen/Body	39,54 %
Colori	65 mila TFT
Touchscreen	SI (resistivo)

Figura 8: Esempio di una scheda tecnica utilizzata per il riconoscimento del dispositivo.

Per alcuni dispositivi, soprattutto quelli che delineano un passaggio dai vecchi ai nuovi modelli, non è stato semplice assegnarli ad una precisa categoria, ma grazie alla somiglianza di componenti e modalità operative con altri ho potuto assegnarli ad una delle due tipologie considerate.

I dispositivi sono stati codificati attraverso una lettera (S per gli smartphone, C per i cellphone e CL per i cordless) ed un numero progressivo. Nelle Figure 9, 10 e 11 si può vedere la quantità di dispositivi, per le tre categorie, suddivise per produttore.

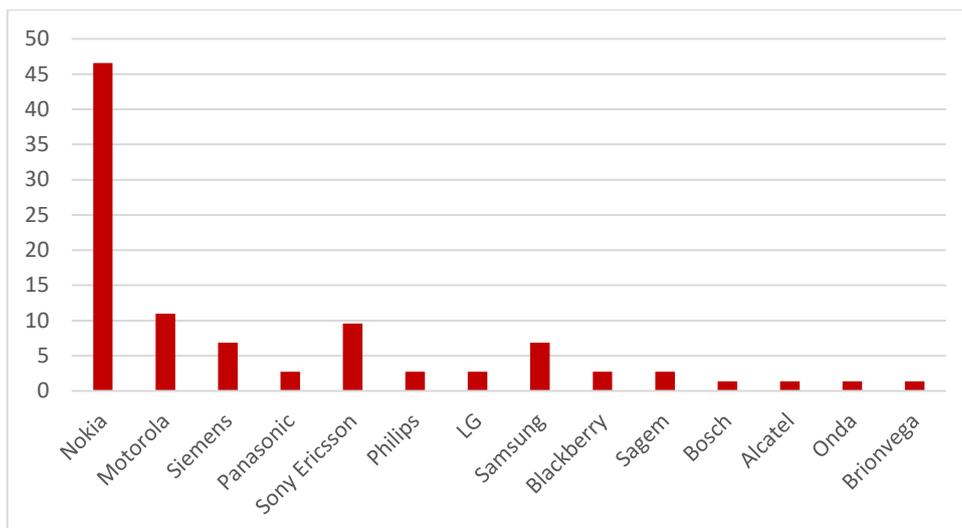


Figura 9: Numero di cellphone per singoli produttori. I valori riportati sono in percentuale (%).

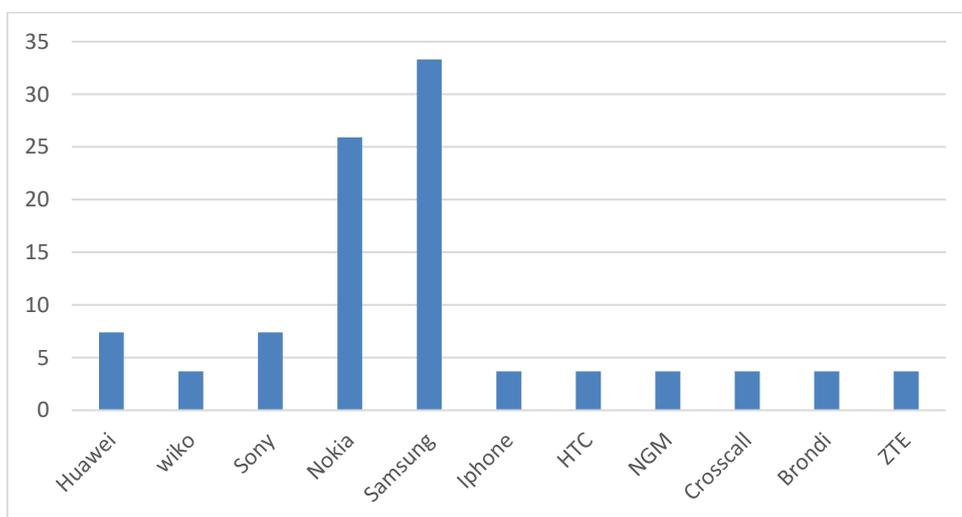


Figura 10: Numero di smartphone per singoli produttori. I valori riportati sono in percentuale (%).

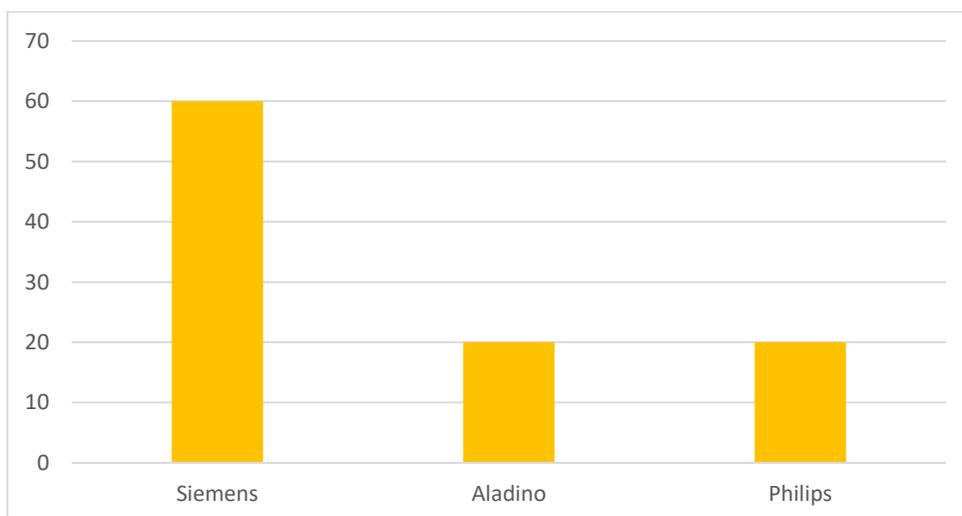


Figura 11: Numero di cordless per singoli produttori. I valori riportati sono in percentuale (%).

Nel corso degli anni è stato evidente il cambiamento dei telefoni cellulari in peso, dimensione e forma, parallelo all'evoluzione che si è avuta nel campo di "Information Technology" (IT). Il primo modello risale al 1983 (ben 36 anni fa). Esso si presentava poco pratico, difficilmente trasportabile e povero di funzionalità e memoria ma con un valore di mercato non indifferente data la poca disponibilità di pezzi. Da allora e per qualche anno a seguire non troviamo altri produttori che Motorola, la sola casa costruttrice che lancia sul mercato i primi modelli di telefoni cellulari. Dobbiamo aspettare gli anni '80 e '90 per vedere apparire in vetrina telefoni cellulari prodotti da Nokia, Siemens, Philips, Samsung, Sony Ericsson, LG, Panasonic, Sagem, Alcatel e molti altri brand (non ritrovati nel mio campione), che producono una varietà di modelli con caratteristiche nuove e diverse tra loro e che cercano di soddisfare le esigenze degli utenti che lo utilizzano, iniziando anche una vera e propria sfida commerciale che si protrae ancora oggi.

Solo nel 2006 si ha l'avvento del primo smartphone, con l'introduzione di nuove tecnologie e modalità applicative ed operative, che hanno reso questo dispositivo non solo il più usato al mondo ma hanno anche rivoluzionato le caratteristiche estetiche e la composizione (basti pensare all'introduzione della fotocamera e del touch screen). Abbiamo assistito dunque ad una diminuzione di produttori (alcuni inglobati in altri produttori più grossi e più all'avanguardia) e alla nascita di nuove società e marche che hanno rivoluzionato l'utilizzo e la gestione dei telefoni cellulari. Contemporaneamente assistiamo ad un aumento del numero di dispositivi prodotti, con prezzi più competitivi. Tra i brand dei modelli più recenti che si sono susseguiti negli ultimi 10 anni (il telefono più recente ritrovato nel campione considerato è del 2016) che compaiano più volte, ritroviamo Nokia e Samsung che sono stati e sono, i più venduti tra gli smartphones e dunque smaltiti con una frequenza molto più elevata rispetto ad altri. Altre aziende (ad esempio Apple), attuano politiche di recupero dei dispositivi obsoleti nei punti vendita, a fronte di promozioni sui nuovi acquisti, intercettando così il flusso di telefoni cellulari obsoleti. I vari modelli ritrovati nel campione sono elencati nelle tabelle che seguono (Tabella 6 i Cellphone, Tabella 7 gli Smartphone e Tabella 8 i Cordless); si noti la frequenza dei dispositivi di ogni singolo produttore negli ultimi vent'anni.

Il flusso viene in parte interrotto anche perché molti utenti che acquistano nuovi modelli di telefoni cellulari preferiscono evitare l'obsolescenza dei vecchi dispositivi, dandogli un secondo utilizzo per scopi vari o rivendendolo, in quanto possiedono ancora un discreto valore economico. Si pensi che un iPhone 4, lanciato sul mercato nel 2010 a 500/600 € ha oggi un valore di 80/100 € se in buone condizioni ([fonte_Amazon](#)). Nel mio campione infatti, ho trovato un solo dispositivo Apple e 2 Huawei e Sony.

Tabella 6: Caratterizzazione del campione Cellphone.

<i>Modello</i>	<i>ID</i>	<i>anno di produzione</i>	<i>peso (g)</i>	<i>Modello</i>	<i>ID</i>	<i>anno di produzione</i>	<i>peso (g)</i>
Onda n4020	C1	2006	110	Ericsson a1018	C38	1999	163
Samsung Gt e1200	C2	2012	65,1	Nokia N70	C39	2005	126
Samsung sgh e700	C3	2003	86	Nokia 3310	C40	2000	133
Samsung sghe530	C4	2005	85	Nokia 3210	C41	1999	151
Bosh Dual Com738	C5	1997	192	Nokia 6021	C42	2005	88
Siemens A50	C6	2002	95	Nokia 1209	C43	2008	79
LG L3431	C7	2006	86	Nokia 3220	C44	2004	86
Siemens s25	C8	1999	125	Nokia 2100	C45	2003	84,5
LG u8110	C9	2004	126	Nokia 3310	C46	2000	133
Blackberry 98310	C10	2007	111,4	Nokia N73	C47	2006	116
Samsung sghx510	C11	2006	76	Nokia 1110i	C48	2006	80
Ericsson s868	C12	1998	172	Nokia 1110i	C49	2006	80
Sagem sg 850	C13	1998	137	Nokia 2630	C50	2007	66
Ericsson s868	C14	1998	172	Nokia 2630	C51	2007	66
Samsung sgh250	C15	1997	189	Nokia c202	C52	2011	115
Siemens A35	C16	2000	122	Nokia 3220	C53	2004	86
Sagem MyX3-2	C17	2003	89	Nokia 2330	C54	2005	126
Sony CMD Z5	C18	2000	82	Nokia 8210	C55	1999	79
Nokia 301	C19	2013	100,5	Nokia 2330	C56	2009	78
Philips Genie 2000	C20	1999	99	Ericsson 5868	C57	1998	172
Siemens c62	C21	2003	85	Panasonic GD87	C58	2002	103
Nokia C1-02	C22	2010	77,5	Motorola Startack 8600	C59	1997	200
Nokia N73	C23	2006	116	Panasonic G450	C60	1998	175
Nokia 1110	C24	2004	86	Motorola cd930	C61	1998	145
Nokia 3510	C25	2002	105	Motorola c350	C62	2003	84,5
Siemens CFX65	C26	2004	88	Motorola D520	C63	1998	170
Sony ericsson z1010	C27	2004	144	Alcatel One touch 556	C64	2004	92
Nokia 1200	C28	2007	76,9	Motorola Talkabout	C65	2001	99
Nokia 2650	C29	2004	96,5	Sony ericsson c200	C66	2002	85
Nokia N70	C30	2005	126	Nokia C503	C67	2010	93
Nokia 2600	C31	2004	94,5	Nokia N97	C68	2009	150
Nokia 6600	C32	2003	120	Nokia N70	C69	2005	126
Nokia N70	C33	2005	126	Motorola Star Tack	C70	1989	350
Nokia 2760	C34	2007	80,4	Motorola Micro Tack	C71	1991	300
BlackBerry 9360	C35	2011	99	Motorola	C72	1991	150
Philips Fisio 120	C36	2002	95	Motorola Star Tack	C73	1992	200
BrionVega 7010	C37	2007	91				

Tabella 7: Caratterizzazione del campione Smartphone.

<i>Modello</i>	<i>ID</i>	<i>anno di produzione</i>	<i>peso (g)</i>	<i>Modello</i>	<i>ID</i>	<i>anno di produzione</i>	<i>peso (g)</i>
Nokia E61i	S1	2006	144	Samsung GTC3500	S15	2011	99,8
Nokia E61i	S2	2006	144	Samsung GT55230	S16	2009	92
Nokia E61i	S3	2006	144	ZTE Blade C2 plus	S17	2014	135,4
Nokia E61i	S4	2007	150	Brondi Gladietor 3	S18	2014	134
Mnokia 5230	S5	2009	112	Wuawei Ascend G630	S19	2014	165
Nokia 5230	S6	2009	112	NGM Dinamic	S20	2015	140
Nokia 52530	S7	2009	107	Wiko_Barry	S21	2014	155
Samsung GTI3200	S8	2014	111,5	Apple iphone 4	S22	2010	137
Samsung GTi9195	S9	2013	107	Sony Ericsson E15i	S23	2010	104
Samsung Gti 9300	S10	2014	132	Sony D2005	S24	2014	120
Samsung SM 850	S11	2014	115	CrossCall	S25	2014	255
Samsung J120 F Galaxy	S12	2016	131	Htc desire 316	S26	2014	160
Samsung_Galaxy	S13	2014	132,5	Wuawei Gplay CHC	S27	2015	162
Samsung GT53650	S14	2009	93				

Tabella 8: Caratterizzazione del campione Cordless.

<i>Modello</i>	<i>ID</i>	<i>anno di produzione</i>	<i>peso (g)</i>
Aladino Slim 4	CL1	2004	140
Siemens Gigaset 5308	CL2	2002	99,8
Siemens Gigaset A15	CL3	2001	120
Siemens_telecom	CL4	2000	100
Philips	CL5	1999	200

Nella scheda tecnica oltre alle caratteristiche tecniche e funzionali del telefono cellulare è esplicitato anche l'anno di immissione sul mercato, parametro fondamentale per calcolare la vita utile dei telefoni cellulari.

3.3.1. Determinazione della vita utile dei dispositivi

La vita utile di ogni dispositivo è stata calcolata attraverso la differenza tra l'anno in corso (2018), in cui è stato prelevato il campione dall'impianto TBD, e l'anno d' immissione sul mercato ricavato sulla scheda tecnica. Dallo studio è emerso che i Cellphone hanno una vita utile media pari a 15 anni e gli Smartphones a 6.4 anni. Si evince che la vita utile, cioè il periodo di tempo in cui i dispositivi si trovano in circolazione prima di essere smaltiti, è molto elevata per i cellphone. Ciò potrebbe essere dovuto al fatto che, essendo stati prodotti in tempi più lontani e che li ritroviamo ancora adesso abbandonati nelle nostre case inutilizzati, nella

prospettiva di dare loro un secondo utilizzo. Per gli Smartphones invece si è constatata una vita media utile relativamente bassa ma che rispecchia perfettamente il periodo temporale di utilizzo di questi nuovi dispositivi, prima di essere smaltiti (per lo più per ragioni di rottura e danneggiamento fisico delle parti meccaniche).

Da questo risultato ho constatato che i primi modelli di cellphone, nonostante in condizioni integre, vengono smaltiti soprattutto per la loro inadeguatezza ed arretratezza alle funzioni tecnologiche e multimediali; i nuovi modelli di smartphones invece vengono abbandonati più per il loro malfunzionamento, dovuto spesso alla rottura di una o più parti meccaniche non trovate nel campione analizzato, come detto in precedenza. Calcolare la vita utile dei dispositivi è fondamentale per la mia ricerca in quanto mi conferma il range temporale di vita, e quindi gli effettivi anni di utilizzo dei dispositivi e mi conferma come questi siano considerati a ciclo breve. La vita media utile per gli Smartphones (Figura 12), è pari a 12 anni per i dispositivi più vecchi e più della maggior parte di essi ha una vita media pari a 4 anni. La vita media dei Cellphone (Figura 13) presenta valori molto più alti, che in alcuni modelli superano i 20 anni, e nessun dispositivo ne ha una inferiore a 5 anni.

