

IL SISTEMA DI GESTIONE DEI RAEE IN LOMBARDIA.

PARTE I: BILANCIO DI MATERIA

Alida Falbo^{1*}, Laura Biganzoli¹, Federica Forte¹, Lucia Rigamonti¹, Mario Grosso¹

1. Politecnico di Milano, Dipartimento di Ingegneria Civile e Ambientale – Sezione Ambientale

Ricevuto il 1-12-2014. Modifiche sostanziali richieste il 19-1-2015. Accettazione il 30-3-2015.

1. INTRODUZIONE

I rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE) presentano, rispetto alle altre tipologie di rifiuti, uno dei tassi di crescita più elevati in Europa, dell'ordine del 3-5% annuo (Eurostat, 2014). A causa della presenza di sostanze pericolose, come metalli pesanti e ritardanti di fiamma, i RAEE sono considerati rifiuti pericolosi che, se gestiti in modo improprio, possono comportare notevoli rischi per la salute umana e per l'ambiente (Tsydenova et al., 2011). D'altra parte dato il contenuto di metalli di base e preziosi, ma anche di plastica e di vetro, che possono essere recuperati, devono essere considerati anche come una fonte importante di risorse di elevato valore (Cui et al., 2008; Tuncuk et al., 2012).

Questo lavoro si propone di ricostruire il bilancio di materia del trattamento dei RAEE raccolti in Regione Lombardia con riferimento all'anno 2011, propedeutico all'implementazione di un'analisi del ciclo di vita dell'intero sistema di gestione. Nel 2011 sono state raccolte 50.411 tonnellate di RAEE in Lombardia, pari a circa il 19,4% delle tonnellate totali raccolte in Italia, con un aumento rispetto all'anno precedente del 6% in linea con il trend nazionale (Centro di Coordinamento RAEE (CdC), 2012).

La Tab. 1 riporta la classificazione dei RAEE prevista dalla legislazione italiana (Decreto Ministeriale 25 Settembre 2007, n. 185) e la ripartizione percentuale tra le cinque

* Piazza Leonardo da Vinci 32, 20133 Milano, Italia.
Tel. 02-23996415. alida.falbo@polimi.it

Tab. 1- Classificazione dei RAEE e composizione della raccolta (in tonnellate e % in peso) in Regione Lombardia, anno 2011 (Elaborazione dati O.R.SO, 2011)

Tipologia	Categoria	Raccolta (t)*	Raccolta (%)
Freddo e clima	R1	8.837	19,06
Grandi bianchi	R2	7.282	15,70
TV e monitor	R3	20.069	43,28
Piccoli elettrodomestici	R4	9.849	21,24
Sorgenti luminose	R5	333	0,72

*Rispetto ai flussi gestiti dal CdC, O.R.SO. riporta anche i dati relativi alla gestione dei RAEE professionali, includendo solo i rifiuti gestiti dai Centri di Raccolta escludendo dunque quelli raccolti nei Luoghi di Raggruppamento e derivanti dalla pratica dell'”uno contro uno”.

categorie, o raggruppamenti (elaborazione dati O.R.SO., 2011).

Nella prima parte della ricerca, qui illustrata, sono stati raccolti dati primari in merito alle tecnologie impiantistiche in riferimento sia al trattamento primario che a quello delle componenti successivamente separate, al fine di valutare le attuali pratiche implementate in Regione Lombardia e ricostruire il bilancio di massa del sistema. Ciò che caratterizza il trattamento dei RAEE è proprio la complessità della filiera di recupero: dopo un primo impianto dove si effettua la separazione tra i costituenti principali, le diverse componenti sono inviate ad altri impianti, che possono essere quelli di recupero finale (ad es. per i rottami ferrosi) o che operano ulteriori separazioni tra i materiali e quindi inviano i nuovi flussi in uscita ad altri impianti successivi (come avviene ad es. per cavi e motori).

2. MATERIALI E METODI

L'identificazione dei principali impianti di trattamento dei RAEE presenti in Regione Lombardia è stata effettuata con riferimento alla banca dati regionale O.R.SO. (Osservatorio Rifiuti Sovraregionale). Tale banca dati riporta i quantitativi di RAEE raccolti a livello comunale e il corrispondente impianto di primo destino, classificandoli sulla base dei codici CER (Catalogo Europeo dei Rifiuti). La corrispondenza tra le categorie R e i codici CER è riportata in Tabella 2, secondo le indicazioni fornite da

ECODOM (Consorzio Italiano Recupero e Riciclaggio Elettrodomestici, 2013). E' da precisare che l'impianto di primo destino a cui viene inviato il rifiuto dopo la fase di raccolta può essere un impianto di trattamento oppure un semplice sito di stoccaggio / piattaforma, dal quale i rifiuti sono inviati ad un impianto di trattamento vero e proprio. In questo ultimo caso, l'impianto di trattamento è stato identificato per mezzo dei dati presenti nel MUD (Modello Unico Dichiarazione Ambientale) e, in mancanza di tali dati, contattando direttamente l'impianto di stoccaggio/ piattaforma.

L'analisi è stata effettuata prima a livello provinciale, individuando gli impianti che, per ogni provincia e per ciascuna categoria di R, trattano più dell'85% del rifiuto; in seguito sommando i risultati delle dodici province lombarde si è ricavata la valutazione dei flussi a livello regionale per l'anno di riferimento 2011.

Una precisazione deve essere fatta relativamente alle categorie R2 ed R4, a cui corrispondono gli stessi codici CER, come riportato in Tabella 2. La valutazione del contributo separato di ciascuna delle due categorie è stata effettuata mediante contatti diretti con gli impianti al fine di reperire informazioni di dettaglio sulla tipologia di rifiuto in ingresso agli stessi.

