

Introduzione

Identificare e stimare i quantitativi delle materie prime critiche (CRM) ricavabili dalla gestione dei RAEE è un procedimento complesso ed implica necessariamente un certo grado di approssimazione. L'intrinseca eterogeneità dei prodotti che rientrano nella definizione di AEE, le differenti tecnologie di trattamento e la tesaurizzazione dei RAEE (il fenomeno per cui i consumatori accumulano vecchi dispositivi, come smartphone e piccoli elettrodomestici invece di smaltirli) possono determinare variazioni marcate per tipologia e quantità di CRM ricavabili. Inoltre, le AEE, a causa della rapida evoluzione tecnologica, variano significativamente nelle proprie componenti in base all'anno di produzione; tale variabilità è ugualmente determinata dalla fascia di mercato e di prezzo delle AEE. Bisogna, infine, tener presente che l'eventuale presenza di CRM all'interno dei RAEE non implica automaticamente la possibilità di ricavare sempre e comunque, dette CRM in maniera economicamente e tecnologicamente sostenibile.

Procedura adottata

Ai fini di uno studio rivolto all'individuazione dei contenuti potenziali di CRM presenti nei RAEE risulta, pertanto, basilare considerare le sei diverse categorie in cui sono divise le AEE, categorie che vengono utilizzate per la rendicontazione annuale alla Commissione Europea sulla gestione dei RAEE (come stabilito dall'art.31 del D.lgs. 14 marzo 2014 n 49 attuazione della Direttiva 2012/19/UE, secondo la decisione di esecuzione della Commissione 2019/2193):

1. Apparecchiature per lo scambio di temperatura;
2. Schermi, monitor ed apparecchiature dotate di schermi di superficie superiore a 100 cm²;
3. Lampade;
4. Apparecchiature di grandi dimensioni (con almeno una dimensione esterna superiore a 50 cm);
 - 4a. Apparecchiature di grandi dimensioni ad esclusione dei pannelli fotovoltaici;
 - 4b. Pannelli fotovoltaici;
5. Apparecchiature di piccole dimensioni (con nessuna dimensione esterna superiore a 50 cm);
6. Apparecchiature informatiche e per le telecomunicazioni di piccole dimensioni (con nessuna dimensione esterna superiore a 50 cm).

Per alcune categorie di AEE (quali la 1, 2, 3 e 4) è mediamente più facile elaborare ipotesi sulla tipologia e la quantità potenziale di CRM presenti, stante anche la così detta "*lifespan*" media di

queste categorie di AEE; diversamente nelle categorie più variegate e complesse (quali la 5 e la 6) le ipotesi su tipologia e quantità di CRM presenti sono generalmente più approssimate e variabili.

Stante le precedenti considerazioni, si riporta di seguito un possibile approccio metodologico semplificato per la stima potenziale delle CRM presenti nei RAEE.

I dati utilizzati per tale approccio originano dalle dichiarazioni MUD¹, analizzate annualmente da ISPRA ai fini della Comunicazione alla Commissione Europea relativa alla direttiva 2012/19/CE per la trasmissione dei dati sui RAEE. Tali dichiarazioni consentono di ottenere il quantitativo recuperato per ognuna delle categorie di RAEE a scala nazionale (**Tabella 1**) e regionale. Il dato regionale utilizzato per il presente studio è fornito in apposito file Excel (Allegato 1).

Tabella 1. Quantitativo di RAEE gestito a livello nazionale distinto per categoria nell'anno 2023.

Categoria RAEE	Gestione totale (t/anno)
1	130.945
2	85.488
3	9.018
4a	124.904
4b	39.380
5	122.955
6	21.927
Totale nazionale	534.616

Utilizzando sempre come dato le dichiarazioni MUD, si ottiene l'elenco degli impianti di trattamento e di stoccaggio dei RAEE che hanno presentato la dichiarazione nell'anno di riferimento 2023. Al fine di questo studio, sono stati presi in considerazione solo gli impianti di trattamento che operano l'effettivo recupero dei RAEE, escludendo gli impianti di stoccaggio. I suddetti impianti sono riportati in un apposito file Excel (Allegato 2), dove sono divisi in classi in base al quantitativo gestito (0 – 1.000 t/anno, 1.000 – 10.000 t/anno, 10.000 – 30.000 t/anno, > 30.000 t/anno). Per ogni impianto sono, inoltre, indicate le specifiche categorie di RAEE che sono state gestite nell'anno di riferimento.