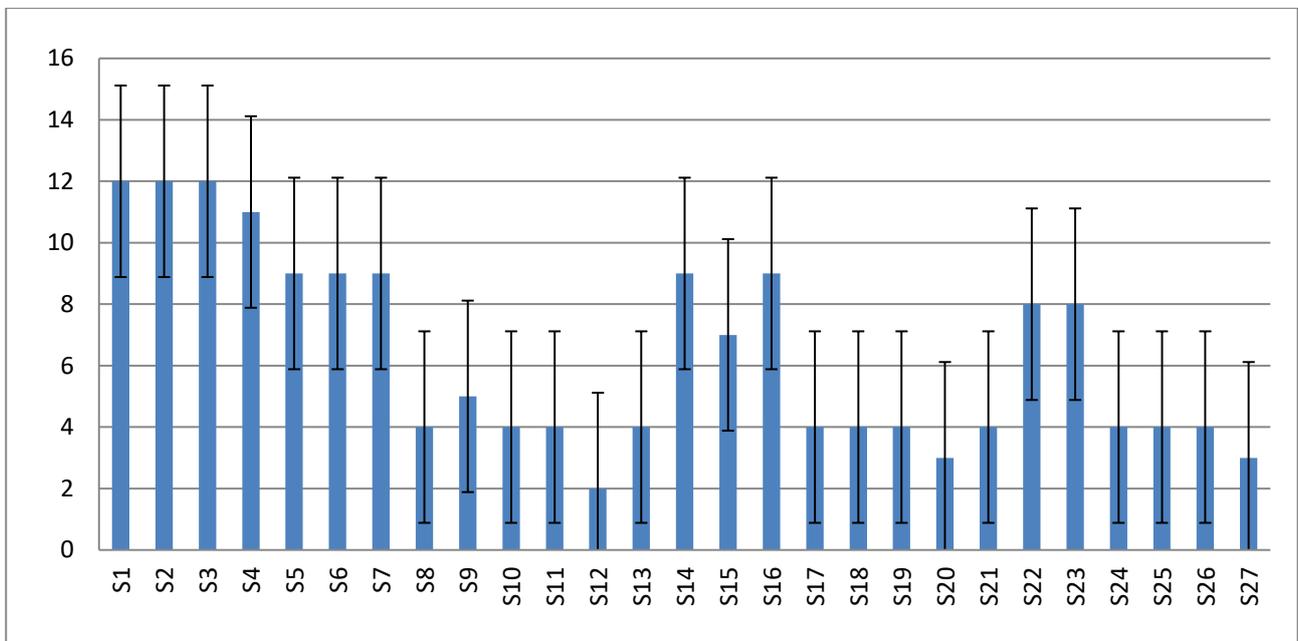


Figura 12: Valutazione della vita utile degli Smartphone (i valori sono espressi in anni).

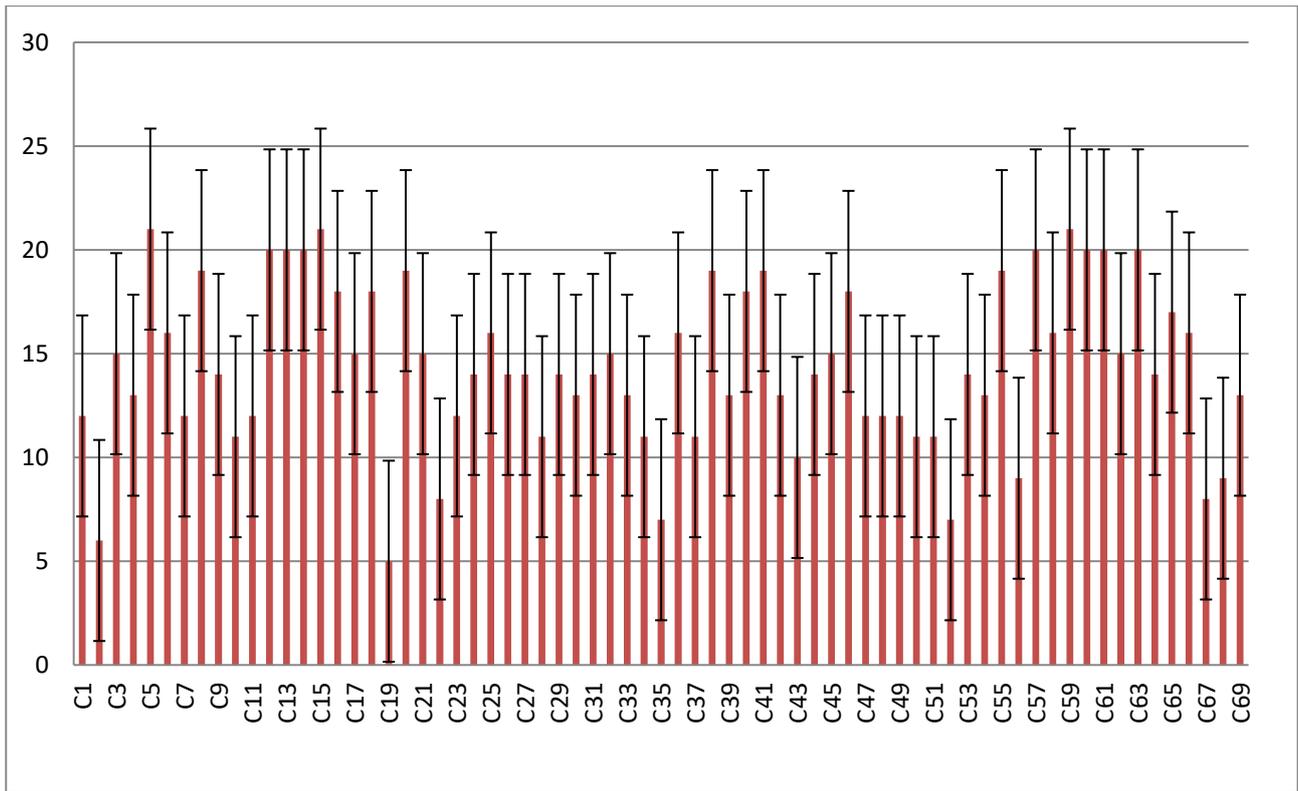


Figura 13: Valutazione della vita utile dei Cellphone (i valori sono espressi in anni)

3.3.2. Caratteristiche qualitative e quantitative

L'abbandono dei telefoni cellulari è dovuto oltre al superamento tecnologico delle funzionalità e delle caratteristiche del dispositivo stesso, anche alla mancanza di molti parti meccaniche esterne che vengono perse o danneggiate durante il loro utilizzo o durante la raccolta e trasporto una volta diventati rifiuti, come ad esempio le cover, i display, mini tastiere ed altro ancora.

La suddivisione nelle due categorie mette in risalto una differenza notevole riguardo lo stato di smaltimento dei dispositivi (Figura 14), per cui ritroviamo nel campione dispositivi vecchi (Cellphone) quasi del tutto integri, e dispositivi più recenti (Smartphones) che si presentano tutti con parti meccaniche rotte o danneggiate o addirittura privi di esse, per cui si può ipotizzare che quest'ultimi vengano smaltiti solo se non appare possibile una seconda possibilità di utilizzo o vendita.



Figura 14: Caratteristiche qualitative di alcuni dispositivi: a sinistra 3 cellphone, a destra uno smartphone.

Ogni dispositivo dovrebbe essere privo anche delle batterie perché al loro interno si trovano sostanze pericolose come il litio. Esse dovrebbero essere rimosse prima dell’invio in linea di trattamento. Tuttavia in alcuni telefoni ho riscontrato la loro presenza, oltre ad accessori vari come Sim, schede SD, adattatori (Figura 15), classificate tutte come “altro” nel bilancio di massa.



Figura 15: Caratterizzazione campione, parti trovate.

Tra i dispositivi privi di molte componenti e quelli invece contenenti più di quello che dovrebbe essere trattato, si deduce che c’è una netta discrepanza tra il peso iniziale di ogni telefono (quando è stato immesso sul mercato) ed il peso dello stesso dispositivo che arriva in impianto.

Il peso totale del campione proveniente dall'impianto TBD è di 8.84 Kg, con 2.53 Kg di Smartphone, 5.84 Kg di Cellphone e 0.47 Kg di Cordless. Questi ultimi verranno analizzati e confrontati con le altre due categorie ma non saranno considerati rappresentativi dato l'insufficiente numero di unità, pertanto descriverò principalmente le analisi condotte su cellulari e smartphone.

Mediando tutti i pesi ottenuti per le due categorie principali di dispositivi otteniamo un peso medio per i Cellphone pari a 80 grammi e per gli Smartphone pari a 94 grammi, valori che si distaccano da quelli ritrovati in letteratura [Quanyin Tan et al.], attribuiscono un peso medio del dispositivo (senza alcuna distinzione tra i vari modelli) pari a 120 grammi, considerando questo integro e non danneggiato e trascurando così il reale peso di materiale in input all'impianto.

3.4. Smontaggio manuale

Dopo aver identificato e inventariato tutti i dispositivi, assegnato loro un codice e rispettivi dati iniziali, ho proceduto con lo smontaggio utilizzando semplici strumenti come mini cacciaviti, pinze e tenaglie (Figura 16). Data la piccola dimensione e l'eterogeneità delle parti che compongono i dispositivi ho trovato molta difficoltà nel separare interamente tutte le frazioni, le quali si presentano composte da vari materiali (essenzialmente metalli e plastiche) saldate e ben connesse tra loro. Tuttavia mi è stato possibile distinguere le componenti in tre categorie principali, pressoché uguali per le due tipologie di dispositivi:

- parti meccaniche: cover, mascherina, scocca, mini tastiera e pulsanti;
- parti elettromeccaniche: microfoni, altoparlanti, display e antenne;
- parti elettroniche: le PCB;
- altro: batterie, schede SIM, SD ed adattatori.



Figura 16: Strumenti utilizzati per lo smontaggio dei dispositivi

Dividere le varie componenti e separarle mi ha permesso di comprendere come siano stati assemblati i dispositivi (Figura 17). Analizzando i Cellphone, che si presentano a primo impatto molto più grandi e pesanti rispetto agli Smartphones si nota che è diverso anche il loro assemblaggio; nei primi infatti troviamo molte più parti meccaniche ed è evidente l'impiego di più viti e coperture interne (sia in plastica che in metallo) a protezione delle componenti elettroniche al loro interno, per cui risulta semplice la loro separazione ed identificazione; negli smartphones invece notiamo un assemblaggio più sofisticato, come se le componenti fossero assemblati ad incastro, soprattutto quelle esterne, mentre vengono impiegate poche viti (di dimensioni ridotte) e protezioni interne delle parti elettroniche (anch'esse miniaturizzate rispetto i primi modelli). Ho riscontrato anche una seria difficoltà ad estrapolare più le componenti elettromeccaniche delle altre, data la loro piccola dimensione e l'incastonatura con altre componenti.

Il bilancio di massa delle frazioni recuperabili viene eseguito rispetto il peso totale del dispositivo (calcolato in milligrammi su chilogrammo di campione) prima in funzione sempre della singola unità e poi in funzione del tempo, ovvero quanto cambia la composizione di frazioni analizzate contenute nei telefoni cellulari prodotti nei rispettivi anni (calcolato in percentuale). Il bilancio di massa è stato eseguito utilizzando una bilancia tecnica da laboratorio KERN [PLJ42002F](#).



Figura 17: Identificazione delle componenti di un telefono cellulare

3.4.1. Bilancio di massa dei Cellphone

Questa categoria di telefoni, presentandosi con un numero superiore di unità, abbraccia un periodo storico molto più lungo rispetto la seconda categoria e quindi si presentano molto eterogenei tra loro con caratteristiche che differiscono tra i vari modelli. Le quattro componenti sono a state suddivise in funzione dei particolari che le costituiscono e quindi suddivise a loro volta nelle rispettive frazioni merceologiche (Tabella 9).

Tabella 9: Componenti analizzate nei Cellphone

Components [g]											
Mechanical				electromechanical				electronic	Battery	SIM	SD
Enclosures		buttons	mini-keyboard	jacks	Connectors	display	camera	Antenna			
Plastic	Metal	Plastic	Plastic								

Le difficoltà di smontaggio hanno riguardato principalmente la componente elettromeccanica, in quanto la difficoltà nel separare tutte le frazioni non permette di quantificarle; per cui il bilancio di massa viene fatto per tutta la categoria (così come la categoria “Altro” che comprende batterie, schede SIM e SD). Nelle parti meccaniche invece è stato semplice distinguere i particolari (principalmente: cover, bottoni e mini tastiere) e le frazioni di cui sono composte (plastica e metallo). L’andamento di queste ultime due frazioni è risultato pressoché costante per tutti i Cellphone; per quanto riguarda il contenuto di plastica solo due dispositivi superano 0.6 mg/kg, solo un dispositivo contiene 0.2 mg/kg, tutti gli altri hanno contenuti compresi tra questi due valori (Figura 18).

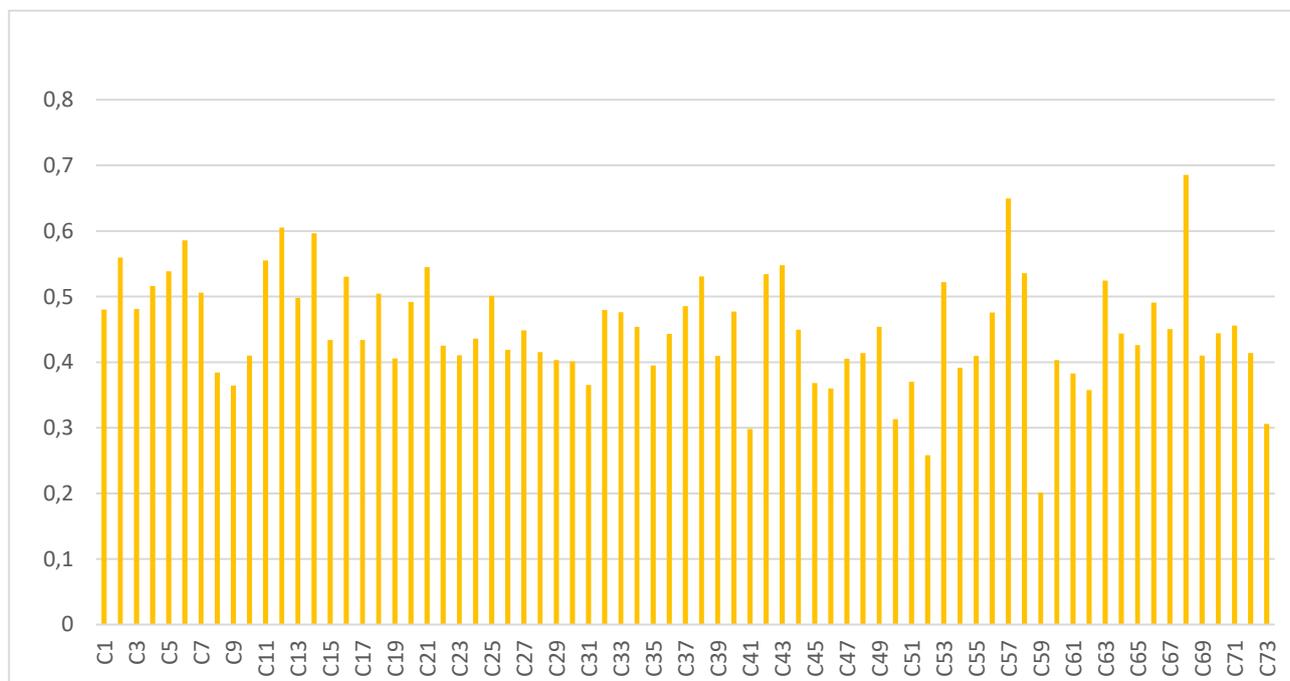


Figura 18: Contenuto di plastica di ogni Cellphone. I dati sono espressi in mg/kg.

Per i metalli le quantità sono minori, solo un dispositivo supera il valore di 0.3 mg/kg, tutti i dispositivi presentano valori differenti con un andamento discontinuo (Figura 16). Ciò sta ad indicare come questo materiale sia stato impiegato con diverse quantità in funzione del singolo modello di telefono cellulare.