I risultati ottenuti dalla valutazione dei flussi a livello regionale hanno permesso di individuare gli impianti più significativi in termini di quantitativi di rifiuto trattati. Presso tali impianti sono stati organizzati una serie di sopralluoghi allo scopo di acquisire dati primari circa il

Tab. 2 – Corrispondenza tra categorie e codici CER

Categorie	CER
R1	200123*, 160211*
R2 e R4	200136, 160214, 160216
R3	200135*, 160213*, 160215*
R5	200121*

**Precious Metal Recovery*: linea di secondo trattamento destinata a ricevere i RAEE pretrattati.

Tab. 3 – Corrispondenza tra impianto e linee di trattamento RAEE

Impianto	Linee di trattamento RAEE analizzate	Altre linee di trattamento presenti
A	R1, R3 (CRT e FPD)	PMR*
B	R2	R3, R5 e stoccaggio R4
C	R4	R1, R2 e R3
D	R5	-

**Precious Metal Recovery*: linea di secondo trattamento destinata a ricevere i RAEE pretrattati.

processo produttivo, il bilancio di materia, il consumo di energia e di eventuali additivi necessari ad impostare l'analisi ambientale.

Sebbene ogni categoria di RAEE venga trattata in più impianti, per la modellizzazione del trattamento si è considerato un solo impianto di riferimento per ciascuna categoria. La scelta è ricaduta sugli impianti considerati all'avanguardia e che nel contempo trattano un quantitativo importante, se non la maggior parte, delle tonnellate di RAEE raccolte in Lombardia nel 2011. Complessivamente sono stati utilizzati i dati primari provenienti da quattro impianti di trattamento. In Tabella 3 si riportano per ciascun impianto le linee di trattamento presenti e quelle effettivamente considerate nell'analisi.

Dati primari sono stati raccolti anche in riferimento al destino delle componenti separate dai RAEE dopo il primo trattamento e ai loro successivi processi di recupero. Per le informazioni mancanti, sono stati utilizzati dati di letteratura.

3. RISULTATI

3.1. Trattamento dei RAEE

3.1.1. R1 - Freddo e clima

Il trattamento delle apparecchiature di refrigerazione (R1)

prevede una prima fase di bonifica del circuito refrigerante, dal quale è rimosso l'olio del compressore contaminato dal liquido refrigerante CFC 12, e di separazione manuale delle componenti facilmente rimuovibili quali i cavi, i compressori e parti metalliche "leggere" (griglie, ripiani, lamiere). La carcassa prosegue il suo percorso verso la fase di triturazione in due stadi in serie, seguita da un separatore magnetico per la rimozione dei metalli ferrosi. Il materiale residuo affronta una fase di separazione gravimetrica, caratterizzata da una serie di cicloni per la rimozione della schiuma poliuretanic isolante leggera dalla frazione pesante costituita da un mix di plastiche e metalli non ferrosi (Al e Cu). Il poliuretano viene quindi pelletizzato e macinato, per renderlo trasportabile ma soprattutto per rimuoverne l'agente espandente (CFC 11). A causa delle problematiche ambientali relative al rilascio dei CFC, l'agente espandente è aspirato, raccolto e inviato a termodistruzione. Successivamente i metalli non ferrosi vengono rimossi dalla plastica mediante sistemi a correnti indotte, e raccolti separatamente all'esterno dell'impianto. Il consumo complessivo di energia elettrica risulta pari a 110 kWh per tonnellata trattata.

Le frazioni recuperate dal primo trattamento degli R1 sono riportate in Fig. 1.

Il principale flusso in uscita è rappresentato dai metalli ferrosi, per un valore pari al 41,5% in peso, seguito dalla plastica, con circa il 17,6%, e dai compressori, con il 13,2%.

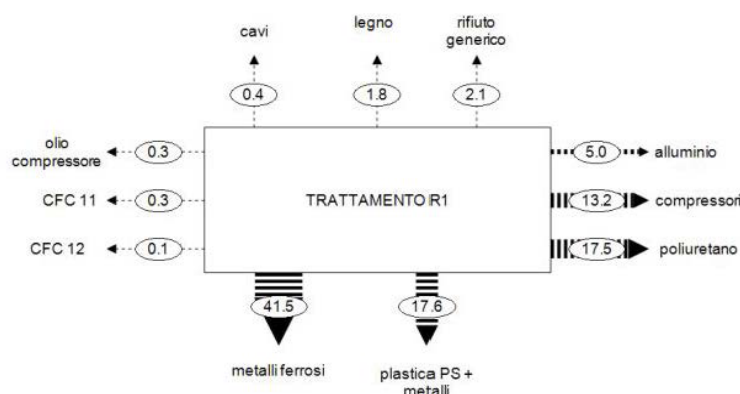


Fig. 1 – Flussi in uscita dal trattamento dei RAEE afferenti al raggruppamento R1 (valori in %).

3.1.2. R2 - Grandi bianchi

Il trattamento degli R2 (lavatrici, lavastoviglie, asciugatrici) prevede una fase di smontaggio manuale finalizzata alla rimozione di cavi, condensatori e contrappesi in cemento. La carcassa residua viene quindi inviata con dei nastri trasportatori ad un tritratore a lame, a valle del quale operatori specializzati separano diverse componenti (principalmente metalli ferrosi, metalli non ferrosi e plastiche). Per mancanza di dati, il consumo di energia elettrica si è ipotizzato uguale a quello relativo all'impianto di trattamento degli R4, ossia 66 kWh/t. Tale ipotesi è avvalorata dal fatto che il layout degli impianti che trattano le due categorie di rifiuti, R2 e R4, è molto simile, in quanto caratterizzato da fasi di separazione manuale alternate a fasi di tritrazione.