¹ Il Modello Unico di Dichiarazione ambientale (MUD), istituito con la Legge n. 70/1994, è un modello attraverso il quale devono essere rendicontati i rifiuti prodotti, raccolti, trasportati, avviati al recupero o smaltiti, nell'anno precedente la dichiarazione dalle attività economiche.

Per ogni categoria di RAEE è possibile ipotizzare attraverso studi di letteratura specifica e di settore, le CRM presenti. Per ogni CRM dall'analisi bibliografica è possibile ricavare un range di contenuto minimo e massimo per unità di massa della specifica categoria di RAEE.

Tale approccio consente a scala regionale, di effettuare, per ognuna delle sei categorie di RAEE, una stima preliminare delle CRM di interesse espresse come specifici elementi della tavola periodica, o come gruppi di essi (ad esempio metalli totali, metalli preziosi ecc.). L'approccio metodologico descritto può essere espresso mediante l'equazione (1) di seguito riportata:

$$Q_e = \sum_{i=1}^6 Q_{RAEE}^i \times C_e^i \quad (1)$$

dove:

- Q_e = quantità stimata di elemento e (kg/anno o g/anno);
- Q_{RAEE}^i = quantità annua di RAEE gestiti (t/anno), associato alla categoria di RAEE i ;
- C_e^i = coefficiente di contenuto dell'elemento e , espresso per unità di massa di RAEE (kg/t o g/t), specifico per la categoria di RAEE i .

I quantitativi potenziali così stimati di CRM sono ovviamente soggetti a variazioni essendo legati a dichiarazioni da parte dei gestori su singola annualità. Analogamente, anche le categorie di RAEE indicate nel database come gestite nei singoli impianti, possono variare per molteplici fattori, tra i quali introduzione/eliminazione di incentivi per la sostituzione di specifiche AEE, evoluzioni tecnologiche, dinamiche di mercato.

Per questo studio si sono prese in considerazioni i seguenti gruppi (**Tabella 2**): metalli totali, metalli preziosi e terre rare. Sebbene non rientrino nell'elenco delle CRM, sono state, inoltre, considerate le plastiche in quanto frazione significativa in termini quantitativi nei RAEE.

Tabella 2. Gruppi considerati

Gruppo	Elementi contenuti	Riferimenti
Metalli totali	ferro; rame; alluminio	(European Commission, 2015)
Metalli preziosi	argento; oro; palladio	(European Commission, 2015)
Terre Rare	contenute in: fosfori; magneti; batterie	(Binnemans et al., 2013; Dhawan and Tanvar, 2022; Yang et al., 2017a)

Gruppo	Elementi contenuti	Riferimenti
Plastiche	frazione plastica complessiva	(European Commission, 2015)

Per ciascuna categoria di RAEE sono stati applicati coefficienti di contenuto specifici, derivanti da fonti europee e da letteratura tecnica di riferimento, coerentemente con la classificazione EU6 adottata per i dati di gestione.

Metalli totali

Per ottenere una **stima indicativa** del contenuto di metalli totali nei RAEE, si è fatto riferimento al report della Commissione Europea (European Commission, 2015), in particolare alla sezione 2.6 “Considerations on consequences and impacts of setting new recovery targets”, che fornisce coefficienti di contenuto dei materiali per le diverse categorie di RAEE secondo la classificazione EU6. Il gruppo “metalli totali” è stato analizzato considerando i seguenti **sottogruppi: ferro (Fe), rame (Cu) e alluminio (Al)**. I coefficienti associati a tali metalli sono stati applicati ai quantitativi di RAEE gestiti per ciascuna categoria al fine di stimare i quantitativi potenziali di metalli associati ai flussi trattati (**Tabella 3**).

Tabella 3. Sottogruppo dei Metalli totali

Elemento	Coefficienti di contenuto	Unità di misura	Riferimenti
Ferro (Fe)	Cat 1: 57,7 Cat 2: 25,8 Cat 4a: 53,6 Cat 4b: 53,6 Cat 5: 46 Cat 6: 3,9	% in peso	(European Commission, 2015)
Alluminio (Al)	Cat 1: 2,7 Cat 2: 2,8 Cat 3: 12,5 Cat 4a: 7,8 Cat 4b: 7,8 Cat 5: 4,3	% in peso	(European Commission, 2015)

Elemento	Coefficienti di contenuto	Unità di misura	Riferimenti
Rame (Cu)	Cat 1: 5,2 Cat 2: 3 Cat 4a: 2 Cat 4b: 2 Cat 5: 8,8 Cat 6: 45,4	% in peso	(European Commission, 2015)