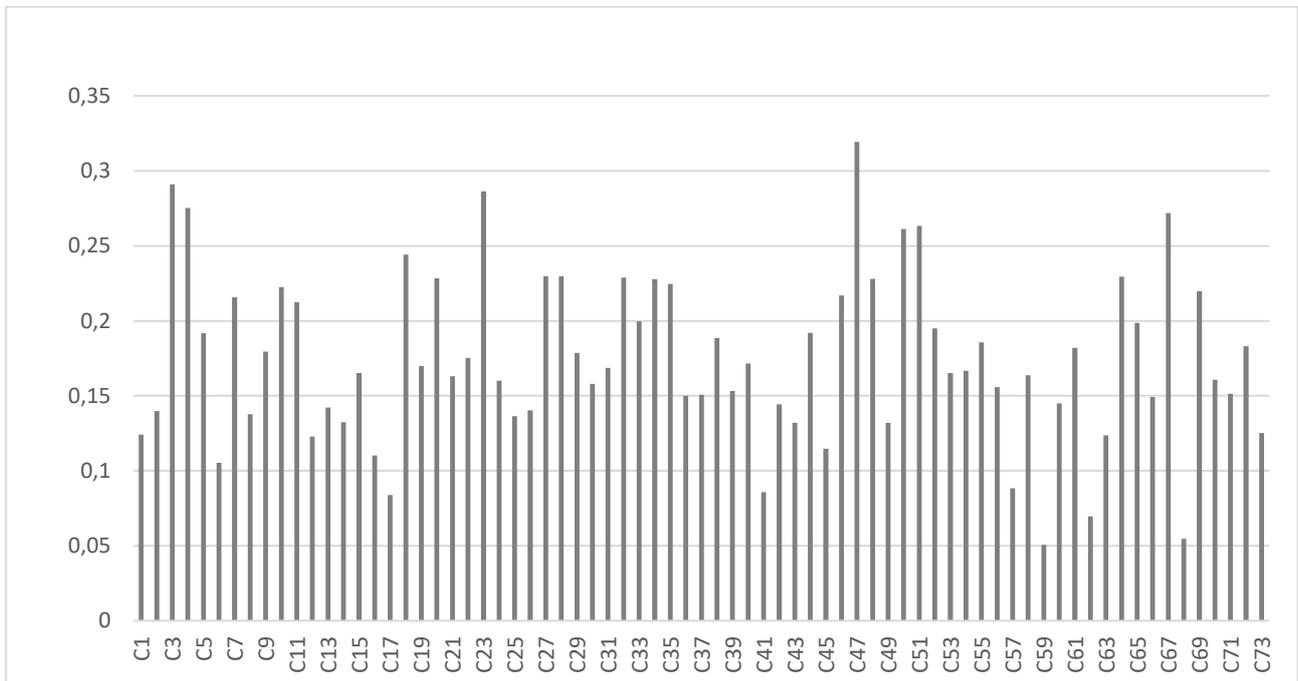


Figura 19: Contenuto di metalli di ogni Cellphone. I dati sono espressi in mg/kg.

Le PCBs dei Cellphone invece si trovano in notevoli quantità, in alcune unità supera anche i 0.4 mg/kg e poche scendono a valori compresi tra 0.5 e 0.2 mg/Kg (Figura 20). Riferendomi ai dati di letteratura inerenti la

quantità di metalli preziosi contenuti in esse, è facile comprendere come sia importante la loro gestione, che diventa così una vera e propria miniera d'oro.

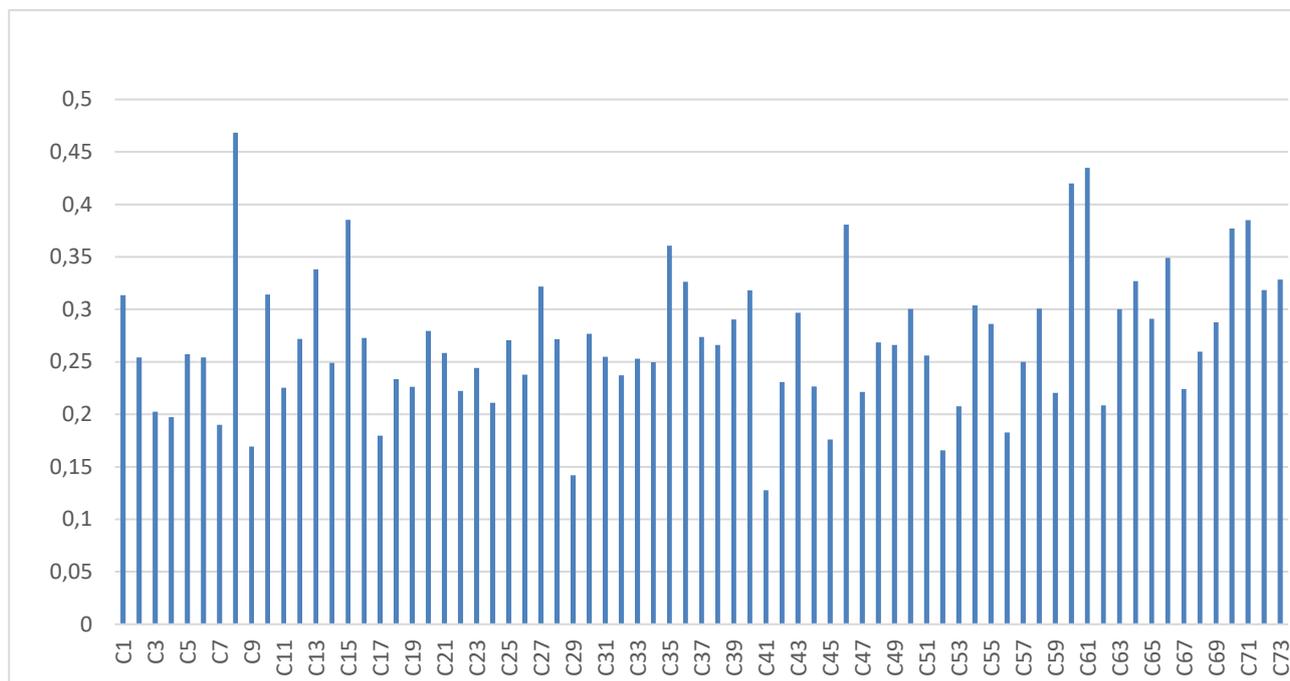


Figura 20: Peso delle PCBs in ogni Cellphone. I dati sono espressi in mg/kg

Per quanto riguarda le componenti elettromeccaniche il peso per ogni dispositivo è molto variabile ed in alcuni di essi arriva sino a 0.32 mg/kg (seppur presentandosi in frazioni molto piccole e leggere). Ciò dipende dal fatto che in queste frazioni rimane altro materiale incollato e/o saldato, il cui prelievo diventa molto difficoltoso e richiede particolari strumenti e destrezza della manodopera. Soprattutto in questa categoria di telefoni cellulari, più datati rispetto a quelli della seconda categoria, dove l'assemblaggio delle parti elettromeccaniche di alcune unità, è stato eseguito utilizzando colle, resine e materiali saldanti. Questo dunque implica un sovrabilanciamento della componente in questione che, nella prospettiva di recuperarla è stata considerata nella voce elettronica con valore di mercato proprio. Per alcuni Cellphone comunque sono riuscito a smontarle e separarle completamente ottenendo quantità anche al di sotto di 0,1 mg/Kg (Figura 21).

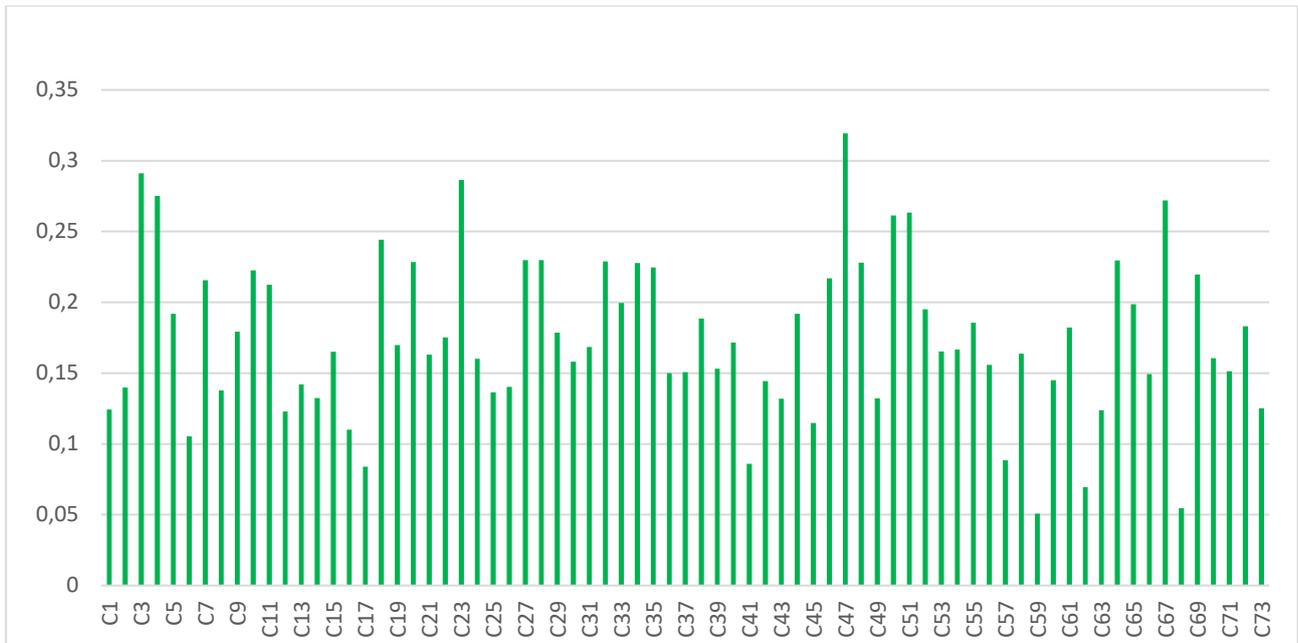


Figura 21: Peso delle componenti elettromeccaniche di ogni Cellphone. I dati sono espressi in mg/kg.

Ho aggiunto le quantità della componente “altro” (Figura 22), formata dalle frazioni che non dovrebbero ritrovarsi nel telefono cellulare ma che in alcune unità erano presenti. Per questa componente si supera il valore di 0,5 mg/kg per un telefono e per altri sei dispositivi il peso è compreso tra 0,18 e 0,35 mg/Kg; valori molto alti che indicano la presenza della batteria all’interno del telefono cellulare (non rimossa in precedenza) oltre ad altre componenti come schede SIM e SD. Queste ultime due si trovano spesso abbandonate all’interno dei dispositivi anche se hanno un peso irrilevante per essere considerate nell’intero bilancio di massa.

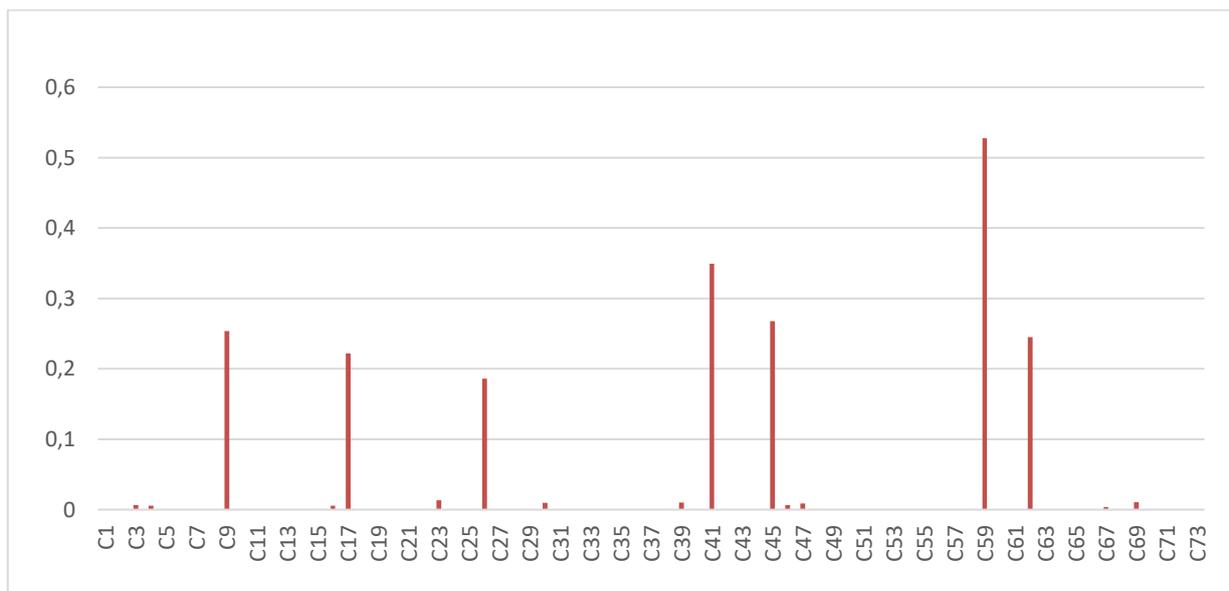


Figura 22: Peso della componente “Altro” di ogni Cellphone. I dati sono espressi in mg/kg

3.4.2. Bilancio di massa degli Smartphone

Le componenti individuate in questa categoria sono le stesse analizzate nella precedente, tuttavia sono risultate assenti alcune frazioni come le antenne e le tastiere (in alcuni dispositivi ho trovato una mini tastiera o qualche pulsante) e sono presenti invece nuove tipologie di materiali come il vetro dello schermo e la protezione di questo in vetro temperato (indicati con la voce “other” nella componente meccanica in Tabella 10).

Tabella 10: frazioni merceologiche delle componenti analizzate degli Smartphone

Components (g)													
Mechanical							electromechanical			electronic	Battery	SIM	SD
Enclosures			jacks	buttons	mini-keyboard		Connectors	display	camera	PCB			
Plastic	Metal	other	Plastic	Metal	plastic	Plastic							

I contenuti di plastica di ogni Smartphone non sono omogenei così come nei Cellphone e non si superano valori di 0,70 mg/kg. In funzione del numero di dispositivi, infatti, troviamo gli stessi range in mg/kg di plastica rispetto i Cellphone (solamente tre scendono sotto 0,2 mg/kg e due di questi sotto 0,1 mg/kg, mostrati nel). Si può dedurre quindi che l’andamento della quantità di questa frazione nella produzione dei telefoni cellulari rimanga inalterato sia in relazione alle due categorie che in relazione agli anni di produzione. Anche i metalli negli Smartphone presentano gli stessi range di valori dei Cellphone. In un solo dispositivo (S26) non mi è stato possibile identificare e separare questa frazione, in quanto questo privo di parti meccaniche principali costituite appunto da metalli (risultati che confermano la causa dell’abbandono dei nuovi dispositivi).

Analizzando le PCBs degli Smartphone, si nota la differenza di dimensioni e di peso rispetto quelle contenute nei Cellphone. In quest’ultima categoria le PCBs hanno una dimensione quasi uguale alla sezione longitudinale del telefono cellulare e ricoprono gran parte dello spazio interno. In molti modelli di Smartphone la PCBs è molto più piccola rispetto al dispositivo. Questa differenza è dovuta, principalmente all’evoluzione tecnologica che ha permesso di miniaturizzare molte componenti che costituiscono la PCB (come chips, micro chips, connettori etc) comportando quindi una produzione con dimensioni sempre più piccole; le differenze si possono notare nelle Figure 23 e 24).



Figura 23 e Figura 24: Immagini relative alla diversa dimensione di PCBs contenute all'interno dei dispositivi, cerchiare in rosso. A sinistra per lo Smartphone, a destra per il Cellphone.

Il peso delle PCBs degli Smartphone ricade in range molto più bassi rispetto quelli trovati per i Cellphone, risultando totalmente assenti in due dispositivi smaltiti in pessimo stato. La componente elettromeccanica in questo caso si presenta leggermente più uniforme rispetto quella analizzata per la categoria precedente, solo un dispositivo supera il valore di 0,3 mg/kg ed il range più frequente oscilla tra 0,10 e 0,17 mg/kg. Ciò dimostra ancora una volta il miglioramento tecnologico con la miniaturizzazione di questa componente ed un'omogeneità di forma e peso. Con la denominazione "Altro" ho inteso anche in questa categoria di telefoni cellulari tutte le componenti che non dovrebbero essere presenti nel dispositivo e che quindi non possono e non devono seguire lo stesso processo di trattamento; i valori più alti ottenuti denotano ancora la presenza della batteria all'interno del telefono e in alcuni di essi è stata rilevata la presenza di nuove frazioni con materiale differente rispetto a quello analizzato (vetro e/o vetro temperato). I risultati del bilancio di massa ottenuto sono stati quantificati e rappresentati in Figura 25.