Le frazioni recuperate dal primo trattamento degli R2 sono riportate in Fig. 2.

Il flusso principale in uscita è rappresentato dai rottami ferrosi (ferro, acciaio cromo e acciaio inox), per un valore prossimo al 75% in peso; seguono il calcestruzzo e la plastica, con percentuali in peso sostanzialmente analoghe e pari a poco meno del 10%.

3.1.3. R3 - Tv e monitor

Per quanto riguarda la categoria R3 è necessario distinguere tra monitor a tubo catodico (indicati con l'acronimo CRT, cathode ray tube) e monitor a schermo piatto (FPD, flat-panel displays).

Il processo di trattamento di tv e monitor CRT, che rappresentano il 2,4% degli R3 raccolti in Regione Lombardia nell'anno considerato, è suddiviso nelle seguenti fasi:

smontaggio manuale, tritrazione di componenti in plastica e trattamento dei tubi catodici separati. Lo smontaggio manuale è rivolto a rimuovere le componenti principali, come plastica, cavi, schede elettroniche, frazioni metalliche, cannoni ad elettroni e gioghi di deflessione, al fine di avviarle a recupero. Gli involucri di plastica sono successivamente frantumati e inviati ad impianti specifici di trattamento e recupero. I tubi catodici sono trattati in una sezione dedicata dell'impianto, in cui avviene la separazione tra il vetro cono e il vetro pannello attraverso una macchina "rompi con". Le due tipologie di vetro vengono poi avviate separatamente a tritrazione. In particolare, il vetro pannello è tritratato e deferrizzato per poi essere avviato ad un trattamento meccanico di finissaggio per la rimozione delle polveri fluorescenti.

Il consumo di energia elettrica dell'impianto di trattamento dei CRT è pari a 30 kWh/t.

Il flusso principale in uscita dall'impianto di trattamento dei CRT (Fig. 3) è rappresentato dal vetro (vetro cono e vetro pannello), per un totale pari al 52% in peso. Rilevanti risultano anche i flussi uscenti di plastica ABS (acrilonitrile butadiene stirene), ferro e schede elettroniche, per un totale del 35%.

I monitor FPD rappresentano ancora una minima parte (circa il 2,4%) degli R3 raccolti in Regione Lombardia nell'anno considerato, anche se destinata a crescere sensibilmente in futuro. Il processo di trattamento è costituito dalle seguenti due fasi: smontaggio manuale e tritrazione delle componenti in plastica. Come per i monitor CRT, lo smontaggio manuale è effettuato allo scopo di rimuovere le componenti recuperabili, quali foglio di vetro, cavi, schede elettroniche, frazioni metalliche, lampade fluorescenti, pannello LCD, ecc. Il foglio di vetro separato viene successivamente tritratato.

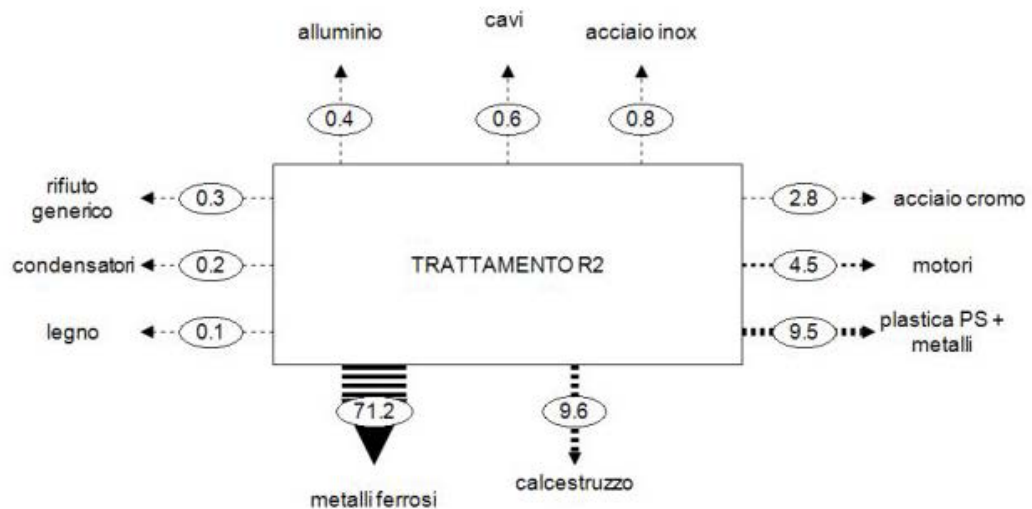


Fig. 2 – Flussi in uscita dal trattamento dei RAEE afferenti al raggruppamento R2 (valori in %).

