

SCUOLA DI SCIENZE

Dipartimento di Chimica Industriale "Toso Montanari"

Corso di Laurea Magistrale in

Chimica Industriale

Classe LM-71 - Scienze e Tecnologie della Chimica Industriale

**Valutazione del ciclo antropogenico del neodimio
in Italia, mediante metodologie MFA e LCA**

Tesi di laurea sperimentale

CANDIDATO

Samuel Martinini

RELATORE

Chiar.mo Dott. Luca Ciacci

CORRELATORE

Prof. Fabrizio Passarini

Anno Accademico 2021-2022

INDICE

LISTA DELLE FIGURE.....	iii
LISTA DELLE TABELLE.....	v
ABSTRACT	vii
PARTE GENERALE.....	1
1 INTRODUZIONE E SCOPO DELLO STUDIO	3
2 NEODIMIO	5
2.1 Il neodimio e le terre rare	5
2.2 Riserve naturali	7
2.3 Processi di produzione delle terre rare	9
2.3.1 Produzione degli ossidi di terre rare	9
2.3.2 Raffinazione delle terre rare	11
2.4 Semilavorati	15
2.4.1 Magneti permanenti	15
2.4.1.1 Produzione magneti	18
2.4.2 Altre applicazioni intermedie	20
2.5 Prodotti finali	21
2.5.1 Principali applicazioni.....	21
2.5.2 Altri prodotti.....	24
2.6 Riciclo del neodimio	25
3 METODOLOGIE.....	29
3.1 Material Flow Analysis	29
3.1.1 Terminologia e definizioni	30
3.1.2 Procedura/Fasi	32
3.1.2.1 Selezione delle sostanze.....	33
3.1.2.2 Determinazione dei confini spaziali e temporali	34
3.1.2.3 Identificazione dei flussi, riserve e processi rilevanti.....	35
3.1.2.4 Valutazione dei flussi e delle riserve della sostanza, bilanci di massa	37
3.1.3 Riserva della fase d'uso e modello dinamico	38
3.1.4 Analisi d'incertezza e sensibilità	41

3.2	Life Cycle Assessment	42
3.2.1	Struttura della valutazione del ciclo di vita	43
3.2.1.1	Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione.....	44
3.2.1.2	Analisi di inventario.....	45
3.2.1.3	Analisi degli impatti.....	46
3.2.1.4	Interpretazione e miglioramento.....	48
PARTE SPERIMENTALE		49
4	MFA: CICLO ANTROPOGENICO DEL NEODIMIO	51
4.1	Raccolta dati	51
4.2	Definizione del sistema e modellazione.....	53
4.3	Inventario Prodotti	58
4.4	Analisi di incertezza e sensibilità	60
4.5	Risultati e discussione MFA.....	61
4.5.1	Analisi dei flussi	61
4.5.2	Analisi della riserva in uso	68
4.5.3	Analisi di incertezza e sensibilità	70
5	LCA: VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI AMBIENTALI.....	73
5.1	Categorie di impatto ambientale	73
5.2	Processi di produzione e riciclo.....	74
5.2.1	Produzione primaria.....	75
5.2.2	Riciclo magnet-to-magnet.....	76
5.2.3	Processo idrometallurgico	77
5.2.4	Processo pirometallurgico	77
5.2.5	Clorurazione a stato solido	78
5.3	Allocazione economica	79
5.4	Risultati e discussione LCA	80
6	CONCLUSIONI	85
BIBLIOGRAFIA		87
APPENDICE.....		97

LISTA DELLE FIGURE

Figura 2.1 Terre rare nella tavola periodica (Kooroshy et al., 2015).....	6
Figura 2.2 Le due catene di processo per la produzione di terre rare (Arshi et al., 2018)	11
Figura 2.3 Cella elettrolitica per l'elettrolisi in cloruri fusi (Takeda et al., 2014).....	12
Figura 2.4 Forza magnetica (BH)max dei magneti permanenti in commercio, in funzione della temperatura. Il valore tra parentesi è il massimo a 25 °C (Cui et al., 2018).	17
Figura 2.5 Schema del processo moderno di manifattura dei magneti NdFeB sinterizzati (Y. Yang et al., 2017).	18
Figura 2.6 Immatricolazioni autoveicoli elettrici in Italia (UNRAE, 2022).....	23
Figura 2.7 Prezzi medi annuali dell'ossido di neodimio (99% di purezza) in \$/Kg dal 2001 al 2019 (European Commission, 2020a).	25
Figura 2.8 Confronto tra il processo di manifattura della lega NdFeB e il riciclo magnet-to-magnet (Zakotnik et al. 2016)	27
Figura 3.1 Esempio di un processo con una riserva e molteplici input e output.	31
Figura 3.2 Esempio di schema di un sistema di MFA.....	32
Figura 3.3 Procedura iterativa di un'MFA	33
Figura 3.4 Scomposizione di un processo in sottoprocessi e viceversa.	36
Figura 3.5 Ciclo di vita di un metallo generico. Le riserve segnate con una croce sono ritenute trascurabili.	36
Figura 3.6 Bilancio di massa per un processo generico.	37
Figura 3.7 Flusso totale in entrata nella fase d'uso e flusso secondario dal riciclo. Il tempo tra t_1 e t_2 corrisponde al tempo di vita utile del prodotto.	39
Figura 3.8 Flussi di materia del neodimio in Cina nel 2016, unità di misura: t di Nd (Geng et al., 2021).	40
Figura 3.9 Modello di distribuzione dei tempi di vita. La somma degli flussi in uscita in una riga fornisce la quantità totale di rifiuti generati in un anno.....	41
Figura 3.10 Struttura della LCA e possibili applicazioni (ISO 14040, 2006).	44
Figura 3.11. Categorie della metodologia ReCiPe 2016. Le categorie midpoint presentano un'incertezza minore rispetto a quelle endpoint, dato che la modellazione risulta più semplice (National Institute for Public Health and the Environment).	46
Figura 4.1 Schema del sistema di MFA analizzato.	54
Figura 4.2 Simulazione della generazione di autovetture obsolete, in uscita dalla fase d'uso.	57