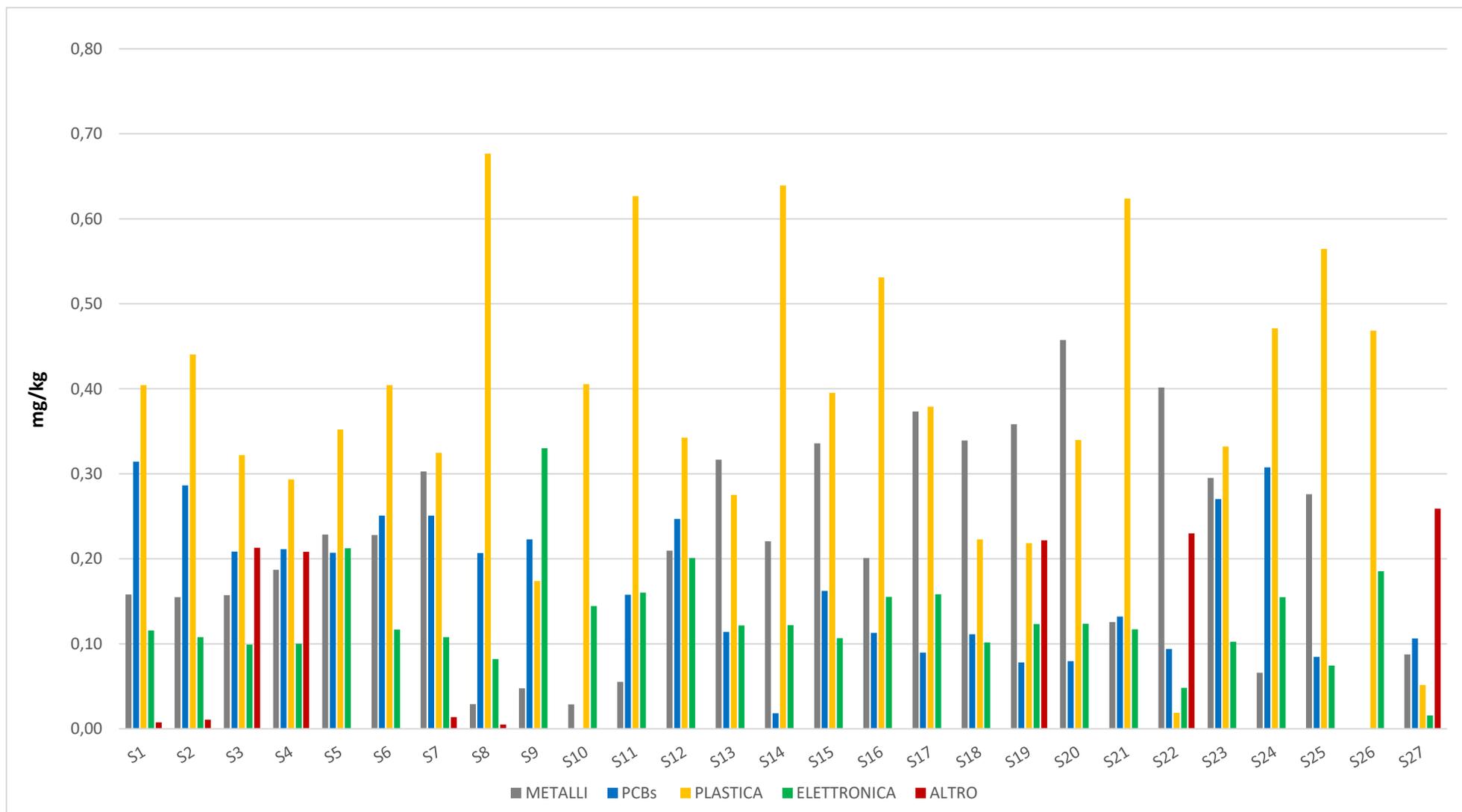


Figura 25: Analisi della composizione di ogni singolo Smartphone

Sommando tutte le frazioni uguali delle componenti, sia per i Cellphone che per gli Smartphone, ho ottenuto i valori riportati nelle Tabelle 11 e 12 e, rapportando questi con i pesi totali delle due categorie di telefoni cellulari ho trovato che per i Cellphone, la frazione più contenuta in essi è la plastica con il 44%, una percentuale bassa per i metalli (il 7% rispetto al peso totale del campione); una buona parte è compresa nella categoria Elettromeccanica (con un valore che raggiunge quasi il 17%), in quanto difficilmente sono riuscito a separare del tutto le frazioni che la compongono, mentre per le PCBs si ha un valore pari al 27% rispetto al peso totale. Per gli Smartphone le percentuali delle componenti rispetto al peso totale del campione presentano altri valori: 36% per la plastica, 21% per i metalli, 16% per le PCBs e 12% per la componente Elettromeccanica. Tali valori stanno ad indicare l'assenza di alcune parti meccaniche esterne (costruite in materiale plastico), la possibile facilità nel separare le frazioni nella componente Elettromeccanica e quindi l'incremento della frazione metalli. Si rileva dunque, una differenza di 11 punti percentuali tra il peso delle PCBs degli Smartphone e quelli dei Cellphone, confermando ancora una volta come variano dimensione, peso e relativa composizione con la trasformazione ed il passaggio dalla vecchia alla nuova tipologia di telefoni cellulari.

Tabella 11: Bilancio di massa delle frazioni separate dai Cellphone

Peso campione Cellephone [g]	Frazioni	[g]	[mg/kg]	[%]
5841,05	PLASTICA	2582,51	0,44	44,21
	METALLI	413,78	0,07	7,08
	PCB	1583,46	0,27	27,11
	ELETTROMECC.	977,46	0,17	16,73
	ALTRO	283,84	0,05	4,86

Tabella 12: Bilancio di massa delle frazioni separate dagli Smartphone

Peso campione Smartphones [g]	Frazioni	[g]	[mg/kg]	[%]
2535,16	PLASTICA	922,54	0,36	36,39
	METALLI	549,67	0,22	21,68
	PCB	406,19	0,16	16,02
	ELETTROMECC.	302,85	0,12	11,95
	ALTRO	162,22	0,06	6,40

3.4.3. Bilancio di massa dei cordless

Il numero di questa tipologia di dispositivi mobili ritrovati, che ricordiamo essere solo 5 in tutto il campione, non permette di effettuare un confronto con le altre due categorie di dispositivi. Il motivo della quantità così limitata potrebbe rispecchiarsi, oltre al limitato numero di unità vendute rispetto ai Cellphone prima e Smartphones dopo, anche nel fatto del loro luogo di abbandono nel momento in cui diventano obsoleti, essendo un oggetto mobile ma che ritroviamo nelle abitazioni; essi potrebbero ritrovarsi accantonati o addirittura smaltiti insieme ai rifiuti solidi urbani. E' anche vero che il loro contenuto di materiali recuperabili ha un ottimo valore sul peso totale del singolo dispositivo ma si presume che il contenuto dei metalli preziosi contenuti nelle PCBs sia minore rispetto quello contenuto nelle altre due categorie di telefoni prima analizzate, dovuto alla assenza di molte applicazioni multimediali e quindi di componenti elettroniche contenenti metalli preziosi. Tra i risultati ottenuti dal bilancio di massa si nota un'elevata quantità di plastica, che costituisce principalmente le parti meccaniche dei dispositivi (tre di questi superano il valore di 0,60 mg/kg rispetto il peso totale del campione). Le PCB hanno quantità comprese tra i 0,17 e 0,29 mg/kg, range omogeneo rispetto le categorie di telefoni prima analizzati, così come le altre componenti: metalli ed elettronica (Figura 26).

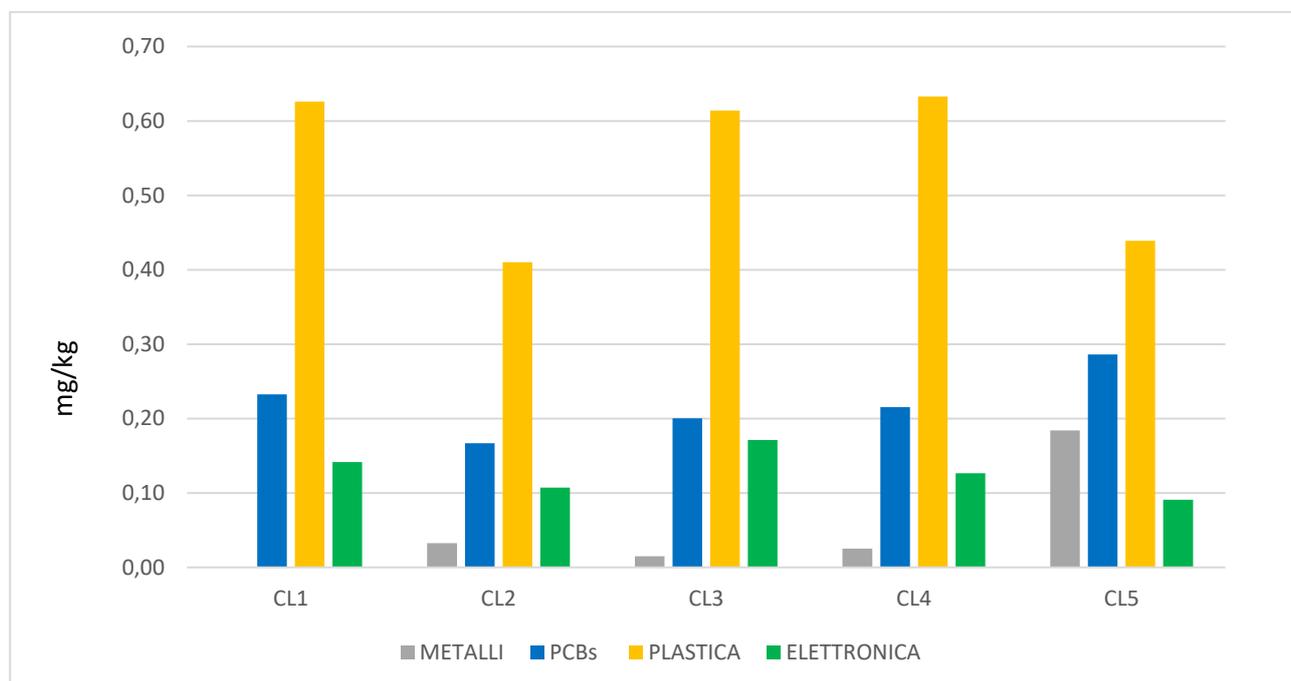


Figura 26: Bilancio di massa delle frazioni contenute nei Cordless

I risultati ottenuti per i Cordless non sono stati inclusi nel confronto con i Cellphone e gli Smartphones in quanto poco rappresentativi e soprattutto nel confronto con la letteratura, in cui pochi autori fanno riferimento a questi dispositivi.

3.5. Analisi risultati e confronto con i dati di letteratura

In questa fase del mio lavoro di tesi ho eseguito un confronto dei dati ottenuti dal bilancio di massa, analizzando le variazioni delle quantità di peso delle componenti delle due tipologie di dispositivi in relazione sia all'anno di produzione sia ai dati di letteratura. Tutti i dispositivi sono stati classificati per anno di produzione e conoscendo per ognuno di essi il peso delle frazioni che li compongono, ho calcolato il peso totale di queste per anno di produzione (Tabella 13).

Tabella 13: Abbondanze relative delle componenti dei dispositivi in funzione dell'anno di produzione

Anni	Peso PCB/Peso TOT	Peso Plastica/Peso TOT	Peso Metalli/Peso TOT	Peso Elettromecc./Peso TOT
	mg/kg	mg/kg	mg/kg	mg/kg
1989	0,38	0,44	0,02	0,16
1991	0,28	0,39	0,08	0,14
1992	0,33	0,31	0,24	0,13
1997	0,29	0,39	0,01	0,14
1998	0,32	0,52	0,02	0,13
1999	0,33	0,45	0,04	0,19
2000	0,30	0,47	0,04	0,19
2001	0,29	0,43	0,08	0,20
2002	0,30	0,51	0,05	0,14
2003	0,21	0,44	0,06	0,16
2004	0,23	0,43	0,11	0,18
2005	0,26	0,45	0,10	0,19
2006	0,25	0,44	0,10	0,18
2007	0,27	0,39	0,10	0,21
2008	0,30	0,55	0,02	0,13
2009	0,18	0,49	0,20	0,13
2010	0,20	0,31	0,23	0,15
2011	0,23	0,35	0,25	0,18
2012	0,25	0,56	0,05	0,14
2013	0,22	0,29	0,12	0,25
2014	0,12	0,45	0,18	0,13
2015	0,09	0,20	0,27	0,07
2016	0,25	0,34	0,21	0,20

Rappresentando graficamente i dati ottenuti (Figura 27), si nota che anche questa analisi ha confermato la variazione del peso delle PCB nel corso degli anni, con un andamento pian piano decrescente con il passare di questi. Si è riscontrato un valore anomalo del peso della PCB nell'unico Smartphone prodotto nel 2016 ritrovato nel campione, il quale è maggiore del 16% rispetto i modelli del 2015 e del 13 % rispetto a quelli del 2014. Trattandosi di un solo dispositivo, il dato è poco esaustivo. Le altre componenti si presentano con range di valori pressoché costanti, tranne per i metalli che presentano valori poco omogenei rispetto all'anno di produzione dei dispositivi.

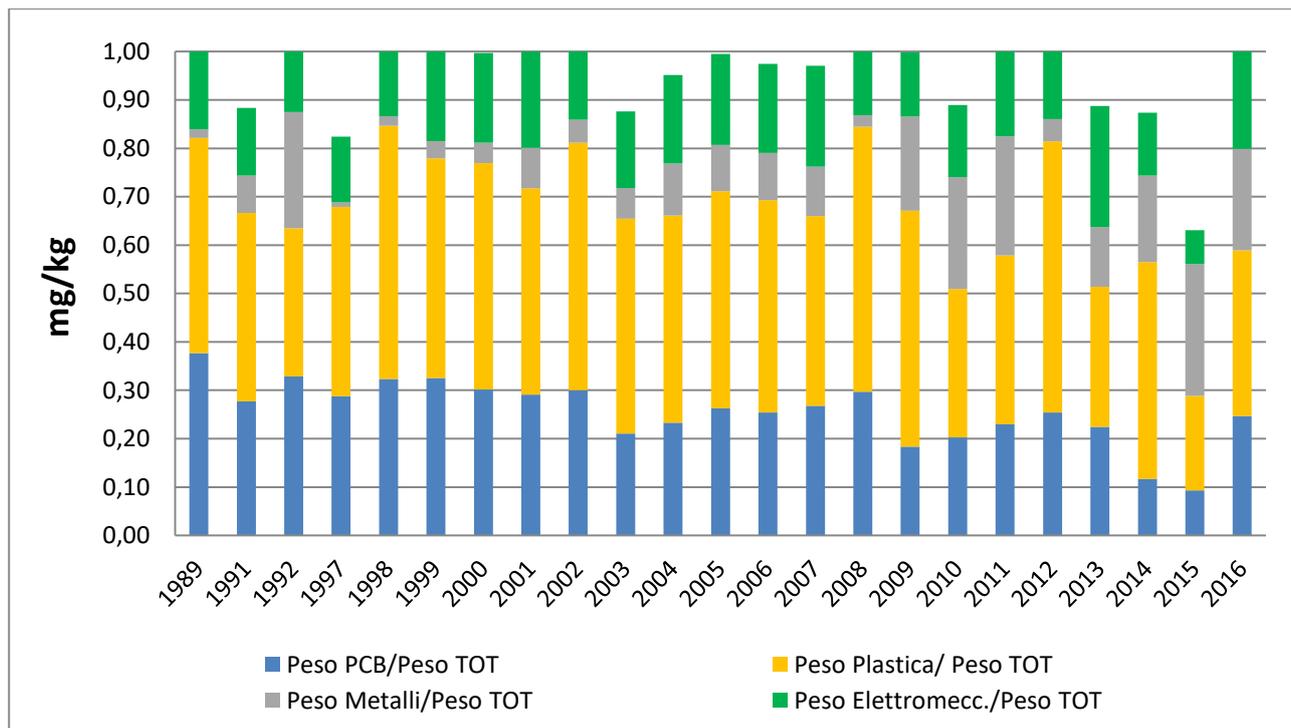


Figura 27: Abbondanze relative delle diverse componenti dei dispositivi nel periodo 1989-2016 (i dati sono espressi in mg/kg).

Ho confrontato i dati ottenuti dalle analisi del campione prelevato in impianto con i dati ritrovati in letteratura (Manivannan, 2016). Nelle analisi di molti autori spesso non è chiara la distinzione delle categorie di dispositivi analizzati e quasi tutte riportano un peso medio unitario pari a 120 grammi. I pesi medi da me ottenuti per entrambe le categorie di dispositivi hanno un valore inferiore; ciò può essere dovuto al fatto che probabilmente in letteratura si considera il peso del dispositivo come se questo fosse nuovo, non danneggiato e compreso di batteria. Tuttavia, si evince che i risultati ottenuti non si discostano molto da quelli di letteratura e tutti sono rapportati al corrispettivo peso medio del dispositivo. I risultati di questa analisi sono riportati in Tabella 14 e confrontati nel grafico in Figura 28.