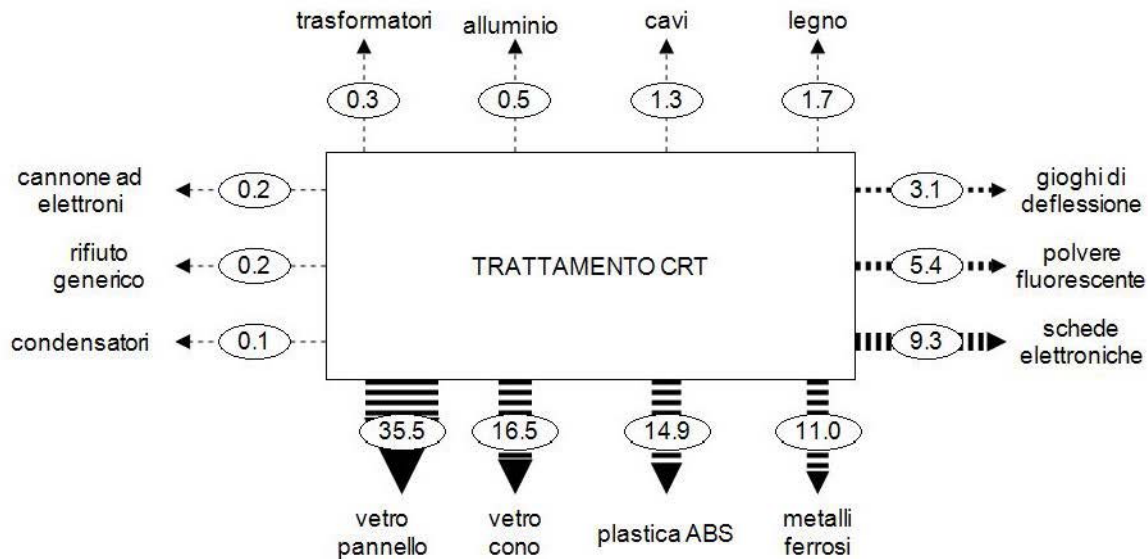


Fig. 3 – Flussi in uscita dal trattamento dei monitor a tubo catodico (CRT); valori in %.

I consumi elettrici sono stati stimati a partire da quelli dell'impianto dei CRT, considerando che il trattamento degli FPD avviene per lo più manualmente e che le uniche fasi meccaniche sono la triturazione delle plastiche e del foglio di vetro. Si ipotizza quindi un consumo di 26,5 kWh per tonnellata di FPD trattata.

Il flusso principale in uscita dall'impianto di trattamento dei FPD (Fig. 4) è rappresentato dal ferro per un totale del 38,4% in peso. Come per l'impianto dei CRT, anche per quello dei FPD un flusso importante è costituito dalla plastica ABS (20,7%). Apprezzabili sono pure i flussi di alluminio (10,2%) e di schede elettroniche (8,3%).

3.1.4. R4 - Piccoli elettrodomestici

Il processo di trattamento dei piccoli elettrodomestici può essere suddiviso nelle seguenti fasi: selezione manuale, triturazione seguita dalla cernita manuale e triturazione seguita da separazione automatica. La prima selezione manuale viene eseguita allo scopo di rimuovere le componenti pericolose (toner, cartucce, batterie, ecc.), che richiedono un trattamento adeguato, e quelle preziose (cavi, schede elettroniche, motori, metalli ecc.), da avviare a recupero. Il materiale residuo è sottoposto ad una serie di fasi di triturazione seguite da fasi di cernita manuale, volte

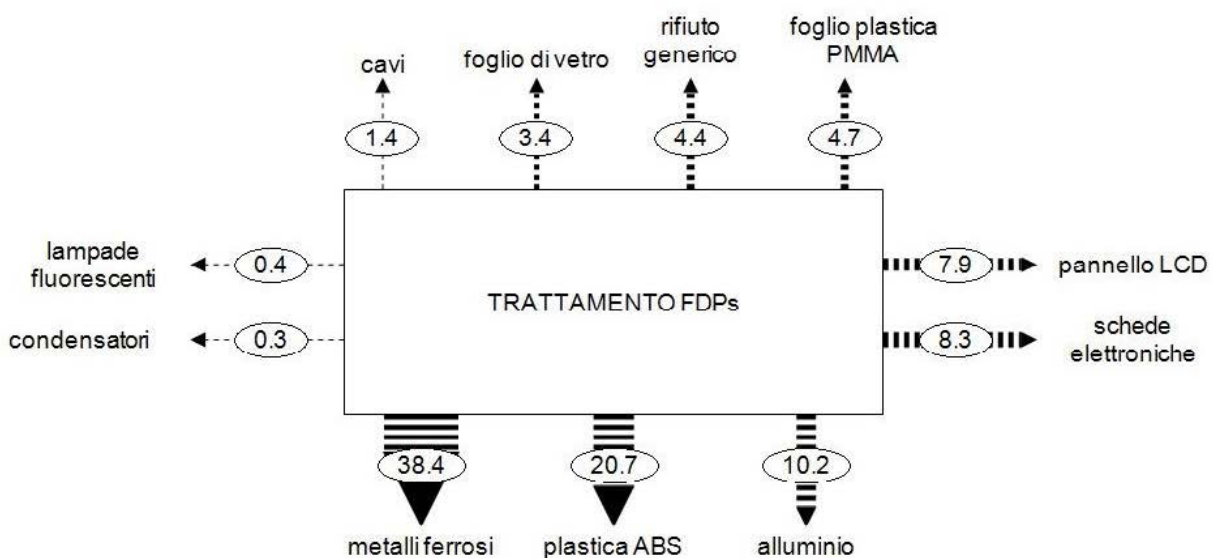


Fig. 4 – Flussi in uscita dal trattamento monitor a schermo piatto (FPD); valori in %.