Metalli preziosi

Nei RAEE, i metalli preziosi risultano concentrati principalmente nelle Printed Circuit Boards (PCB), ossia nelle schede elettroniche (Cayumil et al., 2016; Lu and Xu, 2016), pur potendo essere presenti anche in altri componenti elettrici/elettronici quali contatti, connettori e saldature (Szałatkiewicz, 2014). Tale evidenza è coerente anche con le indicazioni riportate nell'ambito del progetto FutuRaM, che evidenzia come diversi metalli critici e preziosi risultino concentrati principalmente in specifici componenti dell'elettronica, determinando una forte dipendenza dei contenuti complessivi dalla composizione del flusso RAEE considerato (Iattoni, 2025). La diversa incidenza delle componenti elettroniche nelle apparecchiature determina una variabilità del contenuto di metalli preziosi tra le categorie di RAEE. In particolare, le categorie 2 (schermi), 4b (apparecchiature fotovoltaiche), 5 (piccoli apparecchi) e 6 (apparecchiature informatiche e di telecomunicazione), caratterizzate da una maggiore integrazione elettronica, risultano più rilevanti per la presenza di argento (Ag), oro (Au) e palladio (Pd). Questi metalli rivestono un ruolo particolarmente rilevante sia per il valore economico associato ai RAEE, sia per la definizione di strategie di recupero mirate a massimizzare l'efficienza dei processi di riciclo, in particolare nelle fasi di pretrattamento e raffinazione. La letteratura evidenzia infatti come Ag, Au e Pd rappresentino i principali metalli preziosi di interesse nei RAEE, in ragione della loro concentrazione nelle componenti elettroniche e del loro elevato valore di mercato (Chancerel et al., 2009). Per questo motivo, la stima dei metalli preziosi, come riportato in **Tabella 4**, è stata effettuata applicando coefficienti di contenuto specifici per ciascuna categoria di RAEE, definiti sulla base delle indicazioni riportate nel report della Commissione Europea in merito alla composizione dei materiali (European Commission, 2015).

Tabella 4. Coefficienti adottati per il gruppo: Metalli preziosi

Elemento	Coefficienti di contenuto	Unità di misura	Riferimenti
Argento (Ag)	Cat 2: 0,005024 Cat 4a: 0,005986 Cat 4b: 0,005986 Cat 5: 0,001629 Cat 6: 0,009017	% in peso	(European Commission, 2015)
Oro (Au)	Cat 2: 0,00215 Cat 4a: 0,000003 Cat 4b: 0,000003 Cat 5: 0,000368 Cat 6: 0,002539	% in peso	(European Commission, 2015)
Palladio (Pd)	Cat 2: 0,000968 Cat 5: 0,000102 Cat 6: 0,000678	% in peso	(European Commission, 2015)

Terre rare

Le Terre Rare (REE) rappresentano una componente minoritaria, ma rilevante nei RAEE, in quanto associate a materiali e componenti ad alto valore tecnologico (Balaram, 2019). La loro presenza nei flussi RAEE non è omogenea, ma risulta fortemente concentrata in specifiche tipologie di componenti. In particolare, esse sono legate soprattutto ai magneti permanenti a base di Neodimio–Ferro–Boro (NdFeB), impiegati in hard disk, motori elettrici, ventole e altoparlanti, e ai fosfori delle lampade fluorescenti (Schaeffer et al., 2018). Studi sperimentali evidenziano, ad esempio, che una parte di questi elementi può risultare presente nelle **frazioni fini/residuali** generate dai processi di pretrattamento meccanico (Ueberschaar et al., 2017). A supporto di tale eterogeneità, Puype et al. riportano la presenza di diverse Terre Rare (ad esempio Ce, Dy, La, Nd, Pr, Y) in materiali polimerici contaminati da flussi di RAEE, indicando che questi elementi possono comparire anche in matrici non metalliche in quantità ridotte (Puype et al., 2015). In letteratura sono inoltre disponibili dati riferiti a componenti selezionate, come le **schede elettroniche (PCB)**, che possono presentare concentrazioni localmente elevate di specifici elementi, con valori riportati in letteratura per il **Nd**

fino a centinaia di ppm (Stratiotou Efstratiadis and Michailidis, 2022). A livello europeo, il progetto ProSUM conferma la rilevanza di questi elementi nell'ambito dell'urban mining, includendo le Terre Rare tra i materiali di interesse associati ai flussi di AEE/RAEE (Huisman et al., 2017). Ai fini della stima, le REE sono state considerate distinguendo le principali tipologie di componenti che ne determinano la presenza nei flussi trattati (**Tabella 5**) In particolare, le REE sono state articolate in tre gruppi principali: quelle contenute nei fosfori delle lampade fluorescenti, quelle associate ai magneti permanenti a base di NdFeB e quelle presenti nelle batterie ricaricabili al nichel-metallo idruro (NiMH).