Tabella 14: Analisi risultati ottenuti dal bilancio di massa e confronto con i dati di letteratura (Manivannan, 2016)

		Campione analizzato		Dati di letteratura
		Cellphone	Smartphone	
Peso medio dispositivo	[g]	80	94	120
Peso totale campione	[g]	5841,05	2535,16	-
Plastica	[g]	2582,5	922,5	-
	[%]	44	36,4	48
	[mg/kg]	0,44	0,364	0,48
Metalli	[g]	413,78	549,67	-
	[%]	7,07	21,6	8
	[mg/kg]	0,07	0,21	0,08
PCBs	[g]	1583,86	406,19	-
	[%]	27,1	16	20
	[mg/kg]	0,27	0,16	0,2
Altro	[g]	1261,3	656,7	-
	[%]	21	26	24
	[mg/kg]	0,21	0,259	0,24

Solo le percentuali della frazione dei metalli negli Smartphone presentano delle anomalie rispetto ai dati di letteratura. Ciò può essere dovuto all'assenza di accurate analisi su questi nuovi modelli di dispositivi, per cui è probabile che si è avuto un aumento in peso di alcune frazioni. La plastica invece presenta una buona correlazione tra i dati di letteratura ed i Cellphone, mentre si distacca di 12 punti percentuali con gli Smartphone (data l'assenza di molte parti meccaniche di questi ultimi). Anche la componente Altro presenta circa la stessa percentuale in peso rispetto alla letteratura, dove viene stimata al 24 % (Manivannan, 2016) e che comprende anche le parti elettromeccaniche da me esaminate. Le percentuali di peso della PCB delle due categorie di dispositivi, non si distaccano come ordine di grandezza dal valore di letteratura, il quale risulta essere circa la metà dei valori ottenuti in questa tesi. E' da notare invece, la netta differenza di percentuale (più dell'11%) dei pesi delle PCBs tra i Cellphone e gli Smartphone, che dimostra come questa componente abbia subito delle notevoli modifiche in dimensione e peso; e con loro anche il contenuto di metalli preziosi.

In Figura 28 viene anche rappresentato l'errore standard, per le percentuali delle frazioni recuperate dai telefoni cellulari dei due campioni, ottenuto attraverso un T-test. Questo è uno dei test statistici più diffuso e utilizzato per confrontare e relazionare fra di loro due gruppi di "popolazioni", esso permette di verificare se il valore medio di una distribuzione si discosti significativamente da un certo valore critico preimpostato ($t_{crit} < 0,005$). Si procede con l'ipotesi 0 (o ipotesi nulla) che la media delle misurazioni della popolazione 1 sia uguale alla media delle misurazioni della popolazione 2, nel mio caso che le medie dei pesi delle frazioni considerate siano uguali per le due categorie considerate; l'obiettivo di ogni test statistico è quello di rifiutare l'ipotesi nulla e di conseguenza accettare l'ipotesi 1 o ipotesi alternativa (ovvero quella che si vuole dimostrare prima di effettuare il test) e quindi confermare la differenza di valori medi tra le due popolazioni.

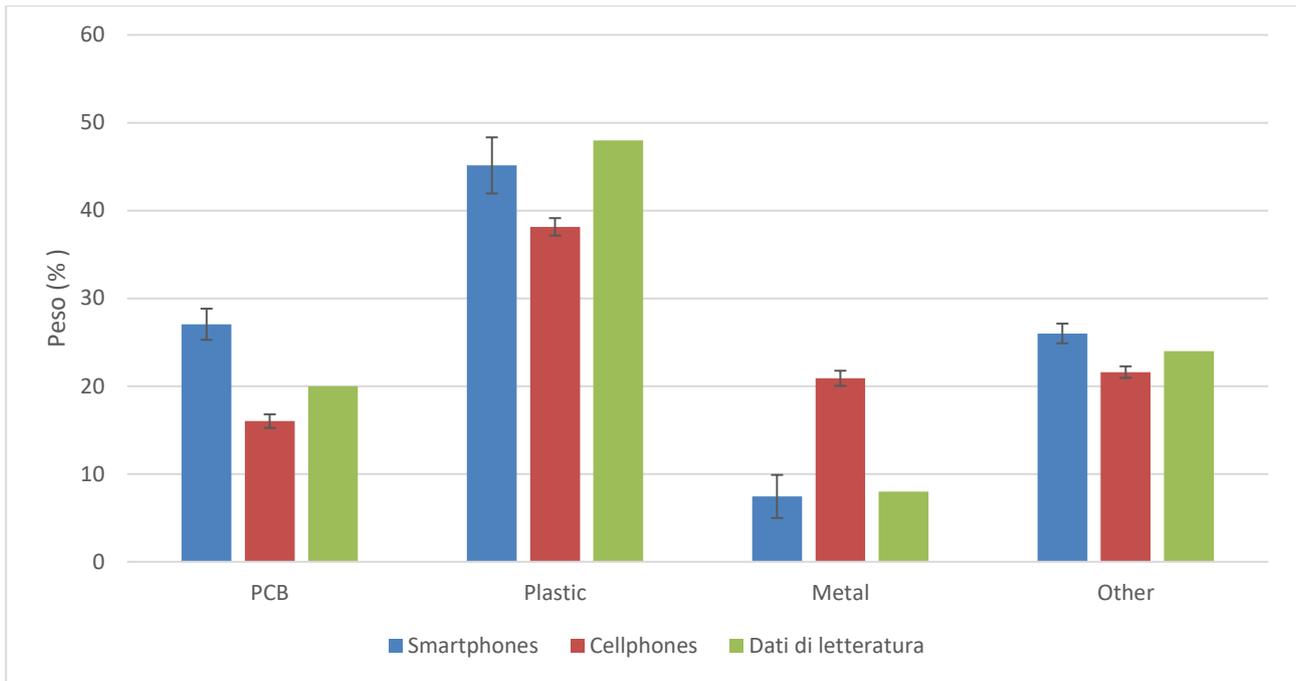


Figura 28: Percentuali di frazioni ottenute per le categorie analizzate e confronto con i dati di letteratura.

Nel caso in esame infatti si vuole dimostrare che le percentuali delle componenti analizzate in funzione del peso totale siano diverse per Cellphone e Smartphone, confermando la veridicità dei risultati ottenuti nel bilancio di massa. Per effettuare il test, occorre che i dati nelle due popolazioni siano distribuiti normalmente, ossia che coincidono approssimativamente media e mediana, quindi si procede col verificare che la varianza dei dati sia omogenea per entrambi i gruppi. E' stata utilizzata la formula 3 per calcolare il parametro t da confrontare con il t_{crit} scelto, x_1 e x_2 rappresentano le medie dei campioni delle due popolazioni, al denominatore si trova la radice quadrata della varianza che si ottiene sommando le devianze dei due campioni e dividendo per la somma dei gradi di libertà:

$$t = \frac{x_1 - x_2}{\sqrt{\frac{(s_1)^2}{n_1} + \frac{(s_2)^2}{n_2}}} \quad (3)$$

Attraverso questo test si può dimostrare che la differenza fra le medie dei due campioni è significativa ossia che la differenza osservata non è dovuta al caso ma che invece esiste veramente una diversità tra i valori medi calcolati per le due categorie di dispositivi.

Confrontando i valori t ottenuti per ogni frazione analizzata, recuperabile dai dispositivi provenienti da due diverse popolazioni, con il t_{crit} notiamo che in tutte le componenti viene soddisfatta la condizione di $t < t_{crit}$, in rosso in Tabella 15 (solo per i metalli siamo in una condizione limite ma ancora accettabile). Per cui si può affermare che le percentuali medie calcolate per ogni frazione e per le due popolazioni che costituiscono i miei campioni abbiano tra loro differenze significative.

Tabella 15: Valori ricavati dal T-test per la valutazione dei risultati ottenuti nel bilancio di massa.

T-test	PCB		PCB		Metalli		Elettronica	
	C	S	C	S	C	S	C	S
Media	27,1	16,0	45,1	38,1	20,9	7,4	17,5	12,9
Varianza	44,3	84,9	72,0	275,8	162,8	54,1	31,5	34,2
Osservazioni	73	27	73	27	27	73	73	27
Differenza ipotizzata per le medie	0		0		0		0	
Gradi di libertà	36		31		33		45	
Stat. t	5,70		2,09		5,17		3,48	
P(T<=t)	1,7*E-6		0,0449		1,1*E-5		0,0011	
t critico	2,03		2,04		2,03		2,01	

3.6. Valutazione delle prospettive di recupero di frazioni utili

L'analisi che segue riprende lo studio del test industriale per Amiat SpA, prendendo come riferimento i valori di mercato delle materie prime secondarie aggiornato alla primavera 2018 (Tabella 16). Ricavando la massa totale delle frazioni analizzate, mi è stato possibile calcolare il valore di ogni singolo dispositivo nel caso in cui venissero recuperate tutte le frazioni che lo compongono (Tabella 17).

Tabella 16: Valori di mercato di materie prime secondarie derivate da RAEE, cellphone e smartphone

<i>MATERIALI</i>	<i>(€/t)</i>
Plastica	130
metalli	180
PCB	5000
Componenti elettroniche	180
Cellphone	8500
Smartphone	1300

Tabella 17: Valori economici delle frazioni recuperabili dal campione analizzato nel test industriale.

Valore (€)	Cellphone	Smartphone
medio	0,12	0,09
tot	8,29	2,22
tot campione	10,51	

A conclusione di questa indagine, ho confrontato i valori di mercato delle frazioni recuperabili che compongono i dispositivi appartenenti alle due categorie rispetto al loro anno di immissione sul mercato (Figura 29): l'andamento è pressoché lineare e decrescente. Per i Cellphone troviamo un valore medio unitario

che passa da € 0.30 nel 1989, a € 0.10 nel 2004 ed a € 0.06 nel 2012. Il numero degli Smartphone ed il loro range temporale sono più limitati, ed è stato riscontrato un valore medio unitario pari a € 0.10 dal 2006 al 2016.

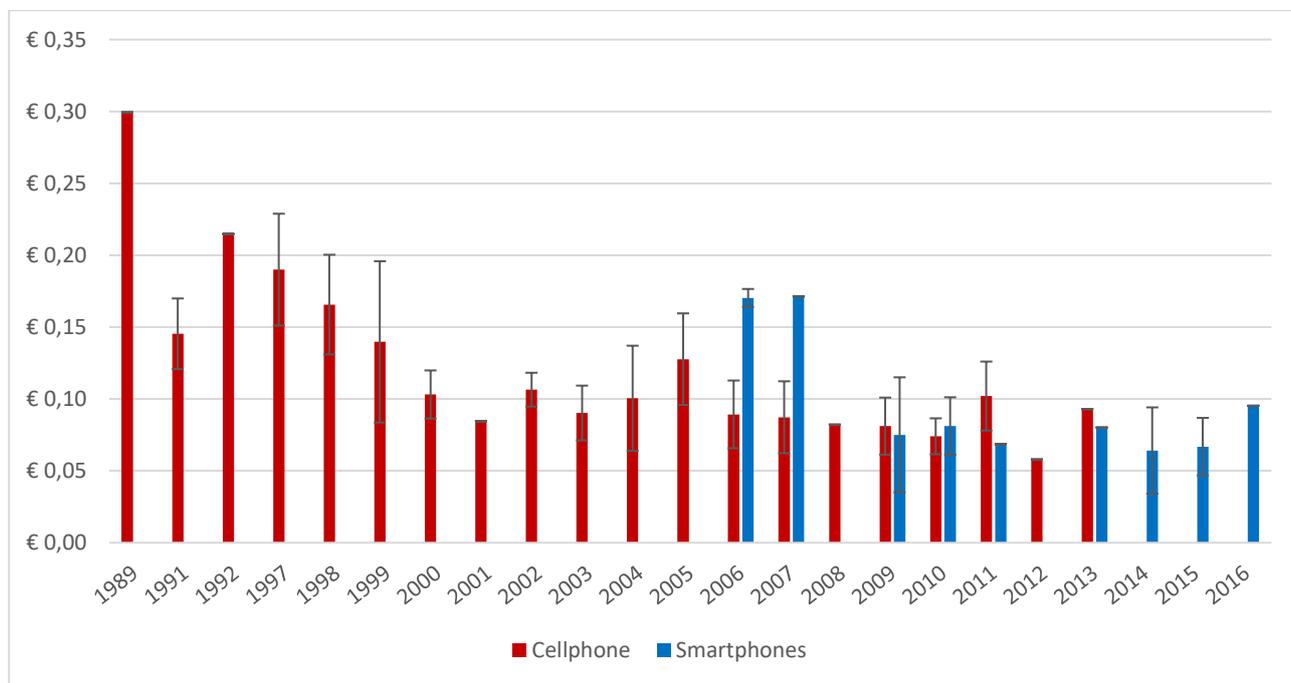


Figura 29: Variazione dei valori economici delle frazioni recuperabili in funzione delle categorie dei dispositivi e dell'anno di produzione.

3.7. Analisi tecnica ed economica

L'analisi tecnica ed economica è stata eseguita al fine di determinare quale sia la migliore strategia di gestione di questa tipologia di RAEE. Sono stati tralasciati, per avere un confronto diretto della gestione attuale con l'ipotesi analizzata, i costi di:

- acquisto dei RAEE R4 (aspetto caratteristico della realtà Italiana) secondo i valori medi di mercato aggiornati alla primavera 2018 (pari a circa 150 €/t);
- trasporto all'impianto TBD (pari a circa 150 €/t, assumendo una distanza media percorsa di 100-300 km) (fonte: Amiat SpA);

L'analisi svolta ha previsto due scenari:

- 1) il campione viene venduto tal quale secondo i valori di mercato (Tabella 16);
- 2) Il campione viene smontato e le materie prime secondarie separate, calcolando i costi necessari all'operazione.

Nel secondo scenario deve essere considerato il costo della manodopera e degli strumenti necessari a compiere l'operazione di separazione dei materiali. Per stimare il costo dello smontaggio manuale in €/t, ho tenuto conto dei costi attuali della manodopera, pari a 12.60 €/h (supponendo sia il prezzo orario di un operaio specializzato in queste operazioni); successivamente mi sono cronometrato durante lo smontaggio dei dispositivi.

Prima di ottenere i valori inseriti in Tabella 18, ho dovuto rilevare i tempi necessari per lo smontaggio e, considerando che non sono un operatore qualificato, ho valutato due tempi medi utili; il tempo T1 necessario a liberare la PCB dal telefono (4 minuti) ed il tempo T2 che ho impiegato per liberare tutte le componenti e separarle da esso (12 minuti). Ho così ricavato il numero di pezzi smontati in un'ora e facendo riferimento al peso medio di un telefono cellulare dato in letteratura (120 grammi), ho calcolato il costo di manodopera per ogni tonnellata trattata. Come si vede in Tabella 19, i valori finali sono molto elevati.

Tabella 18: Valori economici lo smontaggio manuale (manodopera e strumenti) dei telefoni cellulari stimati in base ai risultati del test industriale svolto.

Materiale e manodopera		Trattarli costa						
		Pz./h	Kg/h	t/h	h/t	€/h	€/pz.	€/t
Telefoni:	<i>T1=4 minuti</i>	12	1,44	0,00144	694,4	12,60	1,1	8.750
	<i>T2=12 minuti</i>	7,5	0,9	0,0009	1111,1	12,60	1,68	14.000

Attraverso i risultati ottenuti, mi è stato possibile calcolare i guadagni per gli scenari prima descritti, in funzione del numero di unità e delle quantità di frazioni recuperate. Nello scenario 1 (Tabella 19), il campione da me prelevato porta un guadagno totale di € 50.44 e un guadagno unitario medio pari a € 0.38.

Tabella 19: Valori economici calcolati per lo scenario 1 (i dispositivi non sono smontati).

SCENARIO 1: non smontiamo i telefoni		RICAVI		R4 input (COSTI)		GUADAGNI	
		€	€/pz.	€	€/pz.	€	€/pz.
S = 1300 €/t	Peso Tot. S= 2535,16 g PM=93g	3,30	0,12	0,76	0,03	2,54	0,09
C = 8500 €/t	Peso Tot. C= 5841,05 g PM=80g	49,65	0,68	1,75	0,02	47,90	0,66
R4 input = 300 €/t	TOTALE	52,94	0,40			50,44	0,38

Considerando lo scenario 2 (smontaggio manuale più o meno spinto dei dispositivi) ho calcolato i costi della manodopera ed attrezzatura necessaria, in funzione del peso di ogni categoria e sul totale, considerando sempre i due tempi utili T1 e T2 per lo smontaggio (Tabella 20). Il ricavo calcolato dalle frazioni recuperate sul campione totale è mediato rispetto a quelli ottenuti per le singole categorie, ma esso potrebbe risultare leggermente superiore per l'elevato numero di Cellphone rispetto agli Smartphone normalmente smaltiti. La differenza tra ricavi e costi rappresenta l'utile o guadagno: esso non è positivo per lo scenario 2 poiché i costi della manodopera sono superiori ai guadagni derivanti dalla vendita delle materie prime secondarie. E' opportuno notare però che il valore medio del ricavo per ogni singola frazione, è paragonabile con l'utile

unitario medio ottenuto nello scenario 1, e nel caso dei Cellphone esso risulta maggiore di €0.02. Questo ovviamente, non è un utile effettivo perché sarebbero da considerare i costi citati all'inizio del paragrafo (acquisto e trasporto). Infatti, se tali voci di spesa fossero incluse nella valutazione, i guadagni sarebbero pari a: -0,95 €/pezzo (T1) e -1,56 €/pezzo (T2) per i Cellphone ed a -0,99 €/pezzo (T1) e -1,59 €/pezzo (T2) per gli Smartphone.

Tabella 20: Valori economici calcolati per lo scenario 2 (i dispositivi sono smontati secondo le modalità T1 e T2).