Figura 4.3 Ciclo antropogenico del neodimio in Italia (2020), dalla manifattura alla gestione a fine vita. Tutti i valori sono espressi in t Nd.	62
Figura 4.4 Domanda nazionale del neodimio per le categorie di fine uso nel 2020. A sinistra (a) per la manifattura, a destra (b) per il consumo.	63
Figura 4.5 Flusso in entrata annuale nella fase d'uso (consumo), per categoria di prodotto. In basso è presente lo stesso grafico senza la categoria delle autovetture convenzionali, per agevolare la comprensione dei risultati.	64
Figura 4.6 Quantità cumulativa di rifiuti generati dal 1995 al 2020. In basso è presente lo stesso grafico senza la categoria delle autovetture convenzionali, per agevolare la comprensione dei risultati.	66
Figura 4.7 Flusso annuale di prodotti a fine vita raccolti dal sistema di gestione dei rifiuti. ..	67
Figura 4.8 Flusso annuale di rifiuti generati in uscita dalla fase d'uso e corrispondete al flusso annuale perso dalla gestione dei rifiuti.	68
Figura 4.9 Addizioni annuali nette alla riserva in uso. In basso è presente lo stesso grafico senza la categoria delle autovetture convenzionali, per agevolare la comprensione dei risultati.	69
Figura 4.10 Riserva totale in uso del neodimio in Italia e pro capite.....	70
Figura 4.11 Risultato dell'analisi di sensibilità sul consumo. La linea nera è il valore medio e le aree grigie comprendono i risultati tra $\pm 1\sigma$, $\pm 2\sigma$ e $\pm 3\sigma$	71
Figura 4.12 Risultato dell'analisi di sensibilità sulla riserva in uso totale. La linea nera è il valore medio e le aree grigie comprendono i risultati tra $\pm 1\sigma$, $\pm 2\sigma$ e $\pm 3\sigma$	72
Figura 5.1 GWP dei processi di produzione primaria, stimato da diverse LCA, e dei processi di riciclo.	81
Figura 5.2 Diagramma di flusso del processo di produzione di Nd a Bayan Obo, ottenuto con il software SimaPro, con percentuali di contributo al GWP.	82
Figura 5.3 Processo magnet-to-magnet. contributi percentuali al GWP. I risultati per il CED sono analoghi.	83
Figura 5.4 Processo idrometallurgico, contributi percentuali al GWP. I risultati per il CED sono analoghi.	83
Figura 5.5 Processo pirometallurgico, contributi percentuali al GWP. I risultati per il CED sono analoghi.	83
Figura 5.6 Processo di clorurazione a stato solido, contributi percentuali al GWP. I risultati per il CED sono analoghi.	83

Figura 5.7 Stima conservativa sull’emissioni di GHG dalla produzione primaria e dai processi di riciclo per ricreare la riserva in uso.....	84
--	----

LISTA DELLE TABELLE

Tabella 2.1 Produzione mondiale 2020-2021 e riserve dei REE (USGS 2022)	7
Tabella 2.2 Percentuali di ossidi di terre rare nei minerali (Meyers, 2002).....	9
Tabella 2.3 Composizione elementale di diversi magneti NdFeB, % m/m.	18
Tabella 2.4 Configurazioni dei generatori per turbine eoliche (Telsnig, 2020).....	24
Tabella 3.1 Elementi indicatori comunemente applicati in una MFA. N: per nutrirsi; R&W: per risiedere e lavorare; C: per pulire; T&C: per il trasporto e comunicare (Brunner & Rechberger, 2004).	34
Tabella 3.2 Struttura semplificata dei foglio di calcolo per un modello di MFA (Brunner & Rechberger, 2004).	38
Tabella 3.3 La classificazione colloca i risultati della fase di LCI nelle tre categorie di impatto ambientale considerate. Il CFC142b contribuisce sia al cambiamento climatico che al consumo dello strato di ozono (Goedkoop et al., 2016).....	47
Tabella 3.4 Risultato di una caratterizzazione con la metodologia ReCiPe 2016. I flussi sono stati moltiplicati per i fattori di caratterizzazione (CF) e poi sommati (Goedkoop et al., 2016).	48
Tabella 4.1 Lista di tutti i prodotti contenenti neodimio inclusi in questa analisi	55
Tabella 4.2 Parametri per le distribuzioni dei tempi di vita, per categoria di fine uso.....	60
Tabella 5.1 Bilancio di energia del processo magnet-to-magnet, modificato da Zakotnik et al. (2016).....	76
Tabella 5.2 Bilancio di energia e di materia del processo idrometallurgico, modificato da Becci et al. (2021)	77
Tabella 5.3 Bilancio di energia e di materia del processo pirometallurgico, modificato da Becci et al. (2021)	78
Tabella 5.4 Bilancio di energia e di materia della clorurazione a stato solido, modificato da Becci et al. (2021)	78
Tabella 5.5 Fattori di allocazione economica per i processi di riciclo del neodimio	80
Tabella 5.6 Valori di impatto per le categorie di GWP e CED dei processi analizzati in questo studio.	81

Tabella A.1 Lista dei prodcom considerati, categorie di fine uso e componenti contenenti il neodimio.	100
Tabella A.2 Concentrazioni di neodimio utilizzate per il modello di MFA e analisi di sensibilità.	102
Tabella A.3 Percentuali di raccolta dei prodotti a fine vita utilizzate per il modello di MFA.	103

ABSTRACT

Per raggiungere gli obiettivi di neutralità climatica del 2050 stabiliti dal Green Deal europeo, l'approvvigionamento sicuro e sostenibile di materie prime critiche è considerato essenziale e l'attuale crisi energetica ne ha rimarcato l'importanza. Tra queste materie prime, il neodimio risulta essere fondamentale per un ampio numero di applicazioni tecnologiche di interesse crescente come la mobilità elettrica e la generazione di energia elettrica da fonti rinnovabili. La produzione mondiale di neodimio è dominata dalla Cina e l'Italia dipende completamente dalle importazioni per soddisfare la propria domanda. Il riciclo dei prodotti a fine vita potrebbe coprire parte della domanda nazionale di neodimio e ridurre la dipendenza dalle importazioni cinesi. Ma, attualmente, la percentuale di riciclo del metallo è inferiore all'1% globalmente con attività di riciclo spesso inesistenti su scala industriale a livello nazionale. Per dare chiarezza sulla catena del valore di neodimio in Italia e dimostrare le potenzialità del suo riciclo, in questa tesi sono state applicate le metodologie di MFA e di LCA. Un modello dinamico retrospettivo di MFA è stato sviluppato col fine di investigare il ciclo antropogenico del neodimio, identificando e valutando i flussi e le riserve nazionali dal 1995 al 2020. Attraverso un modello di distribuzione dei tempi di vita è stata quantificata la riserva in uso del metallo, che ammonta a 3,3 kt Nd o 56 g Nd pro capite. Un riciclo della riserva in uso potrebbe soddisfare l'attuale domanda di neodimio oltre al 2030. I risultati dell'MFA sono stati integrati con i fattori LCA di caratterizzazione di impatto ambientale, dimostrando che il riciclo potrebbe ridurre più dell'80% delle emissioni di gas serra e della energia richiesta associate alla produzione di neodimio primario. Si prevede che lo studio possa contribuire all'implementazione di politiche e strategie di rafforzamento della catena di approvvigionamento del neodimio.