Tabella 5. Principali componenti dei RAEE contenenti terre rare

Componente	Terre rare presenti	Applicazioni principali	Riferimenti
Fosfori	Ittrio (Y), Europio (Eu), Terbio (Tb), con contributi minori di Cerio (Ce) e Lantanio (La)	Lampade fluorescenti, dispositivi di visualizzazione	(Dhawan and Tanvar, 2022)
Magnet permanenti	Neodimio (Nd), con possibili contributi di Praseodimio (Pr), Disprosio (Dy) e Terbio (Tb)	Motori elettrici, hard disk, ventole, altoparlanti	(Yang et al., 2017a)
Batterie NiMH	Lantanio (La), Cerio (Ce), Neodimio (Nd), Praseodimio (Pr)	Batterie ricaricabili per dispositivi elettronici	(Binnemans et al., 2013)

Il contenuto di REE associato ai fosfori è stato stimato con riferimento alla Cat 3 (lampade). La letteratura indica che i fosfori costituiscono fino a circa il 2 % in peso della massa complessiva della lampada e che i fosfori recuperati da lampade fluorescenti presentano un contenuto di REE compreso indicativamente tra il 9 % e il 26 % in peso. Le REE presenti nei fosfori sono costituite prevalentemente da ittrio (Y), europio (Eu) e terbio (Tb), con contributi minori di cerio (Ce) e lantanio (La). Ai fini della stima è stato adottato uno scenario centrale, assumendo una frazione di fosfori pari al 2 % della massa della lampada e un contenuto medio di terre rare nei fosfori pari al 15 %, valore intermedio all'interno dell'intervallo riportato in letteratura (**Tabella 6**). La quantità di REE associata ai fosfori è stata calcolata secondo la seguente relazione:

$$REE_{fosfori} [t] = M_{RAEE,Cat.3} [t] \times 0,02 \times 0,15 \quad (2)$$

Tale approccio è coerente con i dati riportati in letteratura e consente di stimare in modo prudente il contributo delle terre rare associate ai fosfori delle lampade fluorescenti (Dhawan and Tanvar, 2022).

La presenza di magneti permanenti a base di NdFeB nei RAEE è principalmente associata ad apparecchiature contenenti motori elettrici, dischi rigidi, ventole e altri sistemi elettromeccanici. Le masse tipiche di magneti NdFeB nei prodotti a fine vita, riportate in letteratura, indicano valori dell'ordine di 10–20 g per hard disk, 40–60 g per frigoriferi e 80–180 g per lavatrici, giustificando una maggiore incidenza dei magneti nelle Cat 6 e 5 (Smith et al., 2022). Il contenuto di REE nei magneti NdFeB è pari a circa il 31–32 % in peso (Yang et al., 2017a). In assenza di coefficienti ufficiali per la stima diretta delle masse di magneti a partire dai flussi RAEE, sono state adottate assunzioni metodologiche dichiarate, derivate dalle masse tipiche di magneti per unità di prodotto e dalla composizione dei flussi. In particolare, è stato definito un coefficiente $f_{mag,c}$, espresso come kg di magneti NdFeB per tonnellata di RAEE della categoria c , assumendo uno scenario centrale pari a 5 kg/t per la categoria 6 e a 1 kg/t per la categoria 5. La massa di magneti NdFeB associata a ciascuna categoria di RAEE è stata stimata mediante la seguente relazione:

$$M_{NdFeB,c} [t] = M_{RAEE,c} [t] \times \frac{f_{mag,c}}{1000} \quad (3)$$

La quantità di terre rare contenute nei magneti è stata quindi ottenuta applicando la frazione in peso di REE tipica dei magneti NdFeB alle masse di magneti stimate **Tabella 6**.