SCENARIO 2		Manodopera e materiali (COSTI)							RICA VI frazioni separate (€/pz)	R4 input (COSTI) (€/pz)	GUADAGNI (€/pz)
		ipotesi	pz/h	kg/h	h/t	€/t	€/pz	€			
Smartphone	Peso medio = 93 g	T1	12	1,1	896	11290	1,05	28	0,09	0,03	-0,99
	Peso Tot = 2535,2 g	T2	7,5	0,7	1434	18065	1,68	45			-1,59
Cellphone	Peso medio = 80 g	T1	12	0,96	1042	13125	1,05	77	0,12	0,24	-0,95
	Peso Tot = 5841,1 g	T2	7,5	0,6	1667	21000	1,68	123			-1,56

4. Analisi delle prospettive di valorizzazione delle schede a circuiti stampati.

4.1. Che cosa sono le PCB

In questo capitolo ho voluto analizzare più nel dettaglio le schede a circuiti stampati o *Printed Circuit Board* (PCB), prima descritte ed analizzate nel bilancio di massa. Le schede pre-stampate vengono utilizzate in tutti i prodotti elettronici, ad eccezione dei più semplici; l'elaborazione di queste schede richiede uno sforzo di progettazione aggiuntivo per tracciare il circuito ma la produzione ed il montaggio avvengono con processi automatizzati, attraverso software CAD specializzati e capaci di eseguire gran parte di lavoro in layout. Per produrre le schede a circuiti stampati come quelle che si trovano nei telefoni cellulari viene eseguita una produzione di massa con metodi più economici e più veloci rispetto altri metodi di cablaggio. Una scheda a circuiti stampati supporta meccanicamente e collega elettricamente componenti elettronici e/o elettrici utilizzando sei canali conduttivi incisi da uno o più strati di rame laminati attraverso strati di fogli costituiti da un substrato non conduttivo. I componenti sono generalmente saldati e collegati elettricamente alla PCB. Queste schede possono essere costruite a faccia singola (uno strato di rame) o a doppia faccia (due strati di

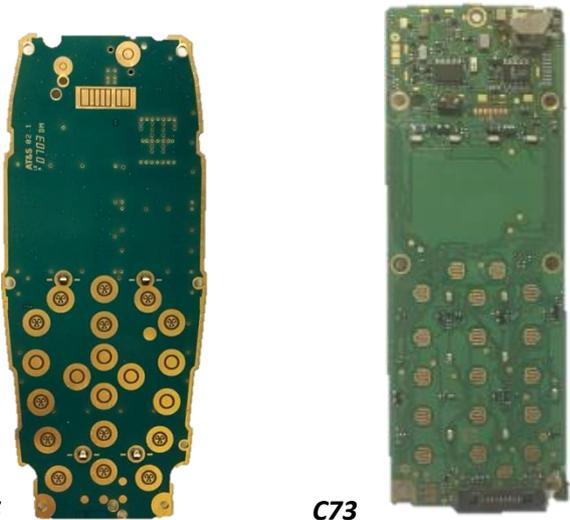
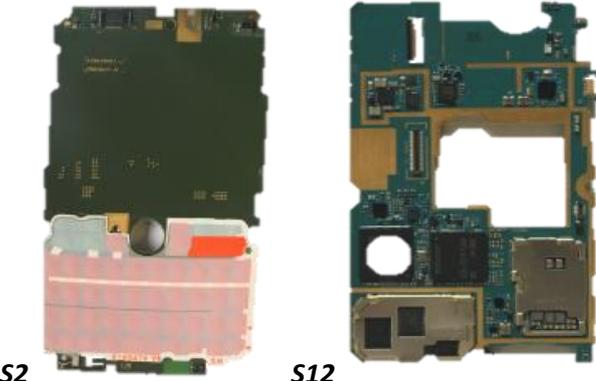
rame su entrambi i lati di un substrato) o multistrato (strati esterni e interni di rame, alternati a substrato). Le PCB multistrato consentono una densità di componenti molto più elevata, poiché le tracce dei circuiti sugli strati interni sono sovrapposte tra le varie componenti. Oggi giorno si registra una produzione di schede a circuiti stampati multistrato con 2-4 strati di rame; la tecnologia di fabbricazione di PCB multistrato laminato è un tipo di tecnologia di fabbricazione delle schede multistrato ampiamente applicata. Attraverso un processo sottrattivo per realizzare lo strato circuitale, l'interconnessione tra gli strati viene ottenuta attraverso fasi di laminazione, perforazione meccanica, impiego di rame elettrolitico e placcatura in rame. Infine vengono assemblati la maschera di saldatura, il rivestimento della saldatura e la serigrafia prima di completare un pezzo di circuito stampato. Il mercato mondiale delle PCB ha superato i 60,2 miliardi di USD nel 2014 [[http://www.iconnect007.com/index.php/article/92973/world-pcb-production-in-2014-estimated-at602b/92976/? skin=pcb](http://www.iconnect007.com/index.php/article/92973/world-pcb-production-in-2014-estimated-at602b/92976/?skin=pcb)]. Gli smartphones si stanno evolvendo attraverso la miniaturizzazione e le multi-funzioni, modificando così le dimensioni e le caratteristiche delle PCB [<https://www.pcbcart.com/article/content/design-pcbs-for-smart-phones.html>]

4.2. Evoluzione storica della composizione e della dimensione delle PCB

L'evoluzione della composizione delle schede a circuiti stampati rispecchia l'evoluzione delle caratteristiche estetiche e funzionali dei telefoni cellulari; dai primi modelli risalenti a più di vent'anni fa sostituiti oggi, da telefoni intelligenti che sono diventati un prodotto elettronico imperdibile e che oltre un terzo delle comunicazioni e delle attività quotidiane sono svolte attraverso gli smartphone con il loro valore che aumenta rapidamente ogni anno. Si stima che i vecchi telefoni cellulari (Cellphone) saranno ridotti del 23,5% entro il 2020. Al contrario, gli Smartphone a tutti i livelli manterranno un trend di crescita dell'8,0% entro il 2020 [<https://www.pcbcart.com/article/content/design-pcbs-for-smart-phones.html>]. Quest'ultimi dispositivi oltre a svolgere le normali funzioni come la comunicazione vocale e l'invio tramite messaggi e e-mail, si stanno conformando a funzioni equivalenti a quelle dei computer, tra cui la navigazione delle pagine web, la comunicazione online, le varie applicazioni e social media, la connessione con orologi intelligenti, PC, elettrodomestici e apparecchiature di bordo. Se parliamo quindi di aspetto e dimensione, gli smartphone a differenza dei cellphone si presentano più grandi ma più sottili, così come sono ridotte le dimensioni delle schede a circuito stampato contenute al loro interno.

In Tabella 21 vengono raffigurate alcuni esempi di PCB estratte dai dispositivi del campione esaminato nel test industriale, con le relative caratteristiche tecniche; le PCB dei Cellphone (a sinistra) si presentano molto più grandi e assemblate da molte altre componenti elettroniche cablate tra loro a differenza delle PCB degli Smartphone (a destra) che sono nettamente più piccole e sottili, con componenti elettroniche miniaturizzate che riducono la dimensione della scheda pre-stampata.

Tabella 21: Esempi di schede a circuiti stampati (PCB) estratte dai dispositivi in esame.

<i>PCBs Cellphone</i>						<i>PCBs Smartphone</i>					
											
<i>Cod.</i>	<i>Modello</i>	<i>Anno</i>	<i>P_tel.[g]</i>	<i>P_PCB[g]</i>	<i>%</i>	<i>Cod.</i>	<i>Modello</i>	<i>Anno</i>	<i>P.tel g.</i>	<i>P.PCB g</i>	<i>%</i>
C25	Nokia 3510	2002	69,76	18,88	27	S2	NokiaE61i	2006	107,4	30,8	29
C73	Motorola	1992	122,91	40,37	33	S12	Samsung	2016	70,5	17,4	25

Sulla base delle funzioni e della tendenza di sviluppo dei futuri smartphone, le schede a circuito stampato altamente multistrato dovrebbero essere applicate come scheda madre e le PCB con meno strati come scheda figlia complementare. Quando si tratta della fabbricazione di schede madre, vengono generalmente selezionati PCB a strati multipli (fino a 10 strati). Grazie all'integrazione delle funzioni guidata dal packaging dei semiconduttori, è estremamente probabile che il numero di strati rimanga invariato o addirittura ridotto nel corso degli anni. [<https://www.pcbcart.com/article/content/design-pcbs-for-smart-phones.html>] Altri esempi sono raffigurati nel capitolo 3 paragrafo 3.4.2. Figure 23 e 24. Nel paragrafo 3.5. in Figura 27 sono state rappresentate le quantità delle frazioni recuperabili dai telefoni cellulari in funzione dell'anno di produzione di questi; mentre la variazione del peso delle PCB in mg/kg differenziate per le due categorie analizzate, rispetto sempre l'anno di produzione, viene mostrata in Figura 30.

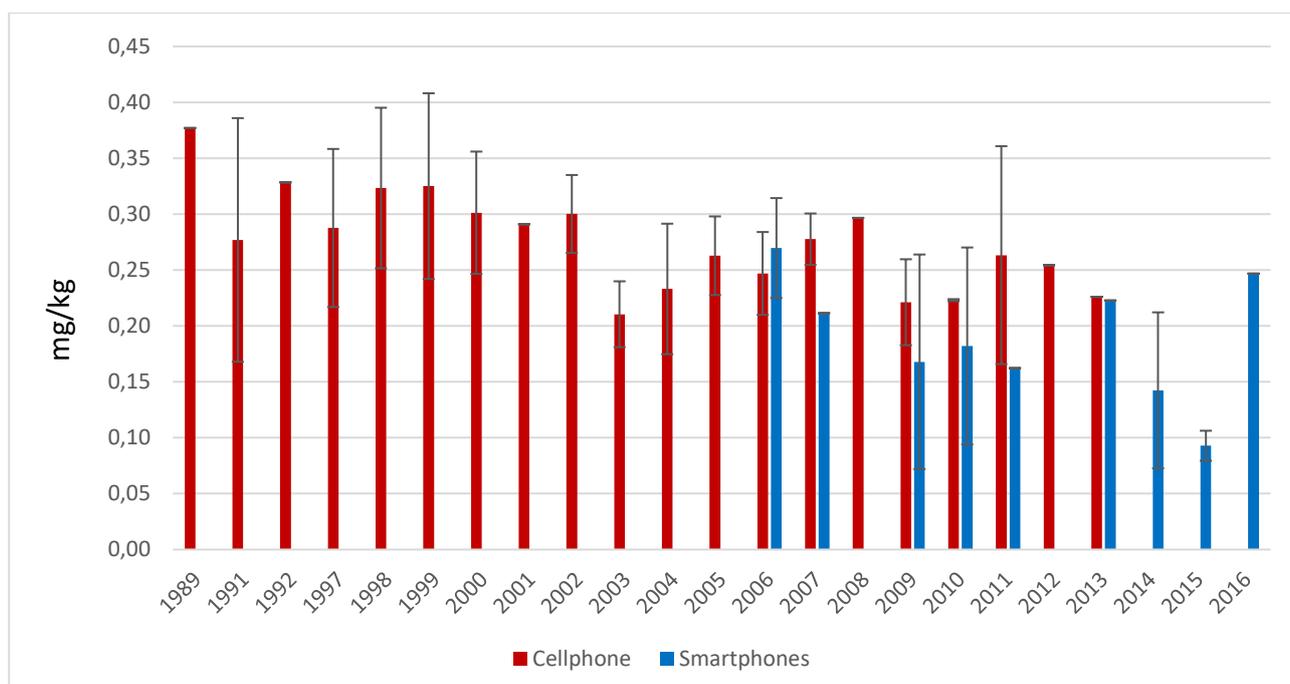


Figura 30: Quantità in mg/kg di PCB dei telefoni cellulari prodotti in diversi anni.

Anche da questi risultati, si evince che nei modelli prodotti nei primi anni del range temporale considerato, il peso della PCB è maggiore rispetto i nuovi modelli con un andamento che sembra decrescere quasi linearmente negli anni (se consideriamo i valori estremi al nostro dominio temporale, dove le unità analizzate sono solamente una per ogni categoria, la differenza tra il peso delle PCB è comunque più del 10%).

4.3. Significatività delle PCB rispetto a metalli preziosi e CRM

L'intercettazione e il recupero delle schede a circuiti stampati diventano fondamentali una volta verificate la dimensione ed il loro peso in relazione al peso totale dell'unità di RAEE in esame, e la presenza e la quantità di metalli preziosi. Se ci riferiamo ancora alla letteratura sappiamo che una singola scheda può contenere più di 20 diversi metalli oltre a componenti in ceramica e plastica (Cucchiella et al., 2015). Il valore di mercato delle PCB è variabile in base a dimensione, numero di chip nel circuito integrato, presenza di piccoli condensatori, pin dorati, connettori placcati in oro, lastre d'oro (Razi, 2016).

Una classificazione comune in letteratura distingue tra: PCB di alta qualità (ad esempio incorporato in mainframe e smartphone), PCB di media qualità (ad es. incorporato in PC, laptop o computer desktop) e PCB di bassa qualità (ad es. incorporato in TV, monitora stampanti e telefoni cordless) (Cucchiella et al., 2015). Le caratteristiche costruttive importanti per i PCB sono il loro numero di strati:

- Singolo strato;
- Pannello a doppio strato, costituito da circuiti con due strati di rame collegati da fori metallizzati
- Schede multistrato, costituite da circuiti posizionati in più strati su a singola scheda

Questa distinzione consente di calcolare la quantità di rame.

[Yamane et al. \(2011\)](#) definisce la composizione delle PCB estratte da telefoni cellulari (PCB-MP) come 63% -wt di metalli, 24% -wt di ceramica e 13% -wt di polimeri; mentre per [Park and Fray \(2009\)](#) le PCB provenienti dai personal computer (PCB-PC) erano composte da 45% -wt metalli, ceramica 28% -wt e polimeri 27% -wt, con un contenuto di metalli preziosi inferiore allo 0,2% -wt che rappresenta oltre l'80% del loro valore totale. Metalli come lo stagno, il piombo, lo zinco sono utilizzati nelle PCB per saldare le componenti elettroniche. Una tonnellata di PCB può contenere tra gli 80 ed i 1500 g di oro e tra i 160 e i 210 kg di rame, che in realtà rappresentano rispettivamente, da 40 a 800 volte la quantità trovata nelle miniere d'oro e da 30 a 40 volte la concentrazione di rame estratta dalle miniere negli Stati Uniti ([Alcantara-Concepcion et al., 2016](#)). Tra i metalli preziosi, l'argento è stato trovato sia nelle PCB-PC che nelle PCB-MP, ma l'oro è stato trovato prevalentemente nelle PCB-PC [[Charles et al. \(2017\)](#)].

4.4. Analisi di due campioni di PCB nell'ambito del test industriale

Le 6 PCB rimosse da 3 telefoni cellulari appartenenti al campione Cellphone e 3 appartenenti al campione Smartphone, sono state comminuite in un mulino a coltelli Retsch SM200 presso il Laboratorio di Trattamento dei Solidi del DIATI. Quattro di esse sono già state raffigurate e descritte in Tabella 21 del paragrafo 2 di questo capitolo, si aggiunge all'analisi un'altra scheda del Cellphone C14 (Sony Ericsson del 1998 con peso pari a 172 g e peso della PCB pari a 25g) ed un'altra dello Smartphone S1 (modello analogo allo smartphone S2 descritto in Tabella 20). Dai risultati ottenuti, precedentemente commentati, la percentuale del peso della PCB rispetto il peso totale del dispositivo è molto influente e la differenza più grande la otteniamo tra il Cellphone prodotto nel 1992 e lo smartphone prodotto nel 2016, rispettivamente 33% wt e 25% wt.

L'analisi chimica dei due campioni di PCB macinati è stata svolta mediante spettrometro XRF Shimadzu EDX-8000P presso la Shimadzu Italia di Milano. Questo strumento è uno spettrometro a fluorescenza a dispersione di energia elettromagnetica, che misura la lunghezza d'onda e quindi l'intensità dei raggi X fluorescenti generati con energie diverse in funzione dell'elemento analizzato così da caratterizzarlo qualitativamente e poiché l'intensità dei raggi X è una funzione della concentrazione, si può avere un'analisi quantitativa misurando il numero di questi in funzione della lunghezza d'onda specifica di ogni elemento che costituisce un generico campione. Viene applicato per analisi elementari, non distruttive di campioni solidi (con pezzatura molto fine) e liquidi. Per ciascun campione sono state fatte due repliche, tali da confermare la tipologia e la quantità degli elementi; i valori sono stati poi mediati per le due categorie di telefoni cellulari. In Figura 31 è possibile visualizzare a titolo di esempio i risultati ottenuti da una prova eseguita dallo spettrometro XRF, per il campione dei Cellphone.