PARTE GENERALE

1 INTRODUZIONE E SCOPO DELLO STUDIO

Nei prossimi anni, la pressione sul consumo delle risorse incrementerà a causa della crescita demografica globale, dell'industrializzazione dei paesi in via di sviluppo, della digitalizzazione e della transizione ecologica. L'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico (OECD, 2019) prevede che la domanda globale di materiali nei prossimi 40 anni aumenterà di più del doppio, da 79 miliardi di tonnellate nel 2019 a 167 miliardi di tonnellate nel 2060. Questa dipendenza dalle materie prime è stata rimarcata dalla pandemia globale del Covid-19 e dalle tensioni geopolitiche dovute alla guerra in Ucraina, che hanno messo in evidenza la vulnerabilità delle catene di approvvigionamento dell'Italia e dell'Unione Europea. Da anni l'UE sta attuando diverse iniziative strategiche per rispondere a questa esigenza di risorse, tra cui l'elenco delle "Materie Prime Critiche" (*Critical Raw Materials*, CRM), pubblicata per la prima volta nel 2011 e revisionata ogni tre anni. Le materie prime critiche sono essenziali per lo sviluppo economico dell'UE e sono caratterizzate da un alto rischio di fornitura: molte di queste sono prodotte in pochi paesi terzi e, di conseguenza, sono totalmente importate in Italia e in UE (Brunori, 2022). Nel 2011 ne furono identificate 14 e con l'ultima revisione, del 2020, questo numero è salito a 30. Tra le materie prime critiche sono presenti le terre rare (*rare earth elements*, REE), che sono principalmente importate dalla Cina e che risultano componenti insostituibili per un ampio numero di beni impiegati nella vita di tutti i giorni. Tra le terre rare, il neodimio (Nd) in particolare è considerato essere uno dei materiali più critici, sia dal punto di vista di importanza economica che di rischio di fornitura, ed è previsto rimanere tale in futuro (Binnemans et al., 2018).

In questo contesto, il riciclo delle risorse secondarie, o miniere urbane, consentirebbe di ridurre la dipendenza dall'estero e di creare una catena di valore più resiliente e sostenibile, dal momento che le attività di riuso e riciclo sono considerate preferibili da un punto di vista ambientale. Tuttavia, a differenza dell'esplorazione mineraria che supporta le dinamiche di domanda e offerta, relativamente poca informazione è disponibile per le risorse secondarie così che domande apparentemente semplici come "Quanta materia è disponibile per un potenziale riciclo" o "Dove si trova?" rimangono senza risposta, limitando una piena ed efficiente implementazione di strategie di circolarità.

A questo fine, l'analisi dei flussi di materia (o MFA – *material flow analysis*) è una metodologia ampiamente impiegata per caratterizzare il ciclo di un materiale, valutandone flussi e riserve nel tempo. Negli ultimi anni, diversi modelli di MFA sono stati applicati per il neodimio, sia a livello globale (Q. Liu et al., 2022; Schulze & Buchert, 2016) sia regionale (Ciacci et al., 2019),

per l'UE, e nazionale, per Giappone (Morimoto et al., 2021; Sekine et al., 2017), Cina (Geng et al., 2021; T. Yao et al., 2021), Paesi Bassi (Crock, 2016), Corea (Swain et al., 2015) e Danimarca (Habib et al., 2014). Ad oggi, tuttavia, nessuno studio di MFA è stato applicato alla caratterizzazione dei flussi e delle riserve di neodimio in Italia. Per colmare questa lacuna, nel presente elaborato un modello di MFA è stato sviluppato ed applicato al ciclo antropogenico del neodimio in Italia con l'obiettivo di determinarne le principali categorie d'uso, la domanda di mercato, la quantità accumulata all'interno della nostra società (miniera urbana), le perdite dal sistema di gestione dei rifiuti e le potenzialità di riciclo. Inoltre, sono stati valutati anche gli aspetti ambientali del riciclo, integrando i risultati del modello di MFA con la metodologia di *Life Cycle Assessment* (LCA), per fornire un'indicazione preliminare sulle emissioni di gas serra (*greenhouse gases*, GHG) e di consumo di energia potenzialmente evitabili grazie ai processi di riciclo rispetto alla produzione primaria.

La struttura dell'elaborato è la seguente: nel capitolo 2 è fornita una panoramica sul neodimio e le terre rare, riguardo le riserve e i giacimenti, la produzione dei metalli, le principali applicazioni e il loro destino a fine vita; il capitolo 3 è dedicato a un'introduzione dei principi teorici di MFA e LCA; nel capitolo 4 e 5 vengono presentati e discussi la metodologia usata e i risultati dei modelli; infine nel capitolo 6 vengono tratte le conclusioni, con i limiti dello studio e considerazioni personali.

2 NEODIMIO

2.1 Il neodimio e le terre rare

Il neodimio, sessantesimo elemento della tavola periodica, è un metallo appartenente al gruppo delle terre rare, definito dalla IUPAC come un insieme di diciassette elementi, costituito dai lantanidi (Ln), lo scandio e l'ittrio (**Figura 2.1**). Il nome terre rare è datato alla scoperta di giacimenti minerali in Svezia nel 1794, quando il termine “terra” indicava un ossido di metallo, mentre “rara” era stato semplicemente attribuito a qualcosa considerato di strano o straordinario. Per ragioni chimico-fisiche e commerciali, le terre rare vengono tipicamente suddivise in due categorie:

- Terre rare leggere, che includono lantanio (La), cerio (Ce), praseodimio (Pr), neodimio (Nd) e samario (Sm).
- Terre rare pesanti, che comprendono europio (Eu), gadolinio (Gd), terbio (Tb), disprosio (Dy), olmio (Ho), erbio (Er), tulio (Tm), itterbio (Yb), lutezio (Lu) e ittrio (Y).

Questi elementi possiedono proprietà chimiche e fisiche uniche, che risultano essenziali e insostituibili in molte applicazioni tecnologiche moderne, come la generazione di energia elettrica da fonti eoliche o la produzione di magneti permanenti (Ayres & Peiró, 2013; Zhang et al., 2017). La necessità di innovazione tecnologica per una società *low-carbon*, unita alla continua crescita demografica, hanno spinto un incremento esponenziale della domanda delle terre rare, portando la produzione globale annuale degli ossidi (*rare earth oxides*, REO) da 64.500 t nel 1994 a 280.000 t nel 2021 (USGS, 1996-2022). Nel 2019 il valore di mercato di REE ha raggiunto i 2,2 miliardi di dollari, dei quali il solo neodimio ne ricopre il 49% (European Commission, 2020a). Grazie alle sue proprietà elettriche, magnetiche e ottiche, il neodimio viene impiegato in un'ampia gamma di prodotti, che include magneti permanenti, ceramiche, catalizzatori, batterie, elettrodomestici, veicoli a due e quattro ruote e turbine eoliche. I magneti permanenti di neodimio ferro boro ($\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$, abbreviati NdFeB) sono in grado di generare il più forte campo magnetico e la più alta coercitività tra i materiali magnetici in commercio (Stopic et al., 2022). Nel 2019 questa tecnologia ha rappresentato il 29% della domanda globale di REE.