Il contenuto di REE associato alle batterie ricaricabili al nichel–metallo idruro (NiMH) è stato stimato considerando esclusivamente la Cat 6, che comprende apparecchiature di piccole dimensioni caratterizzate da un utilizzo diffuso di sistemi di accumulo ricaricabili. La composizione delle batterie NiMH è stata assunta sulla base della letteratura scientifica, che riporta un contenuto di mischmetal pari a circa l'8–10 % in peso, costituito principalmente da lantanio (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr) e neodimio (Nd) (Binnemans et al., 2013). In assenza di dati statistici nazionali sulla massa di batterie NiMH nei flussi RAEE, è stata adottata un'assunzione metodologica prudente pari a 2 kg di batterie NiMH per tonnellata di RAEE della Cat 6. La quantità di REE associata alle batterie NiMH è stata quindi stimata applicando una frazione in peso del 10 % alle batterie NiMH stimate **Tabella 6**. La stima è stata effettuata mediante la seguente relazione:

$$REE_{NiMH} [t] = RAEE_{Cat.6} [t] \times \frac{m_{NiMH}}{1000} \times f_{REE} \quad (4)$$

dove:

- REE_{NiMH} è la massa di REE (La, Ce, Pr, Nd) associata alle batterie NiMH [t];

- $RAEE_{Cat.6}$ è la massa di RAEE della categoria 6 gestita nell'anno di riferimento [t];
- m_{NiMH} è la massa di batterie NiMH per tonnellata di RAEE, assunta pari a 2 kg/t;
- f_{REE} è la frazione in peso di terre rare nelle batterie NiMH, assunta pari a 0,1
-

Tabella 6. Coefficienti di contenuto adottati per la stima delle terre rare

Componente	Coefficienti di contenuto	Unità di misura	Riferimenti
Fosfori	Cat 3: 0,003	t REE / t RAEE	(Dhawan and Tanvar, 2022)
Magneti NdFeB	Cat 5: 0,00031 Cat 6: 0,00155	t REE / t RAEE	(Binnemans et al., 2013)
Batterie NiMH	Cat 6: 0,00020	t REE / t RAEE	(Yang et al., 2017b)

Plastiche

Le plastiche, pur non rientrando nell'elenco delle CRM, sono state incluse nell'analisi in quanto rappresentano una frazione quantitativamente significativa nei RAEE. La loro presenza incide in modo rilevante sulla composizione complessiva dei flussi trattati e sulle strategie di gestione e recupero dei materiali. La letteratura evidenzia come la quota di plastiche nei RAEE vari in funzione della tipologia di apparecchiatura e della composizione del flusso considerato (Cardamone et al., 2021). In particolare, Boudewijn et al. sottolineano la forte eterogeneità della frazione plastica tra le diverse tipologie di RAEE, evidenziando la necessità di adottare un approccio differenziato nella stima di tale componente (Boudewijn et al., 2022). Tenendo conto di tali indicazioni, la stima della frazione plastica è stata effettuata applicando coefficienti di contenuto specifici per ciascuna categoria di RAEE, definiti sulla base delle informazioni riportate nei report della Commissione Europea in merito alla composizione dei materiali (European Commission, 2015). I coefficienti sono stati applicati ai quantitativi di RAEE gestiti al fine di stimare i quantitativi potenziali di plastiche associati ai flussi trattati (*Tabella 7*).

Tabella 7. Coefficienti adottati per il gruppo plastiche

Elemento	Coefficienti di contenuto	Unità di misura	Riferimenti
Plastiche	Cat 1: 24,7 Cat 2: 24,5 Cat 3: 10,9	% in peso	

Elemento	Coefficienti di contenuto	Unità di misura	Riferimenti
	Cat 4a: 10,4 Cat 4b: 10,4 Cat 5: 26,3 Cat 6: 35,8		(European Commission, 2015)