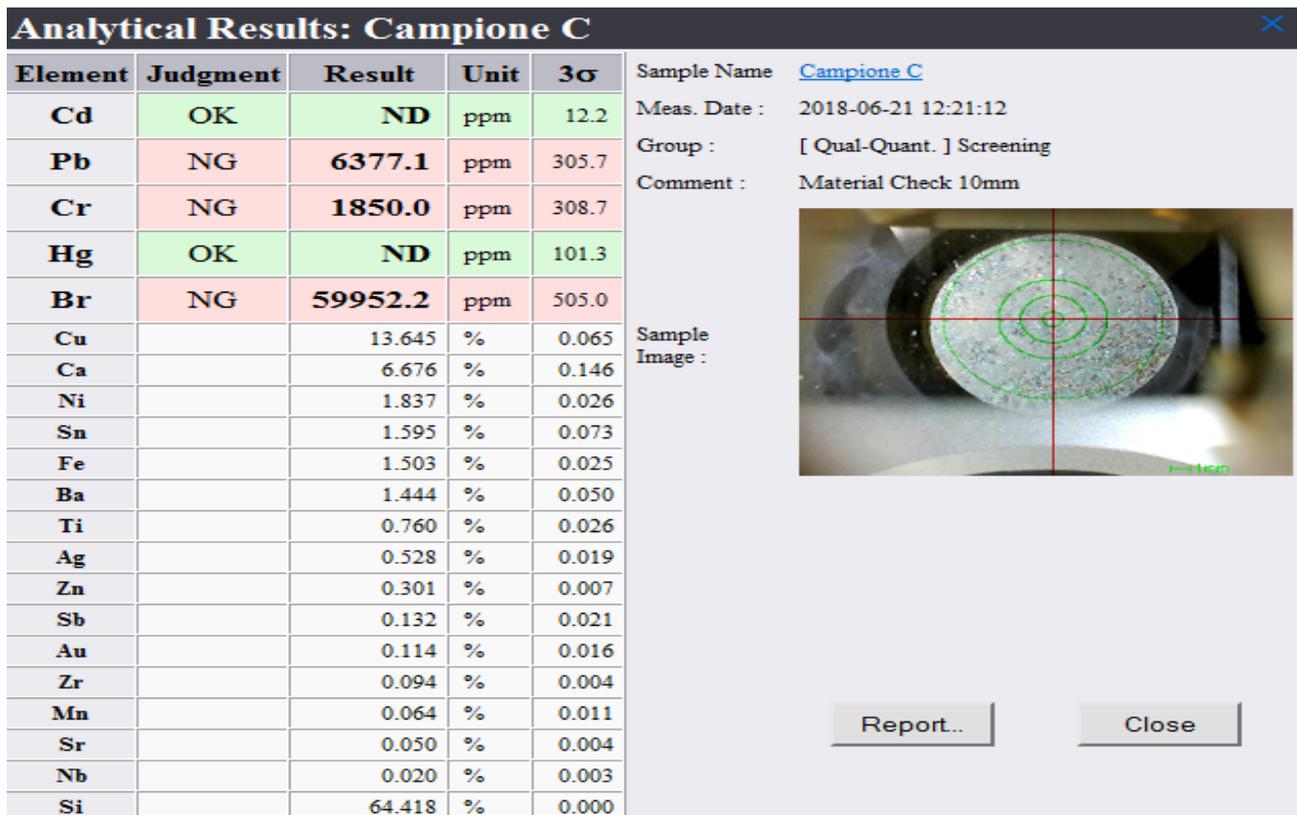


Figura 31: Risultati ottenuti da un test XRF per uno specifico campione.

Come si può notare dalla Figura 31, gli elementi che compongono le PCB sono moltissimi e tra questi si trovano sia materiali critici che metalli preziosi; le quantità di questi però variano tra le due categorie di schede analizzate. Mediando i valori ottenuti per le due repliche dell'analisi, si evidenzia un contenuto di rame, presente con una quantità maggiore del 24% nel campione delle PCB degli Smartphone rispetto le PCB dei Cellphone in funzione del loro peso. Calcio (6,2% e 6,7% rispettivamente), bario (2,3% e 1,3%), nickel (1,4% e 1,8%), stronzio (1,4% e 1,5%), zinco (0,8% e 0,3%), trizio (0,83% e 0,77%) e manganese (0,06% e 0,02%) hanno invece contenuti pressochè costanti per entrambe le categorie, il contenuto di ferro invece è maggiore dello 0,9% nelle schede dei cellphone rispetto quelle degli smartphone. In quest'ultime non sono stati ritrovati antimonio e niobio (0,13% e 0,02% rispettivamente nelle PCBs dei cellphone) ma sono presenti zolfo con lo 0,4% del peso totale e manganese con un contenuto dello 0,06%.

I metalli preziosi si trovano in maggior quantità nelle PCB provenienti dai cellphone: è stato misurato un valore medio di argento pari a 0,26% nelle PCB appartenenti al campione degli smartphone mentre in quelle dei cellphone l'argento ha un tenore pari a 0,53%. È stato inoltre calcolato un contenuto medio di oro pari a 0,13% rispetto al peso delle PCB dei cellphone. Quest'ultimo dato dimostra effettivamente la riduzione dei contenuti di materiali preziosi, nella progettazione delle PCB con l'evoluzione tecnologica durante gli anni, passando dal modello cellphone a smartphone. Si è avuta non solo una riduzione di dimensioni e peso delle varie componenti elettroniche e quindi del contenuto di metalli preziosi, ma anche la sostituzione di alcuni

elementi con altri, ad esempio niobio (Nb) e antimonio (Sb) presenti nelle schede dei vecchi telefoni sostituiti con lo zolfo (S) presente nelle schede dei nuovi dispositivi.

I risultati della caratterizzazione chimica delle PCB sono mostrati in Figura 32 e confrontati con la composizione delle PCB provenienti da desktop computers provenienti dall'impianto TBD, in grigio (Santucci, 2018). Si nota come le quantità di molti elementi utilizzati per la composizione delle PCB è molto più elevata cellphone e smartphone rispetto alle PCBs estratte da desktop computer, in funzione del peso totale della scheda.

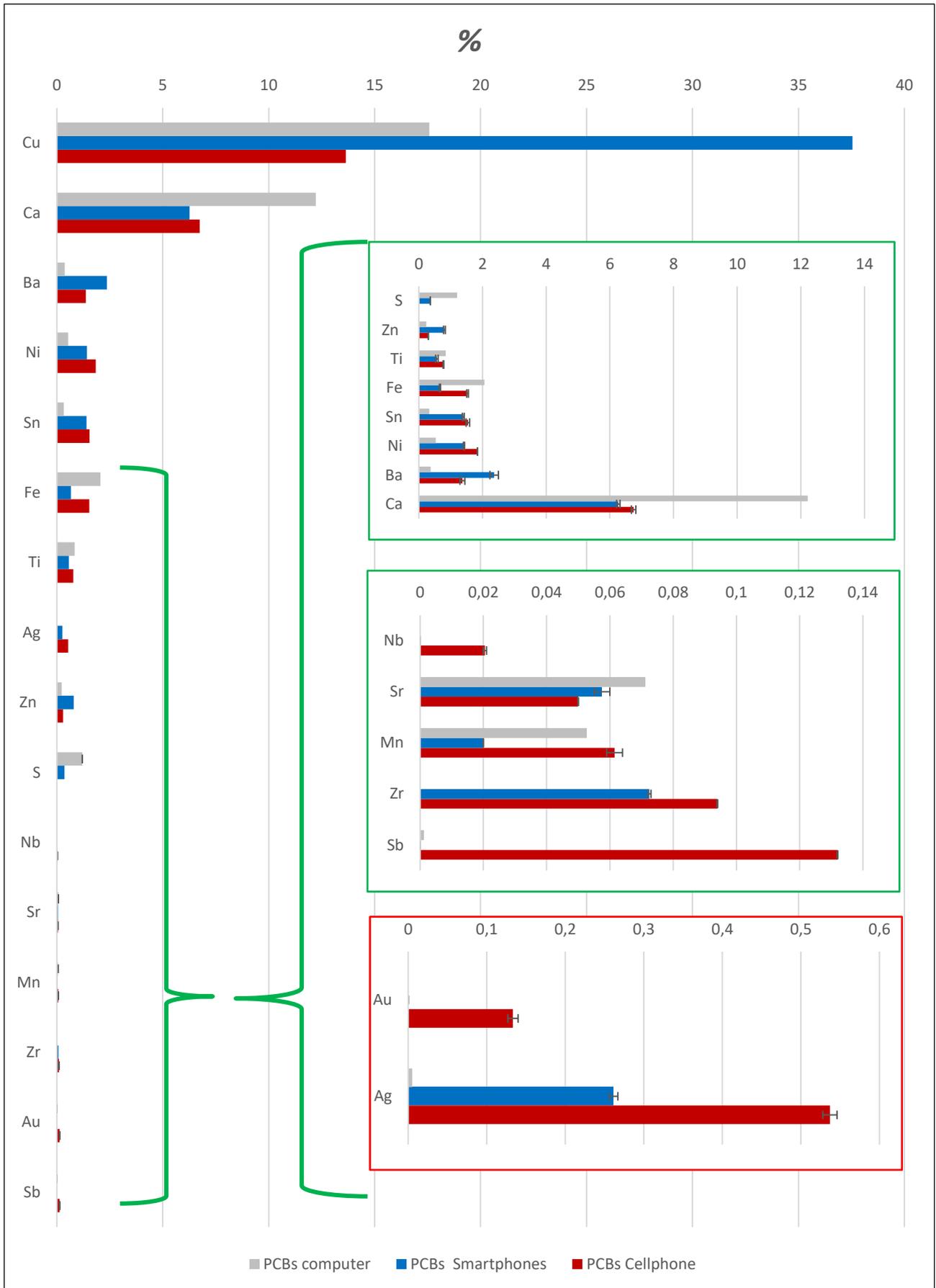


Figura 32: Composizione delle PCB derivanti da cellphone, smartphone e desktop computer provenienti dall'impianto TBD

Nelle Figure 30, 31 e 32 sono mostrate le quantità dei metalli preziosi e non analizzati nelle PCB derivanti da PC e telefoni cellulari negli ultimi 20 anni [Oguchietal., 2011; Razi, 2016; Cui and Zhang, 2008; Cucchiellaetal., 2016; Yang etal., 2014; Evangelopoulosetal., 2017 Park and Fray, 2009; Cui and Zhang, 2008; Ogunniyet al., 2009; Zhang and Forssberg, 1997; Veitet al., 2002; Huismanet al., 2007 and 2008; Birloagaet al., 2013 Cui and Zhang, 2008; Ogunniyet al., 2009; Forssberg, 1997; Veitet al., 2002; Huismanet al., 2007 and 2008; Birloagaet al., 2013]. Per ogni anno si è stimato un valore medio dei dati disponibili in letteratura. Un'alta variabilità è stata osservata per il ferro (10-700 mg/kg, con valore medio pari a 347 mg/kg) e alluminio (12870 mg/kg, valore medio pari a 418 mg/kg) contenuto (Figura 30), così come per lo zinco (0.4-4.5% -wt, valore medio uguale a 1.65% -wt) e piombo (1,2-5% -wt, valore medio uguale a 2,4% -wt) (Figura 32). Il rame ha contenuti superiori a tutti gli altri metalli (10-41% -wt, valore medio uguale a 24% -wt), con valori crescenti negli ultimi due decenni (Figura 31), correlato all'uso di PCB multistrato, come prima menzionato. Se analizziamo i metalli preziosi (in Figura 30), negli anni 2011-2017 il palladio era variabile (10- 112 mg/kg, con valore medio pari a 56 mg/kg), mentre è stata osservata una netta decrescita dei valori dell'oro (60-786 mg/kg, con valor medio pari a 369 mg/kg) e argento (239-1619 mg/kg, valore medio 789 mg/kg).

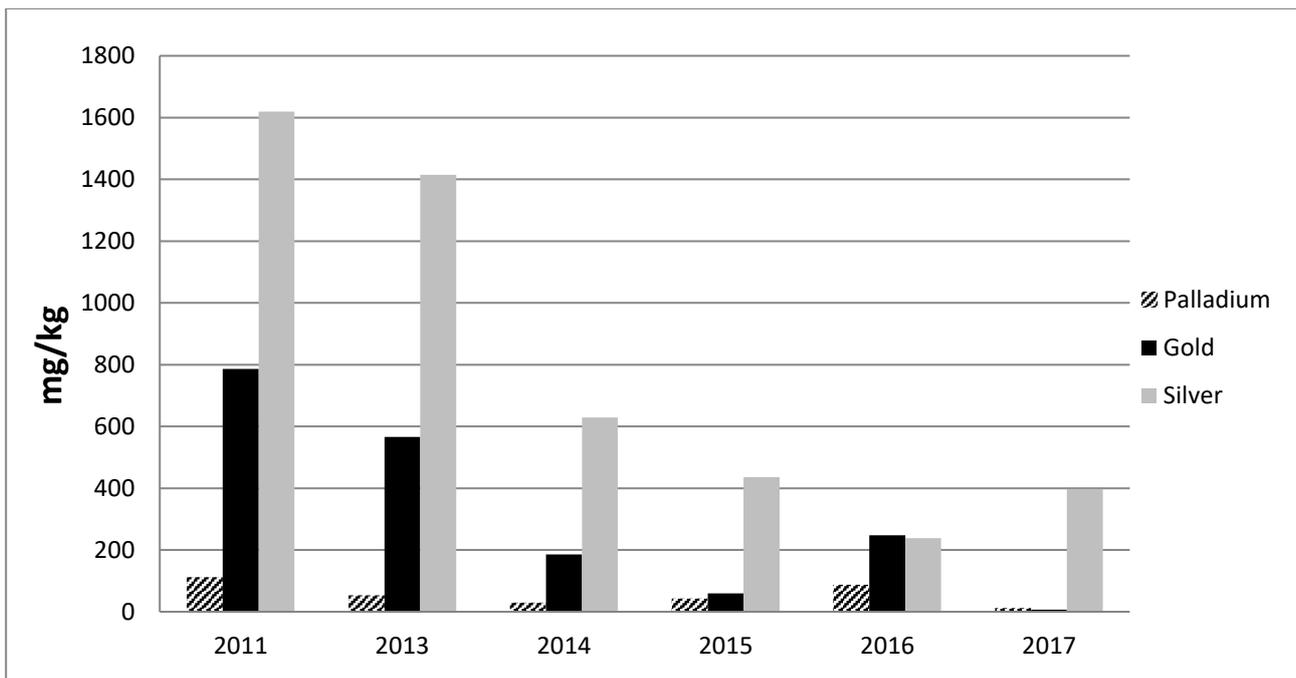


Figura 33: Concentrazione di palladio, oro e argento in mg/kg in PCB nel periodo 2011-2107 (Oguchietal., 2011; Razi, 2016; Cui and Zhang, 2008; Cucchiellaetal., 2016; Yang etal., 2014; Evangelopoulosetal., 2017).

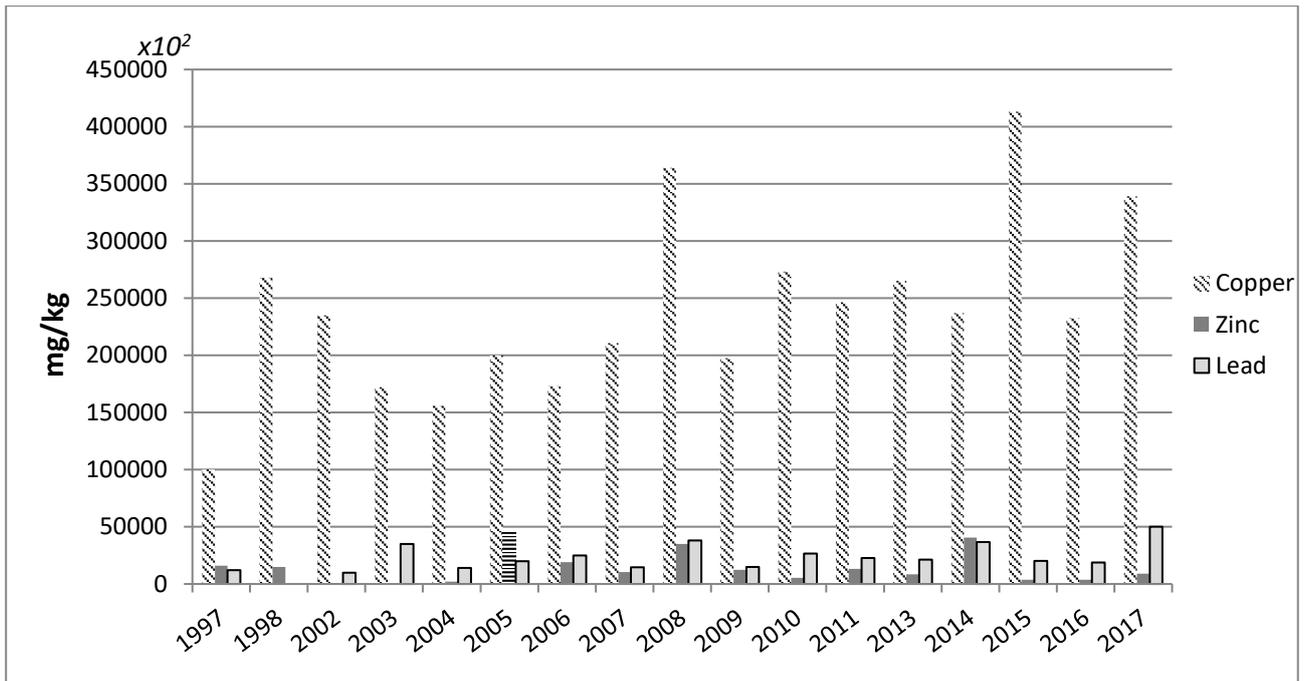


Figura 34: Concentrazione di rame, zinco e piombo nelle PCB nel periodo 1997-2017
 (Park and Fray, 2009; Cui and Zhang, 2008; Ogunniyet al., 2009; Zhang and Forssberg, 1997; Veitet al., 2002; Huismanet al., 2007 and 2008; Birloagaet al., 2013).