1 H 1.007 - 1.008																								2 He 4.003											
3 Li 6.938 - 6.967		4 Be 9.012		atomic number Symbol standard atomic weight												5 B 10.80 - 10.83		6 C 12.00 - 12.02		7 N 14.00 - 14.01		8 O 15.99 - 16.00		9 F 18.99		10 Ne 20.18									
11 Na 22.99		12 Mg 24.31												13 Al 26.98		14 Si 28.08 - 28.09		15 P 30.97		16 S 32.05 - 32.08		17 Cl 35.44 - 35.46		18 Ar 39.95											
19 K 39.10		20 Ca 40.08		21 Sc 44.96		22 Ti 47.87		23 V 50.94		24 Cr 52.00		25 Mn 54.94		26 Fe 55.85		27 Co 58.93		28 Ni 58.69		29 Cu 63.55		30 Zn 65.38(2)		31 Ga 69.72		32 Ge 72.63		33 As 74.92		34 Se 78.96(2)		35 Br 79.90		36 Kr 83.80	
37 Rb 85.47		38 Sr 87.62		39 Y 88.91		40 Zr 91.22		41 Nb 92.91		42 Mo 95.96(2)		43 Tc 101.1		44 Ru 102.9		45 Rh 106.4		46 Pd 107.9		47 Ag 112.4		48 Cd 114.8		49 In 118.7		50 Sn 121.8		51 Sb 127.6		52 Te 126.9		53 I 126.9		54 Xe 131.3	
55 Cs 132.9		56 Ba 137.3		57 - 71 lanthanoids		72 Hf 178.5		73 Ta 180.9		74 W 183.8		75 Re 186.2		76 Os 190.2		77 Ir 192.2		78 Pt 195.1		79 Au 197.0		80 Hg 200.6		81 Tl 204.3 - 204.4		82 Pb 207.2		83 Bi 209.0		84 Po		85 At		86 Rn	
87 Fr		88 Ra		89 - 103 actinoids		104 Rf		105 Db		106 Sg		107 Bh		108 Hs		109 Mt		110 Ds		111 Rg		112 Cn				114 Fl				116 Lv					
Lanthanoids				57 La 138.9		58 Ce 140.1		59 Pr 140.9		60 Nd 144.2		61 Pm		62 Sm 150.4		63 Eu 152.0		64 Gd 157.3		65 Tb 158.9		66 Dy 162.5		67 Ho 164.9		68 Er 167.3		69 Tm 168.9		70 Yb 173.1		71 Lu 175.0			
Actinoids				89 Ac		90 Th 232.0		91 Pa 231.0		92 U 238.0		93 Np		94 Pu		95 Am		96 Cm		97 Bk		98 Cf		99 Es		100 Fm		101 Md		102 No		103 Lr			

Figura 2.1 Terre rare nella tavola periodica (Kooroshy et al., 2015)

Di conseguenza, negli ultimi anni, l'attenzione posta sulle terre rare da parte della comunità scientifica e dalla politica è incrementata e diverse nazioni, tra cui Stati Uniti, Unione Europea, Australia, Cina e Giappone, le hanno identificate come materiali strategici e critici. La Commissione Europa le include nell'elenco delle "Critical Raw Materials", non solo per la loro rilevanza economica e tecnologica, ma anche per il rischio legato alla loro fornitura. Questo rischio non è associato alla disponibilità di REE nella crosta terrestre, che è relativamente abbondante ed è stimata essere globalmente maggiore di 120 Mt (**Tabella 2.1**), ma dalla assenza di produzione domestica e totale dipendenza dalle importazioni, in particolare cinesi: il 98% delle terre rare importate nell'UE proviene dalla Cina (European Commission, 2020b). Per quanto riguarda la loro estrazione, sono presenti diversi ostacoli. Alcuni depositi di terre rare non facilmente accessibili, come i noduli marini, la dispersione nei minerali è alta e la distribuzione regionale è ineguale. Un altro problema di questi elementi è la loro tendenza a essere combinati tra essi per formare delle miscele, che comporta una produzione interconnessa e ad un problema di bilancio tra la quantità di terre rare prodotte e quelle richieste dal mercato. La domanda per il neodimio, il disprosio e il terbio è più elevata rispetto a quella di elementi che presentano una maggiore abbondanza naturale, come lantanio e cerio, e di conseguenza si ha un eccesso dei prodotti di quest'ultimi. Questo squilibrio tra REE tenderà a diventare sempre più critico, considerando che la domanda dell'UE per il neodimio nel 2025 potrebbe arrivare a 120 volte quella attuale (Ministero delle Imprese e del Made in Italy, 2022).

	Mine production		Reserves ^a
	2020	2021*	
United States	39,000	43,000	1,800,000
Australia	21,000	22,000	94,000,000
Brazil	600	500	21,000,000
Burma	31,000	26,000	NA
Burundi	300	100	NA
Canada	—	—	830,000
China	¹⁰ 140,000	¹⁰ 168,000	44,000,000
Greenland	—	—	1,500,000
India	2,900	2,900	6,900,000
Madagascar	2,800	3,200	NA
Russia	2,700	2,700	21,000,000
South Africa	—	—	790,000
Tanzania	—	—	890,000
Thailand	3,600	8,000	NA
Vietnam	700	400	22,000,000
Other countries	100	300	280,000
World total (rounded)	240,000	280,000	120,000,000

Tabella 2.1 Produzione mondiale 2020-2021 e riserve dei REE (USGS 2022)

Un'altra criticità legata all'estrazione dei minerali contenenti REE è che molti di questi depositi presentano concentrazioni relativamente alte di elementi radioattivi, come uranio (U, 2,7 ppm) e torio (Th, 10,5 ppm) (Morimoto et al., 2019), rendendo il processo di estrazione pericoloso dal punto di vista ambientale, di sicurezza e salute. Nonostante ciò, alcuni paesi, come gli Stati Uniti, stanno cercando di incrementare le attività estrattive, mentre altri, come l'UE e il Giappone, hanno individuato in attività di recupero e riciclo la strategia da rendere prioritaria. A livello globale, la percentuale di riciclo del neodimio risulta essere inferiore al 1%, mentre in Europa è stata raggiunta una percentuale dell'1,3% nel 2019 (Q. Liu et al., 2022; Unione Europea, 2022). Molti sono i progetti europei sulle risorse critiche e le terre rare a cui l'Italia ha aderito, l'ultimo dei quali è l'*European Raw Material Alliance* (ERMA). Gli obiettivi di ERMA sono la diversificazione delle catene di approvvigionamento delle materie prime, l'implementazione di un'economia circolare sui prodotti complessi e la promozione di innovazioni e investimenti in tutte le fasi della catena del valore delle materie prime. Le attività di ERMA sono svolte da due gruppi di lavoro, il primo dei quali si occupa dei magneti e dei motori contenenti terre rare, considerati la catena del valore più critica per molti ecosistemi industriali dell'UE.