Riferimenti

- Balaram, V., 2019. Rare earth elements: A review of applications, occurrence, exploration, analysis, recycling, and environmental impact. *Geoscience Frontiers* 10, 1285–1303. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.gsf.2018.12.005>
- Binnemans, K., Jones, P.T., Blanpain, B., Van Gerven, T., Yang, Y., Walton, A., Buchert, M., 2013. Recycling of rare earths: a critical review. *J. Clean. Prod.* 51, 1–22. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2012.12.037>
- Boudewijn, A., Peeters, J., Cattrysse, D., Dewulf, W., Campadello, L., Accili, A., Duflou, J., 2022. Systematic Quantification of Waste Compositions: A Case Study for Waste of Electric and Electronic Equipment Plastics in the European Union. *Sustainability* 14, 7054. <https://doi.org/10.3390/su14127054>
- Cardamone, G.F., Ardolino, F., Arena, U., 2021. About the environmental sustainability of the European management of WEEE plastics. *Waste Management* 126, 119–132. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2021.02.040>
- Cayumil, R., Khanna, R., Rajarao, R., Mukherjee, P.S., Sahajwalla, V., 2016. Concentration of precious metals during their recovery from electronic waste. *Waste Management* 57, 121–130. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.12.004>
- Chancerel, P., Meskers, C.E.M., Hagelüken, C., Rotter, V.S., 2009. Assessment of Precious Metal Flows During Preprocessing of Waste Electrical and Electronic Equipment. *J. Ind. Ecol.* 13, 791–810. <https://doi.org/https://doi.org/10.1111/j.1530-9290.2009.00171.x>
- Dhawan, N., Tanvar, H., 2022. A critical review of end-of-life fluorescent lamps recycling for recovery of rare earth values. *Sustainable Materials and Technologies* 32, e00401. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.susmat.2022.e00401>
- European Commission, D.-G. for E.B. by D. (BIO), B. and U.N.U. (UNU), 2015. Study on WEEE recovery targets, preparation for re-use targets and on the method for calculation of the recovery targets. <https://doi.org/https://data.europa.eu/doi/10.2779/235063>
- Huisman, J., Leroy, P., Tertre, F., Ljunggren, M., Chancerel, P., Cassard, D., Løvik, A., Wäger, P., Kushnir, D., Rotter, V., Mähltz, P., Herreras, L., Emmerich, J., Hallberg, A., Habib, H., Wagner, M., Downes, S., 2017. Prospecting Secondary Raw Materials in the Urban Mine and mining wastes (ProSUM) - Final Report. <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10451.89125>
- Iattoni, G.B.S.Y.T.S.M.F.V.K.K.H.R.R.S.C.M.B.A. de V.H.P.-Y.-B.A.K.R.B.C.P., 2025. 2050 Critical Raw Materials Outlook for Waste Electrical and Electronic Equipment in the European Union, United Kingdom, Switzerland, Iceland and Norway.
- Lu, Y., Xu, Z., 2016. Precious metals recovery from waste printed circuit boards: A review for current status and perspective. *Resour. Conserv. Recycl.* 113, 28–39. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.007>
- Puype, F., Samsonek, J., Knoop, J., Egelkraut-Holtus, M., Ortlieb, M., 2015. Evidence of waste electrical and electronic equipment (WEEE) relevant substances in polymeric food-contact articles sold on the European market. *Food Addit. Contam. Part A Chem. Anal. Control Expo. Risk Assess.* 32. <https://doi.org/10.1080/19440049.2015.1009499>
- Schaeffer, N., Passos, H., Billard, I., Papaiconomou, N., Coutinho, J., 2018. Recovery of metals from waste electrical and electronic equipment (WEEE) using unconventional solvents based on ionic liquids. *Crit. Rev. Environ. Sci. Technol.* 48, 1–64. <https://doi.org/10.1080/10643389.2018.1477417>
- Smith, B.J., Riddle, M.E., Earlam, M.R., Iloeje, C., Diamond, D., 2022. Rare Earth Permanent Magnets: Supply Chain Deep Dive Assessment. United States. <https://doi.org/10.2172/1871577>
- Stratiotou Efstratiadis, V., Michailidis, N., 2022. Sustainable Recovery, Recycle of Critical Metals and Rare Earth Elements from Waste Electric and Electronic Equipment (Circuits, Solar, Wind) and Their Reusability in Additive Manufacturing Applications: A Review. *Metals (Basel)*. 12. <https://doi.org/10.3390/met12050794>
- Szałatkiewicz, J., 2014. Metals Content in Printed Circuit Board Waste, *J. Environ. Stud.*
- Ueberschaar, M., Geiping, J., Zamzow, M., Flamme, S., Rotter, V.S., 2017. Assessment of element-specific recycling efficiency in WEEE pre-processing. *Resour. Conserv. Recycl.* 124, 25–41. <https://doi.org/https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2017.04.006>

- Yang, Y., Walton, A., Sheridan, R., Güth, K., Gauß, R., Gutfleisch, O., Buchert, M., Steenari, B.-M., Van Gerven, T., Jones, P.T., Binnemans, K., 2017a. REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy* 3, 122–149. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4>
- Yang, Y., Walton, A., Sheridan, R., Güth, K., Gauß, R., Gutfleisch, O., Buchert, M., Steenari, B.-M., Van Gerven, T., Jones, P.T., Binnemans, K., 2017b. REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy* 3, 122–149. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4>