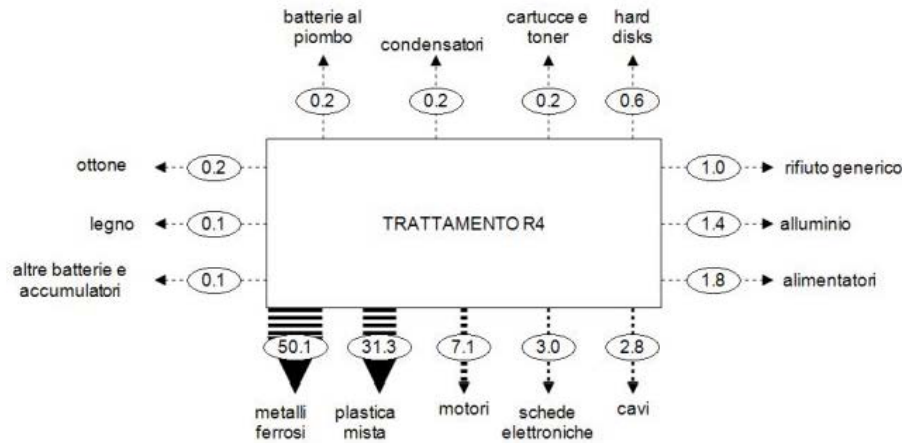


Fig. 5 – Flussi in uscita dal trattamento dei RAEE afferenti al raggruppamento R4 (valori in %).

a rimuovere le stesse componenti sopra elencate, ma di dimensioni più piccole. Infine, il flusso rimanente viene tritato in piccoli pezzi (circa 4 cm) e sottoposto ad una fase di separazione magnetica (per il recupero di metalli ferrosi) seguita da una di separazione amagnetica a correnti indotte per il recupero di metalli non ferrosi, principalmente alluminio e rame. Il consumo complessivo di energia elettrica dell'impianto di trattamento degli R4 è pari a 66 kWh/t.

Le frazioni recuperate dal primo trattamento degli R4 sono riportate in Fig. 5.

Il flusso principale in uscita è rappresentato dal ferro per un valore pari al 50,1%, seguito dal 31,3% di plastica. Come per gli R3 (sia CRT che FPD), le schede elettroniche rappresentano un flusso in uscita relativamente importante.

3.1.5. R5 - Sorgenti luminose

Il trattamento degli R5 prevede una triturazione grossolana delle lampade, seguita da un'operazione di vagliatura per la separazione della frazione metallica (ferrosa e non ferrosa) da quella non metallica (vetro). Entrambi i flussi separati vengono inviati ad un trituttore secondario per la riduzione granulometrica dei materiali. La frazione metallica separata e tritata arriva quindi ad un separatore amagnetico, che permette la separazione dell'alluminio. L'intero processo avviene al chiuso, con aspirazione delle polveri generate dai trituttori. Il consumo di energia elettrica dell'impianto è pari a 96 kWh/t.

Le frazioni recuperate dal trattamento primario degli R5 sono riportate in Fig. 6. Il vetro rappresenta il flusso predominante in uscita, pari all'80%, seguito dalla polvere fosforica contenente mercurio.

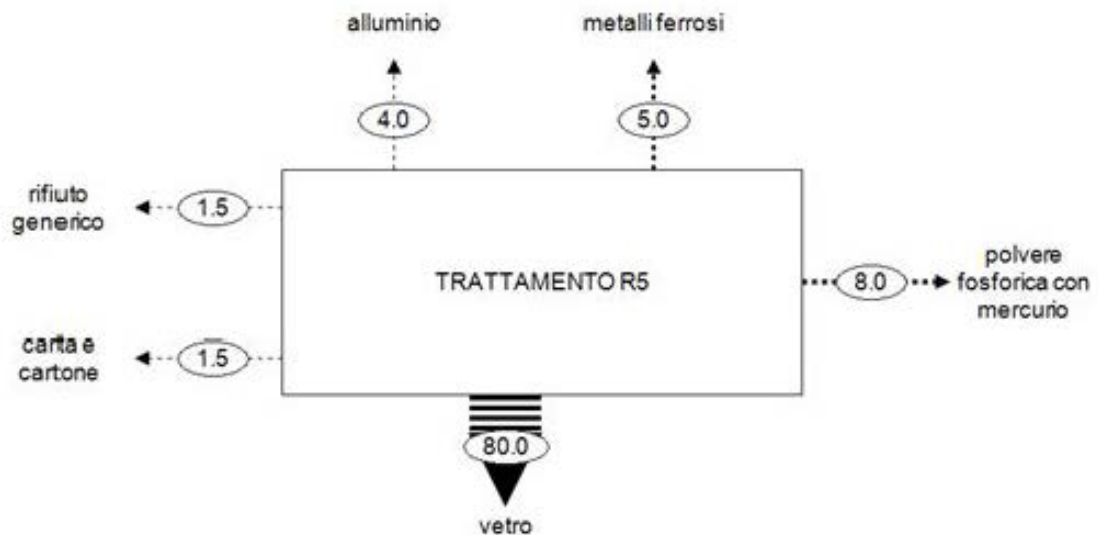


Fig. 6 – Flussi in uscita dal trattamento dei RAEE afferenti al raggruppamento R5 (valori in %).

3.2. *Trattamento delle componenti separate dai RAEE*

I materiali e le componenti separati durante il trattamento preliminare dei RAEE vengono inviati ad ulteriori impianti che possono essere quelli finali di recupero o smaltimento, oppure un ulteriore impianto di separazione. In quest'ultimo caso i flussi in uscita costituiranno i flussi di ingresso di altrettanti impianti di recupero e/o smaltimento.

Il destino delle componenti separate e i materiali e/o energia ottenuti dal loro trattamento sono sintetizzati in Tab. 4. Alcuni processi non sono inclusi nell'analisi, per mancanza di dati utili alla loro descrizione. E' da sottolineare che non tutte le componenti separate dai RAEE vengono inviate in impianti situati in Italia, ad esempio le schede elettroniche, le batterie al litio e quelle al NiMH, dopo essere state separate vengono inviate all'estero in impianti di trattamento dedicati.