2.2 Riserve naturali

La Cina gioca un ruolo dominante sulle riserve globali delle terre rare e il resto del mondo dipende dalle importazioni. Secondo l'istituto geologico degli Stati Uniti, la Cina possiede il 37% (44 Mt) delle riserve globali di REE ed è responsabile di circa il 70% della produzione mondiale annuale (86% per il neodimio). Oltre alle riserve cinesi, sono presenti grandi depositi naturali in Brasile (21 Mt), Russia (21 Mt), India (6,9 Mt), Australia (4 Mt) e Stati Uniti (1,8

Mt), ma le estrazioni minerarie in questi paesi non sono di grande scala: l'impatto ambientale delle miniere è elevato e l'apertura di nuove miniere richiede molto tempo. A ciò si aggiunge il contrasto ad attività estrattive illegali: si stima che nel 2011 la quantità estratta illegalmente in Cina era pari a quella ufficialmente registrata e che, nel 2014 ha raggiunto circa i due terzi della produzione totale. Negli ultimi anni, il governo cinese ha rafforzato i controlli e regolamentazioni sulle estrazioni minerarie di REE, ma il problema persiste ancora (H. Liu, 2016). Per quanto riguarda l'Italia e l'Europa, sono presenti delle riserve naturali ma la produzione mineraria è attualmente inesistente e quindi siamo completamente dipendenti dalle importazioni (Alves Dias et al., 2020).

Secondo gli studi di (Kanazawa, 2006) e (Goodenough, 2016), più di 200 minerali contenenti REE sono presenti nella crosta terrestre, però di questi solo quattro hanno rilevanza commerciale: bastnäsite, monazite, xenotime e loparite. Il neodimio viene prodotto dalla bastnäsite, monazite e anche dalle argille ad adsorbimento ionico. Le riserve mondiali sono stimate essere di 19,4 Mt e la produzione annuale si aggira intorno alle 15.800 t, dove il 90% è proveniente dalla Cina. La **Tabella 2.2** riporta la composizione media dei minerali, normalizzate per un contenuto del 100% di REO. Per bastnäsite si intende un gruppo di minerali fluorocarbonato dalla formula generalizzata $(Ce, La, Y)CO_3F$, composto dalla bastnäsite-(Ce), che è la tipologia più comune, bastnäsite-(La) e bastnäsite-(Y). Il contenuto di REO è di circa 60-70% in peso in base al deposito, mentre le quantità di ossidi di Th e U si aggirano intorno al 0,2-0,3% e 0,002% rispettivamente (Kursun et al., 2016). La monazite è anch'essa considerata un gruppo di minerali (fosfati) con formula generalizzata $[(Ce, La, Nd, Th)PO_4]$ e composta da monazite-(Ce), monazite-(La), monazite-(Nd), monazite-(Sm). La percentuale in peso di REO è di circa 55-65% e, come per la bastnäsite, la specie cerio-dominante è la più comune in natura. La frazione in peso di ThO_2 è più variabile, circa 1-28%, e quella di UO_2 va dallo 0 al 6,5% (Hoshino et al., 2016).

	Bastnasite			Monazite			Xenotime	
	California	China	Eastern Australia	Western Australia	Florida	India	China	Malaysia
La ₂ O ₃	32.00	27.00	20.20	23.90	17.47	23.00	23.35	0.50
CeO ₂	49.00	50.00	45.30	46.03	43.73	46.00	45.69	5.00
Pr ₆ O ₁₁	4.40	5.00	5.40	5.05	4.98	5.50	4.16	0.70
Nd ₂ O ₃	13.50	15.00	18.30	17.38	17.47	20.00	15.74	2.20
Sm ₂ O ₃	0.50	1.10	4.60	2.53	4.87	4.00	3.05	1.90
Eu ₂ O ₃	0.10	0.20	0.10	0.05	0.16	–	0.10	0.20
Light REO	99.50	98.30	93.90	94.94	88.68	98.50	92.09	10.50
Gd ₂ O ₃	0.30	0.40	2.00	1.49	6.56	–	2.03	4.00
Tb ₄ O ₇	0.01	–	0.20	0.04	0.26	–	0.10	1.00
Dy ₂ O ₃	0.03	–	1.15	0.69	0.90	–	1.02	8.70
Ho ₂ O ₃	0.01	–	0.05	0.05	0.11	–	0.10	2.10
Er ₂ O ₃	0.01	1.00	0.40	0.21	0.04	1.50	0.51	5.40
Tm ₂ O ₃	0.02	–	trace	0.01	0.03	–	0.51	0.90
Yb ₂ O ₃	0.01	–	0.20	0.12	0.21	–	0.51	6.20
Lu ₂ O ₃	0.01	–	trace	0.04	0.03	–	0.10	0.40
Y ₂ O ₃	0.10	0.30	2.10	2.41	3.18	–	3.05	60.80
Heavy REO total	0.50	1.70	6.10	5.06	11.32	–	7.93	89.50
Total	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
Total REO in marketable concentrates	60–70%							42.51

Analysis adjusted to 100% REO.

Tabella 2.2 Percentuali di ossidi di terre rare nei minerali (Meyers, 2002).

2.3 Processi di produzione delle terre rare

2.3.1 Produzione degli ossidi di terre rare

Di seguito viene descritta la produzione di REO nel sito di Bayan Obo, il più grande deposito di terre rare nel mondo. Una schematizzazione del processo è rappresentata nella **Figura 2.2**. Bayan Obo è una città mineraria della Mongolia interna, regione autonoma della Cina, in cui si estraggono sia i minerali di bastnäsite sia quelli di monazite. Questi minerali vengono usati per la produzione degli ossidi di lantanio, cerio, praseodimio, neodimio e anche per un mix di ossidi di samario, europio e gadolinio. Il processo di produzione per ottenere i REO include l'estrazione mineraria, l'arricchimento, un processo di roasting, la lisciviazione, l'estrazione

con solvente e calcinazione. Il primo stadio è l'estrazione mineraria di superficie tramite trivellazione e uso di esplosivi per ottenere minerali ferrosi e una piccola quantità di minerali di terre rare, con concentrazione di REO del 5-6%. I minerali estratti poi subiscono un processo di arricchimento in due stadi. Il primo stadio consiste in una macinazione con un mulino a sfere e separazione magnetica per isolare i minerali ferrosi. Gli scarti, che contengono bastnäsite e monazite, vengono poi processati tramite flottazione per ottenere una concentrazione di REO del 50%.