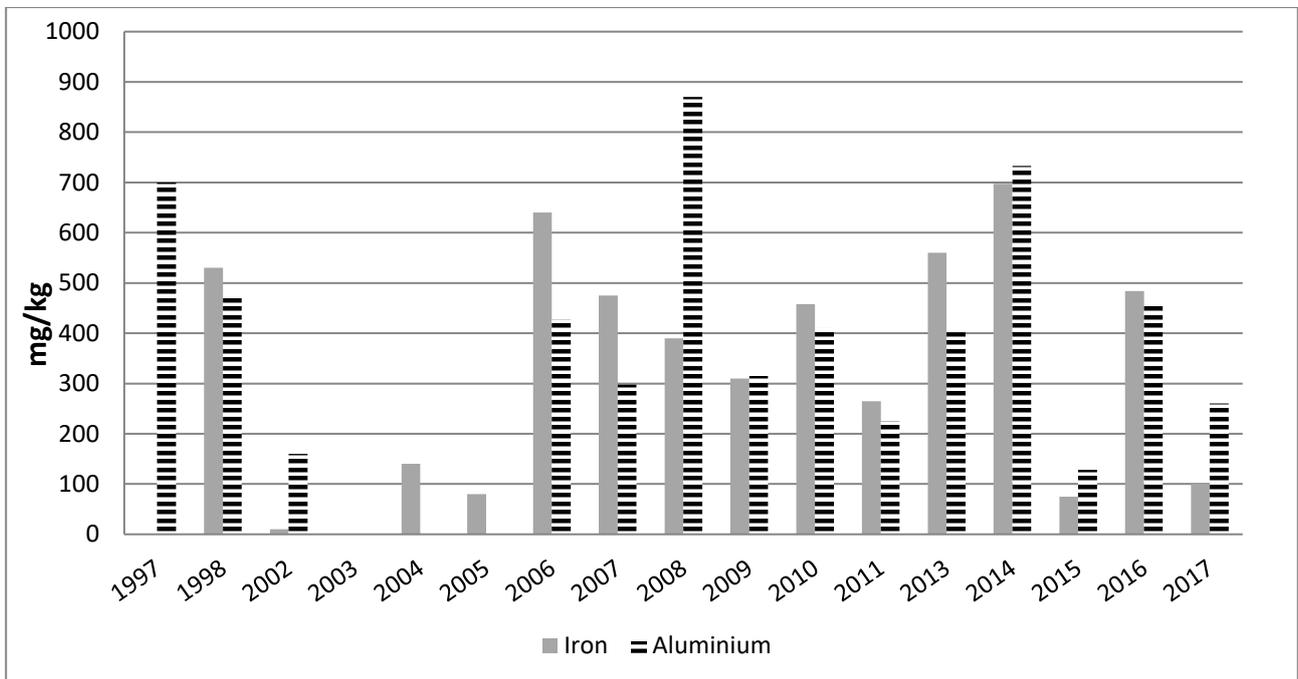


Figura 35: Concentrazione di ferro e alluminio nelle PCB nel periodo 1997-2017
 (Park and Fray, 2009; Cui and Zhang, 2008; Ogunniyet al., 2009; Forssberg, 1997; Veitet al., 2002; Huismanet al., 2007 and 2008; Birloagaet al., 2013).

5. Conclusioni

Concludendo la mia indagine sulle prospettive di valorizzazione di frazioni utili derivanti da telefoni cellulari, smartphone e cordless ho potuto constatare che:

- La vita utile media dei dispositivi di comunicazione mobile (DCM) ha un valore relativamente breve per le due categorie analizzate rispettivamente per i cellphone pari a 15 anni e per gli smartphone pari a 6,4 anni, pertanto i DCM sono definiti “a ciclo di vita breve”.
- Il bilancio di massa delle frazioni recuperabili presenta delle piccole variazioni di percentuali tra le due categorie considerate, dovute alla estrema eterogeneità dei 105 dispositivi in esame. Le analisi qui svolte confermano come la media dei valori dei pesi delle PCB ottenuta è maggiore nei vecchi dispositivi (cellphone) rispetto i nuovi (smartphones).
- I risultati del bilancio di massa sono coerenti con i dati di letteratura (dove non viene fatta una distinzione tra categorie e modelli di DCM).
- L’analisi economica della fattibilità del processo di smontaggio manuale dei DCM ha mostrato che, nel contesto Italiano, esso non è sostenibile.
- la caratterizzazione chimica delle PCB ha confermato la presenza di metalli di elevato valore commerciale e la evoluzione storica delle caratteristiche quantitative e qualitative delle PCB stesse.

Una corretta gestione, trattamento e recupero di materiali dalle PCB contenute nei telefoni cellulari rispetto quelle contenute in altri dispositivi (come ad esempio i personal computer) potrebbe diventare un’azione strategica per il contesto Italiano ed Europeo, pienamente coerente con le politiche europee sulla Economia Circolare, a patto di aumentare notevolmente i flussi di cellulari e smartphone a fine vita intercettati dai sistemi di raccolta nazionali e inviati a trattamento in impianti autorizzati.

Riferimenti bibliografici

- [1] Alcantara-Concepcion V., Gaviln-Garca A., Gaviln Garca I.C. (1993). Environmental impacts at the end of life of computers and their management alternatives in Mexico. *J. Cleaner Prod.*, vol. 131, 615-628.
- [2] Alessandra Cesaro, Alessandra Marra, Vincenzo Belgiorno, Marco Guida; Effectiveness of WEEE mechanical treatment: Separation yields and recovered material toxicity; *Journal of Cleaner Production* 142 (2017) 2656 e 2662
- [3] Bachér J., Kaartinen T.; Liberation of Printed Circuit Assembly (PCA) and dust generation in relation to mobile phone design in a size reduction process; *Waste Management* (2017) (60): 609-617.
- [4] Bachér J., Mrotzek A., Wahlstrom M.; Mechanical pre-treatment of mobile phones and its effect on the Printed Circuit Assemblies (PCA); *Waste Management* (2015) (45): 235-245.
- [5] Balde C.P., Kuehr R., Blumenthal K., Fondeur Gill S., Kern M., Micheli P., Magpantay E., Huisman J. (2015). E-waste statistics: Guidelines on classifications, reporting and indicators. United Nations University, IAS-
- [6] Baldé, C.P., Forti V., Gray, V., Kuehr, R., Stegmann P. (2017). The Global E-waste Monitor United Nations University (UNU), International Telecommunication Union (ITU) & International Solid Waste Association (ISWA), Bonn/Geneva/Vienna. Available at URL: https://collections.unu.edu/eserv/UNU:6341/Global-E-waste_Monitor_2017__electronic_single_pages_.pdf
- [7] Bin Lu, Jianxin Yang, Winifred Ijomah, Wenjie Wuc, Gabriel Zlamparet Perspectives on reuse of WEEE in China: Lessons from the EU Resources, Conservation & Recycling (2017)
- [8] M. Bigum, A. Damgaard, C. Scheutz, T.H. Christensen; Environmental impacts and resource losses of incinerating misplaced household special wastes (WEEE, batteries, ink cartridges and cables); *Resources Conservation and Recycling* 122 (2017) 251–260
- [9] Biswajit Debnath, Priyanka Roychowdhury, Rayan Kundu; Electronic Components (EC) Reuse and Recycling – A New Approach towards WEEE Management *Procedia; Environmental Sciences* 35 (2016) 656 – 668
- [10] Bo Li, Jianxin Yang, Bin Lu, Xiaolong Song Estimation of retired mobile phones generation in China *Waste Management* 35 (2015) 247-254
- [11] B.M. Caballero, I. de Marco, A. Adrados, A. López Urionabarrenechea, J. Solar, N. Gastelu Possibilities and limits of pyrolysis for recycling plastic rich waste streams rejected from phones recycling plants *Waste Management* 57 (2016) 226–234
- [12] CdC RAEE. Weee annual report 2017 - collection and treatment of waste electrical and electronic equipment in Italy. 2017.
- [13] Charles R.G., Douglas P., Liv Hallen I., Matthews I., Liversage G.; An investigation of trends in precious metal and copper content of RAM modules in WEEE: Implications for long term recycling potential; *Waste Management* (2017) (60): 505-520.
- [14] Federica Cucchiella, Idiano D'Adamo, S.C. Lenny Koh, and Paolo Rosa (2015). Recycling of WEEEs: An economic assessment of present and future e-waste streams. *Renew. Sust. Energ. Rev.*, vol. 51, 263-272.

- [15] Guo X., Yan K.; Estimation of obsolete cellular phones generation: A case study of China; *Science of the Total Environment* (2017) (575): 321-329.
- [16] Holgersson S., Steenari B.M., Bjorkman M., Cullbrand K.; 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; *Resources, Conservation and Recycling*; (2017) (article in press).
- [17] <http://www.amiat.it/cms/azienda/115-impianti/trattamento-beni-durevoli-raee>
- [18] http://www.ecodom.report/it/ Ecodom_Report_corretto_pdf.
- [19] https://ec.europa.eu/commission/index_it
- [20] https://en.wikipedia.org/wiki/Printed_circuit_board
- [21] <https://puntocellulare.it/cercafonino/index.html>
- [22] https://www.amazon.it/s/ref=nb_sb_noss_2?__mk_it_IT=%C3%85M%C3%85%C5%BD%C3%95%C3%91 &url=search-alias%3Daps&field-keywords=iphone+4&rh=i%3Aaps%2Ck%3Aiphone+4
- [23] https://www.to.camcom.it/sites/default/files/ambiente/24147_CCIAATO_962014.pdf normativa RAEE rivenditore
- [24] https://www.to.camcom.it/sites/default/files/ambiente/U1292_2017_2017-Guida_RAEE_To.pdf
U1292_2017_2017-Guida_RAEE_To promosso da Camera di Comm Industria artigianato e agricoltura torino realizzato da ecocerved.
- [25] Jia Li, Yiqun Jiang, Zhenming Xu; Eddy current separation technology for recycling printed circuit boards from crushed cell phones; *Journal of Cleaner Production* 141 (2017) 1316-1323
- [26] Jinghong Bian, Hongtao Bai, Wenchao Li, Jianfeng Yin, He Xu; Comparative environmental life cycle assessment of waste mobile phone recycling in China *Journal of Cleaner Production* 131 (2016) 209 e 218
- [27] Keshav Parajuly, Henrik Wenzel Potential for circular economy in household WEEE management *Journal of Cleaner Production* 151 (2017) 272 -285
- [28] Khandakar Md Habib Al Razi (2016). Resourceful recycling process of waste desktop computers: A review study. *Resour. Conserv. Recy.*, vol. 110,30-47.
- [29] Kimitaka Sugiyama, Osamu Honma, Nozomu Mishima Quantitative Analysis of Material Flow of Used Mobile Phones in Japan *Procedia CIRP* 40 (2016) 79 – 84
- [30] Lavoro di tesi di Vincenzo Santucci; Investigation of the recovery of secondary Raw Materials from desktop personal computers_2018
- [31] Luciana Harue Yamane, Viviane Tavares de Moraes, Denise Croce Romano Espinosa, Jorge Alberto Soares Tenório Recycling of WEEE: Characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers *Waste Management* 31 (2011) 2553–2558
- [32] Manivannan Senthil velmurugan; Environmental and health aspects of mobile phone production and use: Suggestions for innovation and policy; *Environmental Innovation and Societal Transitions*; (2016) (21): 69-79.

- [33] Maximilian Ueberschaar, Julia Geiping, Malte Zamzow, Sabine Flamme, Vera Susanne Rotter Assessment of element-specific recycling efficiency in WEEE pre-processing Resources, Conservation & Recycling 124 (2017) 25–41
- [34] Maximilian Ueberschaar, Sarah Julie Otto, Vera Susanne Rotter; Challenges for critical raw material recovery from WEEE – The case study of gallium; Waste Management 60 (2017) 534–545
- [35] Meenakshi Hira, Sudesh Yadav, P. Morthekai, Anurag Linda, Sushil Kumar, Anupam Sharma Mobile Phones—An asset or a liability: A study ..of metals in waste mobile phonecomponents using leaching tests Journal of Hazardous Materials 342 (2018) 29–40
- [36] Ministro per le politiche comunitarie e Ministro dell'ambiente e della tutela del territorio. Decreto legislativo 25 luglio 2005, n. 151. attuazione delle direttive 2002/95/ce, 2002/96/ce e 2003/108/ce, relative alla riduzione dell'uso di sostanze pericolose nelle apparecchiature elet- triche ed elettroniche, nonche' allo smaltimento dei ri_uti, 2005.
- [37] Paiano A., Lagioia G., Cataldo A.; A critical analysis of the sustainability of mobile phone use; Resources, Conservation and Recycling; (2013) (73): 162-171
- [38] Quanyin Tan, Qingyin Dong, Lili Liu, Qingbin Song, Yangyang Liang, Jinhui Li Potential recycling availability and capacity assessment on typical metals in waste mobile phones: A current research study in China Journal of Cleaner Production 148 (2017) 509-517
- [39] Rhys Gareth Charles, Peter Douglas, Ingrid Liv Hallin, Ian Matthews, Gareth Liversage An investigation of trends in precious metal and copper content of RAM modules in WEEE: Implications for long term recycling potential Waste Management 60 (2017) 505–520
- [40] Roberta Palmieri, Giuseppe Bonifazi, Silvia Serranti Recycling-oriented characterization of plastic frames and printed circuitboards from mobile phones by electronic and chemical imaging Waste Management 34 (2014) 2120–2130
- [41] P. Sarath, Sateesh Bonda, Smita Mohanty, Sanjay K. Nayak Mobile phone waste management and recycling: Views and trends Waste Management 46 (2015) 536–545
- [42] Stellan Holgersson, Britt-Marie Steenari, Max Björkman, Klas Cullbrand Analysis of the metal content of small-size Waste Electric andElectronic Equipment (WEEE) printed circuit boards—part 1: Internet routers, mobile phones and smartphones Resources, Conservation and Recycling xxx (2017)
- [43] Tan Q., Dong Q., Liu L., Song Q., Liang Y., Li J.; Potential recycling availability and capacity assessment on typical metals in waste mobile phones: A current research study in China; Journal of Cleaner Production (2017) (148): 509-517.
- [44] The European Parliament and the Council of the European Union. Directive 2012/19/eu, 2012.
- [45] Wen-Jing Deng, John P. Giesy, C.S. So, Hai-Long Zheng; End-of-life (EoL) mobile phone management in Hong Kong households; Journal of Environmental Management 200 (2017) 22e28
- [46] Xueyi Guo, Kang Yan Estimation of obsolete cellular phones generation: A case study of China; Science of the Total Environment 575 (2017) 321–329

- [47] Yamane, L.H. et al. (2011). Recycling of WEEE: characterization of spent printed circuit boards from mobile phones and computers. *Waste Manage*, vol.31, 2553-2558.
- [48] Yang, Y. et al. (2014): Bioleaching waste printed circuit boards by *Acidithiobacillus ferro oxidans* and its kinetics aspect. *J. Biotechnol*, vol.173, 24-30.
- [49] Zhang S., Ding, J., Liu B., Chang C.; Supply and demand of some critical metals and present status of their recycling in WEEE; *Waste Management* (2017) (65): 113-127.
- [50] Zhang, S.; Forssberg, E. (1997): Mechanical separation-oriented characterization of electronic scrap. *Resour. Conserv. Recy.*, vol.21, 247-269.
- [51] Zhao C., Zhang X., Ding J., Zhu Y.; Study on recovery of valuable metals from waste mobile phones PCB particles using liquid-solid fluidization technique; *Chemical Engineering Journal* (2017) (311): 217-226.