3.3. *Bilancio di materia*

La Tab. 5 riassume le quantità di materiali secondari recuperati dal trattamento di 1 t di ciascuna categoria di RAEE, nonché l'energia recuperata dal processo di incenerimento di quelle componenti avviate a termodistruzione (quali, ad esempio, plastiche miste, toner, cartucce e condensatori). Per gli R3, i quantitativi di materia e/o energia ottenuti fanno riferimento ad 1 tonnellata di ciascuna tipologia specifica, quindi 1 t di CRT e 1 t di FPD.

Risulta evidente come il materiale recuperato in maggior quantità sia costituito dall'acciaio per quanto riguarda il trattamento degli R1, R2, FPD e R4, e dal vetro per quanto riguarda i CRT e gli R5. Un recupero di materia importante è anche quello della plastica ABS derivante dal trattamento degli R3, sia CRT che FPD, e della plastica PS derivante dal trattamento degli R1 e degli R2. Oltre all'acciaio e alla plastica ABS, risultano apprezzabili i quantitativi di alluminio recuperati dal trattamento degli FPD. Il recupero energetico più elevato si ottiene dal trattamento delle componenti separate dagli R4 (675 kWh di energia elettrica e 1504 MJ di energia termica per tonnellata di materiale trattato), a seguito dell'invio delle plastiche miste ad impianti di incenerimento di rifiuti.

Particolarmente interessante risulta il recupero, anche se in percentuali in peso irrisorie rispetto agli altri materiali, di metalli preziosi quali oro argento e palladio, derivanti dal trattamento delle schede elettroniche presenti nei RAEE (R2, R3 e R4).

La Tab. 6 riporta infine i quantitativi di materiali secondari ed energia recuperati in riferimento all'intera produzione regionale all'anno 2011.

4. *DISCUSSIONE*

I dati raccolti hanno permesso di valutare le attuali pratiche di recupero dei RAEE in Regione Lombardia, con riferimento sia agli impianti di primo destino che ai trattamenti successivi, e di compilare un bilancio di materia. Si è constatato che il primo trattamento di questa tipologia di rifiuti è costituito principalmente dalle seguenti operazioni: smontaggio, lavorazioni meccaniche (triturazione), cernita manuale e separazione automatica attraverso processi fisici (separatori magnetici e a correnti parassite). Le frazioni metalliche separate dopo il primo trattamento (principalmente alluminio e ferro) sono classificate come materie prime secondarie e inviate direttamente a fonderie per il recupero finale. Gli altri componenti di valore, ad esempio le schede elettroniche, i cavi e le batterie, subiscono un ulteriore trattamento per il recupero di svariati materiali quali oro, argento, palladio, rame, piombo ecc.

Le componenti pericolose quali toner, cartucce, condensatori sono principalmente inceneriti con recupero di energia, perché non risultano ad oggi disponibili processi di riciclaggio; la polvere fluorescente e quella fosforica contenente mercurio, derivanti rispettivamente dal trattamento dei CRT e degli R5, vengono smaltite in discariche per rifiuti pericolosi.

Il vetro è la componente più significativa in uscita dal trattamento degli R3 e degli R5, dato che rappresenta rispettivamente il 52% in peso dei CRT e l'80% in peso delle lampade fluorescenti. A differenza del vetro cono che, a causa della presenza di piombo viene inviato in discarica, il vetro pannello e il vetro derivante dagli R5 costituiscono già in uscita dal primo impianto di trattamento materia prima secondaria, in quanto possono essere riutilizzati direttamente nell'industria ceramica.

La plastica costituisce un'altra frazione significativa derivante sia dal primo trattamento dei RAEE (ABS e plastica mista) che dal trattamento delle componenti separate (PS). La plastica ABS e quella PS vengono avviate a riciclo per ottenere materia prima secondaria, mentre le plastiche miste sono avviate ad incenerimento con recupero energetico. Una precisazione va fatta per quanto riguarda la descrizione dei processi di riciclo delle plastiche ABS e PS. In mancanza di dati, tali processi sono stati assimilati al processo di riciclo del PET. Nonostante sia possibile che i consumi elettrici dei processi non differiscano molto l'uno dall'altro, essendo i processi di riciclo delle plastiche generalmente basati su una fase di triturazione e una di estrusione, le efficienze di riciclo potrebbero invece risultare molto differenti. Si rende quindi necessario un ulteriore approfondimento sul recupero di queste due tipologie di plastiche, finalizzato a individuare i dati primari circa i consumi e le efficienze di riciclo. Come riportato nella Tab. 4, inoltre, alcuni processi non sono stati inclusi a causa della mancanza di dati.

Infine, considerando l'attuale situazione del mercato, ci si

Tab. 4 – Destino e materiali ed energia ottenuti dal trattamento delle componenti separate dai RAEE