Successivamente si ha il processo di roasting, dove il concentrato di REO viene scaldato fino a 550°C, in presenza di acido solforico al 93-98% per produrre i solfati di terre rare. Il sito produttivo utilizza un avanzato sistema di controllo dell'inquinamento e ricicla parte dell'acido solforico. Dopodiché, si ha la lisciviazione dei solfati di terre rare con acido cloridrico, per ottenere i cloruri di terre rare, con una concentrazione del 92%. I cloruri subiscono estrazioni multiple con solvente, dove la soluzione acquosa viene miscelata con solventi organici, come l'acido di(2-etilesil)fosforico (di-(2-ethylhexyl)phosphoric acid, DEHPA). Durante le estrazioni, si ha la separazione delle diverse terre rare in base alle piccole differenze di basicità e si ottengono soluzioni acquose ad alta purezza (99%) dei singoli ioni di terre rare. Per precipitazione si ottengono i carbonati, che vengono calcinati a 750-800°C per formare i REO, utilizzando gas naturale come fonte di calore.

Invece nella Cina meridionale i REO vengono prodotti a partire dalle argille ioniche, che contengono una concentrazione relativamente bassa di REO, intorno allo 0,04-0,25%. Nonostante le basse concentrazioni, la produzione di terre rare da questi siti risulta proficua, grazie alla facilità di estrazione mineraria, alla possibilità di concentrare i REO con acidi deboli e alla crescente domanda delle terre rare. Tra le varie tecniche disponibili per l'estrazione dalle argille ioniche, la lisciviazione in situ è la più utilizzata. Le argille ad assorbimento ionico vengono liscivate con solfato di ammonio e convogliate in un sistema di raccolta sotterraneo. La soluzione lisciviante non raccolta viene in gran parte riciclata, mentre il resto scaricato sul suolo. Il lisciviato viene poi fatto precipitare con bicarbonato di ammonio o acido ossalico e in seguito vengono svolti i processi di essiccazione e calcinazione, con ottenimento di REO misti al 90-92% di purezza. La miscela di REO poi viene convertita con HCl a cloruri, che vengono sottoposti a estrazioni multiple con solventi organici. Poi si hanno le precipitazioni con acido ossalico per ottenere i precipitati di terre rare individuali, che vengono ulteriormente arrostiti per produrre gli ossidi puri. A differenza del processo a Bayan Obo, che produce quattro REO individuali, il processo da argille produce quindici differenti REO.

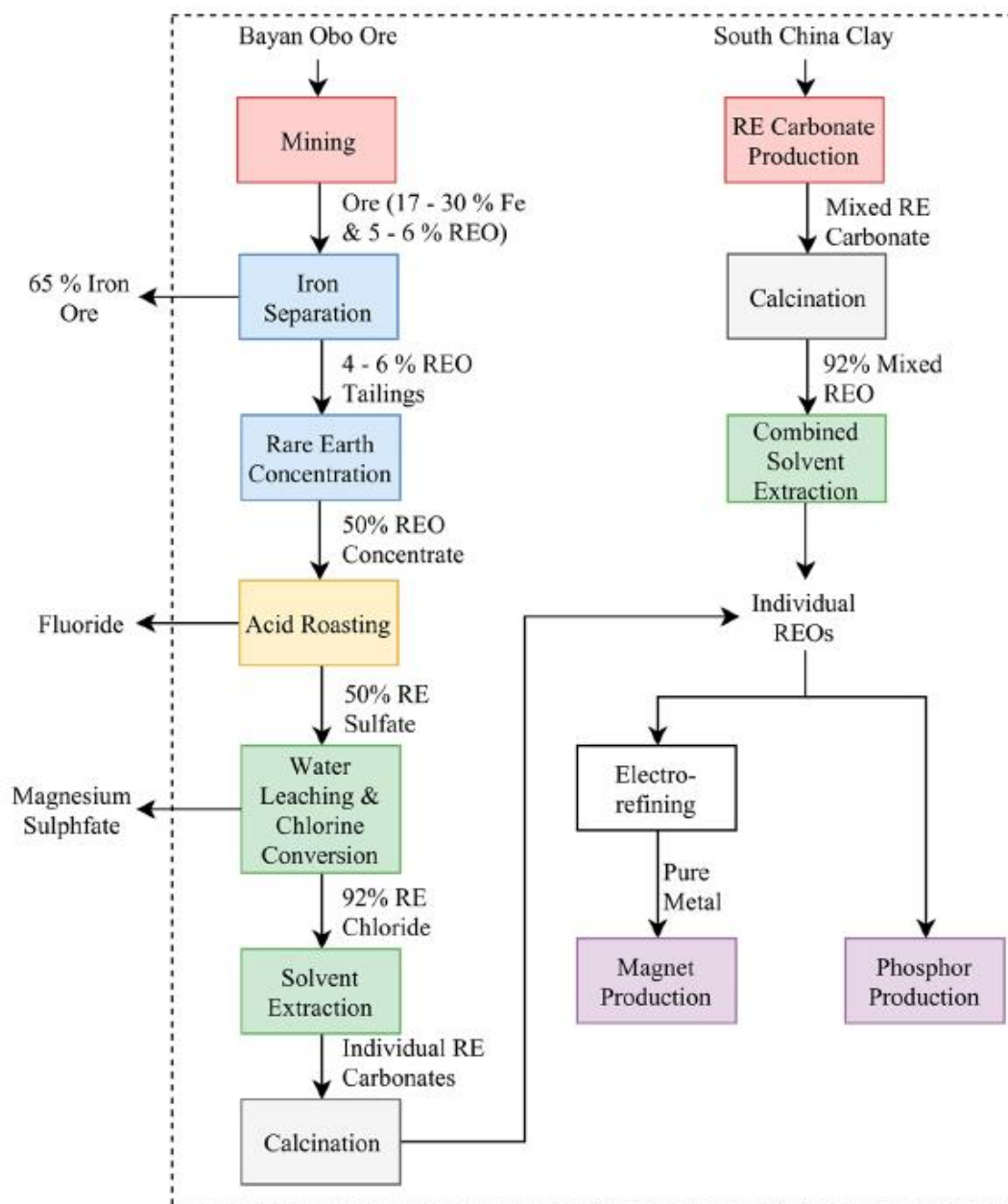


Figura 2.2 Le due catene di processo per la produzione di terre rare (Arshi et al., 2018)

2.3.2 Raffinazione delle terre rare

Il processo di raffinazione per l'ottenimento del metallo, a differenza dei processi di produzione dei REO, non è specifico a nessuna regione della Cina. La scelta del processo si basa sull'elemento da produrre e il grado di purezza desiderato. Quelli più utilizzati sono l'elettrolisi in sali fusi e la riduzione metallotermica.

L'elettrolisi in sali fusi è comunemente impiegata per le terre rare più leggere, quali La, Ce, Pr e Nd, e rappresenta l'80-90% della produzione di metalli di terre rare in Cina (Lee & Wen, 2017). L'elettrolisi è un processo elettrochimico nel quale il passaggio di corrente elettrica

permette a una reazione chimica non spontanea di avvenire. La reazione avviene all'interno di una cella elettrolitica, che consiste in un paio di elettrodi (un catodo e un anodo) immersi in un elettrolita, con un potenziale elettrico esterno applicato agli elettrodi.

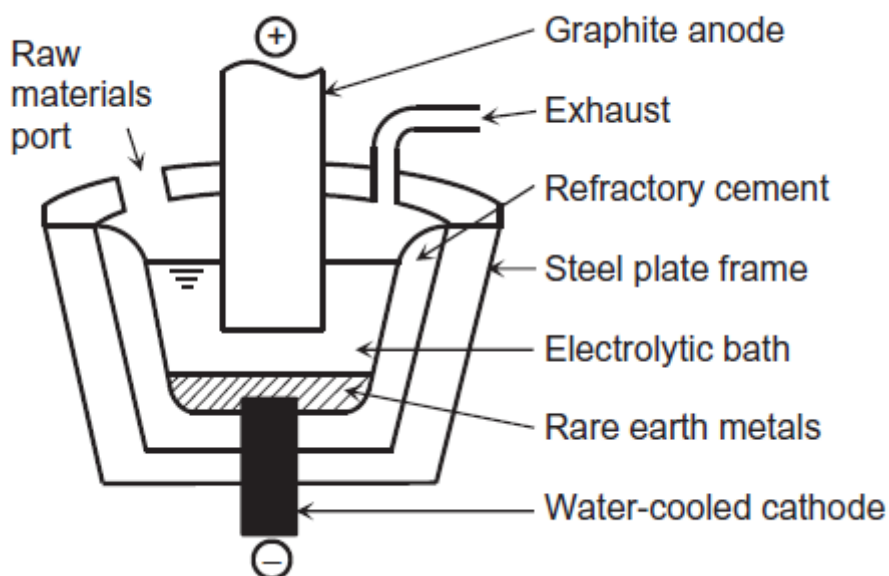


Figura 2.3 Cella elettrolitica per l'elettrolisi in cloruri fusi (Takeda et al., 2014)

Gli ioni nell'elettrolita vengono attratti dall'elettrodo di carica opposta, dove avvengono le reazioni di ossidoriduzione. I cationi sono attratti dall'elettrodo negativo, il catodo, che fornisce gli elettroni per la reazione di riduzione, mentre gli anioni all'elettrodo positivo, l'anodo, dove avviene la reazione di ossidazione. L'elettrolita è il mezzo nel quale gli ioni si muovono e tipicamente è una soluzione acquosa, ma nell'elettrolisi in sali fusi l'elettrolita è un sale o una miscela di sali fusi. I sali più utilizzati sono alogenuri di metalli alcalini e alcalino-terrosi, che possiedono un'energia libera di formazione di Gibbs molto negativa e perciò hanno ampie finestre di potenziale di decomposizione elettrochimica. Altri vantaggi dei sali fusi rispetto alle soluzioni acquose sono:

- le alte conducibilità ($2-9 \Omega^{-1} \text{ cm}^{-1}$) e diffusività, che risultano in minori cadute ohmiche, e una densità di corrente maggiore può essere ottenute con differenze di potenziale modeste;
- le temperature di lavoro più alte, che comportano correnti di scambio maggiori e, di conseguenza, cinetiche più rapide e minori polarizzazioni di attivazione per le reazioni agli elettrodi;

- l'assenza di acqua come solvente, che permette di non considerare l'evoluzione di idrogeno come reazione catodica competitiva.

Per quanto riguarda gli svantaggi nell'applicazione dei sali fusi:

- la corrosività dei sali fusi limita la scelta degli elettrodi, richiede l'uso di materiali refrattari costosi per il contenimento e, in alcuni casi, l'uso di atmosfera inerte;
- i costi di energia richiesti per mantenere il sistema allo stato liquido;
- l'alta volatilità degli stati di ossidazione più alti di alcuni alogenuri metallici (in particolare cloruri), che causa fumi e perdita di elettrolita;
- maggior difficoltà di gestione del processo.

Gli alogenuri comunemente impiegati sono cloruri, fluoruri e miscele di essi. I cloruri hanno il vantaggio di operare a temperature relativamente più basse e presentano una scelta più grande di elettrodi e materiali di contenimento. Lo svantaggio dei cloruri è la loro reattività con l'umidità: alcuni sono igroscopici e deliquescenti, mentre altri si decompongono per idrolisi. L'idrolisi previene la disidratazione e quindi un semplice riscaldamento non permette la rimozione di acqua di idratazione da certi cloruri metallici, come LiCl o NbCl₅. D'altra parte, i fluoruri hanno il vantaggio di essere meno reattivi con l'umidità e possono disciogliere direttamente gli ossidi. I punti di fusione più alti e la corrosività maggiore dei fluoruri limitano la scelta di materiali per la cella. Idealmente il sale fuso utilizzato dovrebbe possedere le seguenti caratteristiche: bassa tensione di vapore; basso punto di fusione; alta conducibilità elettrica; bassa viscosità; ampia finestra di tensione di decomposizione; corrosività nulla o bassa; elevata purezza; non inquinante; ed economico.

Durante l'elettrolisi, il potenziale richiesto per condurre il processo è sostanzialmente più alto del potenziale reversibile calcolato dall'equazione di Nernst, che per l'alogenuro del metallo (MX_n) in una soluzione del sale fuso e in equilibrio col metallo (M) e il gas puro (X₂), a pressione atmosferica, può essere espressa come:

$$E_{MX_n} = - \frac{\Delta G^\circ_{MX_n}}{nF} - \frac{RT}{nF} \ln a_{MX_n} \quad (2.1)$$

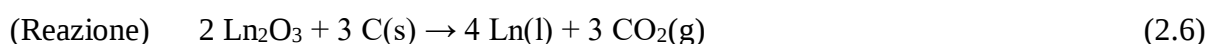
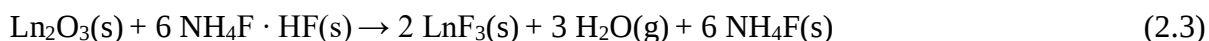
Dove $\Delta G^\circ_{MX_n}$ corrisponde all'energia libera Gibbs standard di formazione di MX_n, F è la costante di Faraday (9,64853x10⁴ C), R è la costante universale dei gas (8,314 J mol⁻¹ K⁻¹), T è la temperatura in Kelvin e a_{MX_n} è l'attività di MX_n nella soluzione elettrolitica. E_{MX_n} è il potenziale reversibile o il potenziale di decomposizione all'equilibrio di MX_n, in funzione della composizione dell'elettrolita e della temperatura. La differenza tra il potenziale di equilibrio e

il potenziale applicato è dovuta a fattori cinetici che incrementano il consumo di energia della cella. Il potenziale di cella imposto per la decomposizione elettrolitica di MX_n è dato dalla seguente relazione:

$$E_{\text{cell}} = E_{MX_n} + (\eta_a + \eta_c)_{\text{cathode}} + (\eta_a + \eta_c)_{\text{anode}} + \eta_{\text{electrodes}} + iR \quad (2.2)$$