Componente	Trattamento	Materiale/ Energia ottenuti
Acciaio cromo	Recupero di materia in fonderia	Acciaio cromo secondario
Acciaio e metalli ferrosi	Recupero di materia in fonderia	Acciaio liquido secondario
Acciaio inox	Recupero di materia in fonderia	Acciaio liquido secondario
Alluminio	Recupero di materia in fonderia	Lingotti di alluminio secondario
Altre batterie ed accumulatori (45% batterie al litio e 55% batterie al NiMH)	Batterie al litio avviate a trattamenti meccanici	Plastica avviata a recupero energetico; metalli ferrosi e non ferrosi avviati a recupero di materia in fonderia; polvere di manganese e di cobalto avviati a recupero di materia
	Batterie al NiMH avviate a processo pirometallurgico	Plastica avviata a recupero energetico il recupero dei residui di Ni-Co-Fe non è stato incluso per mancanza di dati
Batterie al piombo	Triturazione e rifusione dell'acido di piombo in forno	Piombo secondario
Calcestruzzo	Triturazione e recupero di materia	Materiale inerte
Carta/cartone	Smaltimento in discarica sanitaria ^a	-
Cartucce e toner	Smaltimento in impianti di incenerimento per rifiuti non pericolosi	Elettricità e calore
Cavi	Triturazione e separazione dei materiali	Rottame di rame da inviare a recupero di materia in fonderia e plastica da inviare a recupero di energia in inceneritori
CFC 11	Smaltimento in impianti di incenerimento per rifiuti non pericolosi	-
CFC 12	Smaltimento in impianti di incenerimento per rifiuti non pericolosi	-
Compressori	Triturazione e separazione dei materiali	Rottame in ferro da inviare a recupero di materia in fonderia; rottame in rame da inviare a recupero di materia in fonderia; rottame in alluminio da inviare a recupero di materia in fonderia
Condensatori	Smaltimento in impianti di incenerimento per rifiuti pericolosi	Elettricità e calore
Gioghi di deflessione; trasformatori; cannoni ad elettroni; alimentatori, hard disk	Triturazione e separazione dei materiali	Non sono stati inclusi per mancanza di dati
Lampade fluorescenti ^b	Processo di smontaggio a secco (processo descritto per gli R5)	Acciaio e alluminio avviati a recupero di materiale in fonderia; vetro avviato a recupero in industria ceramica; polvere fosforica contenente mercurio avviata a smaltimento in discarica per rifiuti pericolosi
Legno	Selezione e recupero di materia	Pannello truciolare (particelle di legno secondario)

Tab. 4 (segue) – Destino e materiali ed energia ottenuti dal trattamento delle componenti separate dai RAEE

Componente	Trattamento	Materiale/ Energia ottenuti
Motori	Triturazione e separazione dei materiali	Plastica da inviare a recupero di energia in inceneritori; rottame di rame da inviare a recupero di materia in fonderia; rottami di alluminio e ferro da inviare a recupero di materia in fonderia; schede elettroniche contenenti metalli preziosi da inviare al processo Boliden ^c
Olio	Non incluso per mancanza di dati	Non incluso per mancanza di dati
Ottone	Non incluso per mancanza di dati	Non incluso per mancanza di dati
Plastica ABS (Acrylonitrile butadiene styrene)	Riciclo di materia ^d	ABS secondaria
Plastica mista	Recupero di energia	Elettricità e calore
Plastica PS + metalli	Selezione di materiali	Plastica PS (polistirene) da inviare a recupero di materia ^d ; scarti in plastica (plasmix) da utilizzare come combustibile in cementificio; alluminio da inviare a recupero di materia in fonderia; rame da inviare a recupero di materia in fonderia
Plastica PMMA (Poly methyl methacrylate)	Riciclo di materia	MMA secondaria
Polvere fluorescente	Smaltimento in discarica per rifiuti pericolosi	-
Polvere fosforica contenente mercurio	Smaltimento in discarica per rifiuti pericolosi	-
Poliuretano	Smaltimento in discarica sanitaria ^a	-
Rifiuto generico	Smaltimento in discarica per rifiuti inerti	-
Schede elettroniche	Recupero di materia: processo Boliden ^c	Rame secondario; nickel secondario; piombo secondario; metalli preziosi secondari (oro, argento e palladio)
Vetro cono	Smaltimento in discarica per rifiuti pericolosi	-
Vetro pannello e foglio di vetro	Recupero nell'industria ceramica	-

^a Discarica “sanitaria”: discarica per rifiuti biogenici o municipali non trattati, ossia che contengono materiale organico reattivo (ecoinvent)

^b Lampade fluorescenti separate dagli FPD. Una volta separate, vengono avviate a trattamento negli impianti dedicati agli R5

^c Il processo Boliden è caratterizzato da una fase di pretrattamento meccanico (triturazione e separazione dei materiali) seguita da una fase di trattamento metallurgico (“Kaldo plant” e “Converter Aisle”) e fasi di raffinazione elettrolitica e catalitica.

^d Descritto come riciclo del PET

deve attendere per il futuro un sensibile aumento dei monitor a schermo piatto (FPD) a discapito di quelli a tubo catodico (CRT) all'interno della categoria R3 (Habuer et al., 2014), con le conseguenti variazioni da attendersi in

termini di materiali recuperabili sulla base anche dello sviluppo di nuovi processi di trattamento e di recupero (Fontana et al., 2014).

Tab. 5 – Materie prime secondarie ed energia* ottenute dal recupero di 1 t di R1, 1 t di R2, 1 t di CRT, 1 t di FPD e 1 t di R5

Materie prime ed energia	U.M.	Trattamento R1	Trattamento R2	Trattamento CRT	Trattamento FPD	Trattamento R4	Trattamento R5
ABS	kg	-		112,5	156	-	-
Acciaio	kg	471,43	664,98	97	384,2	490	44,05
Acciaio cromo		-	24,76*	-	-	-	-
Alluminio	kg	45,79	6,86	4	102,2	15	33,4
Argento	kg	-	0,004	0,53	0,48	0,18	-
Calcestruzzo (triturato)		-	96	-	-	-	-
Nickel	kg	-	0,022	3	2,8	1	-
Oro	kg	-	0,00011	0,02	0,02	0,005	-
Palladio	kg	-	0,00022	0,03	0,03	0,01	-
Pannello truciolare	m ³	0,016	0,0008	0,015	-	0,0009	-
Piombo	kg	-	0,011	1,5	1,3	1,7	-
Plasmix	kg	51,04	27,55	-	-	-	-
PMMA	kg	-	-	-	47	-	-
Polvere di Cobalto	kg	-	-	-	-	0,1	-
Polvere di manganese	kg	-	-	-	-	0,005	-
PS		90,36	48,77	-	-	-	-
Rame	kg	11,54	8,56	30	27	29	-
Vetro	kg	-	-	355	37,2	-	800
Energia elettrica	kWh	2,08	14,61	11,4	21,5	675	-
Energia termica	MJ	4,67	15,9	16,4	20,2	1504	-

*Si tratta dell'energia recuperata dal processo di incenerimento delle componenti dei RAEE avviate a termodistruzione. Non sono stati sottratti i consumi energetici degli impianti di trattamento dei RAEE.

5. CONCLUSIONI

Grazie alle informazioni e ai dati primari reperiti direttamente presso gli impianti di trattamento dei RAEE, è stato ricostruito il bilancio di materia della gestione di questa variegata categoria di rifiuti, che permette di recuperare numerosi prodotti, nonché di produrre energia termica e energia elettrica. L'analisi del sistema implementato in Regione Lombardia ha mostrato una elevata complessità della filiera, con molti impianti coinvolti per il trattamento delle numerose componenti che vengono separate. In

quest'ottica, la progettazione delle apparecchiature elettriche ed elettroniche maggiormente orientata alla gestione del fine vita (ad esempio rendendo più semplice il disassemblaggio), potrebbe portare a ridurre tale complessità e quindi a facilitare il recupero di materie prime di elevato valore.

Tab. 6 – Materie prime ed energia* ottenute dal recupero dei RAEE raccolti e trattati in Regione Lombardia nel 2011 (suddivisi per categoria di RAEE).

Materie prime ed energia	U.M.	Trattamento R1	Trattamento R2	Trattamento CRT	Trattamento FPD	Trattamento R4	Trattamento R5
ABS	kg	-	0	2.203.534	75.137	-	-
Acciaio	kg	4.165.972	4.842.473	1.899.936	185.047	4.825.955	14.681
Acciaio cromo	kg	-	180.306	-	-	-	-
Alluminio	kg	404.641	49955	78.348	49.224	147.733	11.131
Argento	kg	-	29	103.818	231	1773	-
Calces-truzzo (triturato)	kg	-	699.085	-	-	-	-
Nickel	kg	-	160	58.761	1.349	9.849	-
Oro	kg	-	0,8	392	9,6	49	-
Palladio	kg	-	1,6	588	14,	98	-
Pannello truciolare	m ³	141	5,8	293.804	-	8.864	-
Piombo	kg	-	80	29.380	626	16.743	-
Plasmix	kg	-	200.623	-	-	-	-
PMMA	kg	-	-	-	22.637,	-	-
Polvere di Cobalto	kg	-	-	-	-	985	-
Polvere di manganese	kg	-	-	-	-	49	-
PS	kg	798.501	355.150	-	-	-	-
Rame	kg	101.978	62.335	587.609	13.004	285.618	-
Vetro	kg	-	-	6.953.373	17.917	-	266.622
Energia elettrica	kWh	18.381	106.392	223.291	10.355	6.647.999	-
Energia termica	MJ	41.268	115.786	321.226	9.729	14.812.728	-

*Si tratta dell'energia recuperata dal processo di incenerimento delle componenti dei RAEE avviate a termodistruzione. Non sono stati sottratti i consumi energetici degli impianti di trattamento dei RAEE.

6. RIFERIMENTI BIBLIOGRAFICI

- Centro di Coordinamento RAEE (2012). Dossier sulla gestione dei rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche in Lombardia anno 2011.
- Cui J, Zhang L (2008) Metallurgical recovery of metals from electronic waste: A review. *Journal of Hazardous Materials* 158: 228–256.
- Consorzio Italiano Recupero e Riciclaggio Elettrodomestici (2013). I RAEE domestici generati in Italia.
- Eurostat http://epp.eurostat.ec.europa.eu/portal/page/portal/waste/key_waste_streams/waste_electrical_electronic_equipment_weee, ultimo accesso 12/05/2014
- Falbo A, Biganzoli L, Forte F, Rigamonti L, Grosso M (2015) Il sistema di gestione dei RAEE in Lombardia. PARTE II – Valutazione del ciclo di vita. In corso di pubblicazione su *Ingegneria dell'Ambiente*
- Fontana D, Forte F, De Carolis R, Grosso M (2014) Indium recovery from waste liquid crystal display. *Atti del SUM2014, Symposium on Urban Mining 19-21 Maggio, Bergamo.*
- Hauber, Nakatani J, Moriguchi (2014) Time-series product and substance flow analyses of end-of-life electrical and electronic equipment in China. *Waste Management* 34: 489-497.
- Tsydenova O, Bengtsson M (2011) Chemical hazards associated with treatment of waste electrical and electronic equipment. *Waste Management* 31: 45-58.
- Tuncuk A, Stazi V, Akci A, Yazici E Y, Deveci H (2012) Aqueous metal recovery techniques from e-scrap: Hydrometallurgy in recycling. *Minerals Engineering* 25: 28-37.

RINGRAZIAMENTI

Questo lavoro è stato finanziato da Finlombarda per conto di Regione Lombardia.

Si ringraziano tutti i gestori degli impianti di trattamento RAEE che hanno fornito dati primari.