Dove E_{cell} è il potenziale applicato alla cella, η_a e η_c sono, rispettivamente, le sovratensioni di attivazione e di concentrazione all'elettrodo e sono in funzione della composizione dell'elettrolita, della densità di corrente e della temperatura. $\eta_{\text{elettrodo}}$ è la caduta di potenziale associata con l'elettrodo stesso, i è la corrente, R è la resistenza della cella e il loro prodotto è la caduta ohmica dovuta alla resistenza elettrica dell'elettrolita ed è proporzionale alla densità di corrente e alla distanza tra i due elettrodi e inversamente proporzionale alla conducibilità elettrica degli elettroliti e alla superficie dell'elettrodo. Di conseguenza, i processi industriali di elettrolisi in sali fusi operano a 3-5 volte il valore di potenziale di Nernst.

In Cina, fluoruro di litio e il fluoruro del metallo (LnF_3) sono utilizzati per la soluzione elettrolitica. Il fluoruro del metallo viene prodotto a partire dall'ossido per reazione con bifluoruro di ammonio ($(NH_4)HF_2$) (**Eq. 2.3****Error. L'origine riferimento non è stata trovata.**), ottenuto dalla reazione tra ammoniaca e acido fluoridrico in un forno a resistenza a 300°C. L'elettrolisi viene condotta a 900-1000 °C in un intervallo di potenziale di 9-12 V.



Nel processo è essenziale il controllo dell'alimentazione dell'ossido. Un'insufficienza di ossido nella cella causa l'accumulo di ione fluoro sull'anodo, che porta alla reazione **Eq. (2.7)**. Si forma un film di fluorocarburi non conduttivo, che previene l'elettrolisi.



D'altra parte, un eccesso di ossido nell'alimentazione causa la sedimentazione di composti insolubili sul fondo della cella, che contamina il metallo prodotto.

Il processo di riduzione metallotermica è comunemente usato per la produzione di terre rare pesanti, che possedendo punti di fusione più alti risultano meno idonee per l'elettrolisi in sali fusi. Due differenti processi sono principalmente impiegati: la riduzione con calcio, detta calciotermica, per Gd, Tb, Dy, Ho, Er, Lu e Y; e la riduzione con lantanio, detta lantanotermica,

per Sm, Eu, Tm e Yb. Nella riduzione calciotermica, gli ossidi di terre rare vengono prima convertiti in fluoruri per fluorurazione con HF in HNO_3 . Poi il LnF_3 viene ridotto con Ca metallico ad alte temperature, per produrre il metallo di terra rara.



Invece, per gli ossidi più volatili, la riduzione lantanotermica è preferita rispetto alla reazione calciotermica. Sotto vuoto, gli ossidi vengono ridotti in presenza di La metallico, a temperature di 1300-1400 °C. I metalli volatilizzati vengono collezionati e condensati alle temperature di 300-400 °C, mentre La_2O_3 ottenuto come sottoprodotto viene riciclato. Entrambi i processi richiedono un largo consumo di elettricità, circa 12-15 kWh per Kg di metallo prodotto.

2.4 Semilavorati

Il neodimio presenta un ampio campo di applicazioni, grazie al grande numero di elettroni liberi, che conferisce al metallo un elevato momento magnetico. I principali prodotti intermedi, o semilavorati, del neodimio sono: magneti permanenti, batterie, ceramiche, vetri, catalizzatori e altre leghe metalliche. Con semilavorato si intende un prodotto che necessita di ulteriori lavorazioni o di assemblaggio nel prodotto finale.

2.4.1 Magneti permanenti

Sviluppati nel 1984 contemporaneamente dalla General Motors Corporation, negli Stati Uniti, e della Sumitomo Special Metals, in Giappone, i magneti al neodimio sono magneti permanenti costituiti da una fase primaria di $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$ tetragonale, una frazione di piccolo volume ricca in B (NdFe_4B_4) e una fase ricca in Nd (Fu et al., 2013). Sono definiti permanenti in quanto in grado di generare un campo magnetico persistente a differenza dei materiali elettromagnetici, che necessitano del passaggio di corrente elettrica. Esempi di altri magneti permanenti sono la ferrite, i magneti in alluminio-nichel-cobalto (AlNiCo) e i magneti samario-cobalto (SmCo).

In generale, i magneti permanenti sono caratterizzati da un'alta coercività e rimanenza:

- la coercività, o forza coercitiva, è l'intensità del campo magnetico esterno, quando opposto alla direzione di magnetizzazione, che è sufficientemente forte per annullare la densità di flusso magnetica del materiale. In altre parole, è la stabilità di un magnete alla demagnetizzazione in presenza di un campo magnetico esterno. L'unità di misura della coercività nel sistema internazionale è ampere su metro (A/m). La coercività di un magnete varia in funzione della temperatura e questa relazione viene espressa tramite il coefficiente termico di coercività, che per i magneti di terre rare tende a essere negativo.

I valori del coefficiente per i magneti di NdFeB variano da -0,40 a -0,65%/K, perciò la forza magnetica tende a calare all'aumentare della temperatura.

- La rimanenza è la magnetizzazione residua in un materiale ferromagnetico dopo la rimozione di un campo magnetico esterno. L'unità di misura è il Tesla (T) o il Gauss (G).

I magneti al neodimio possiedono la più alta densità energetica tra tutti i materiali magnetici, con un valore massimo teorico di 512 kJ/m^3 , ossia 5-12 volte superiore al valore della ferrite e 3-10 volte a quello dei magneti AlNiCo. I magneti NdFeB sono in grado di sollevare 1300 volte la loro massa e l'alto rapporto di energia-volume li rende idonei alla miniaturizzazione dei componenti elettronici e all'alleggerimento dei veicoli, ricercata nella progettazione di soluzioni più ambientalmente sostenibili. D'altra parte, sono più vulnerabili all'ossidazione rispetto ai magneti di SmCo e possiedono una bassa temperatura di Curie (312°C). La temperatura di Curie, o punto di Curie, è la temperatura alla quale un materiale ferromagnetico diventa paramagnetico, perché l'alta temperatura causa il disallineamento degli spin magnetici.

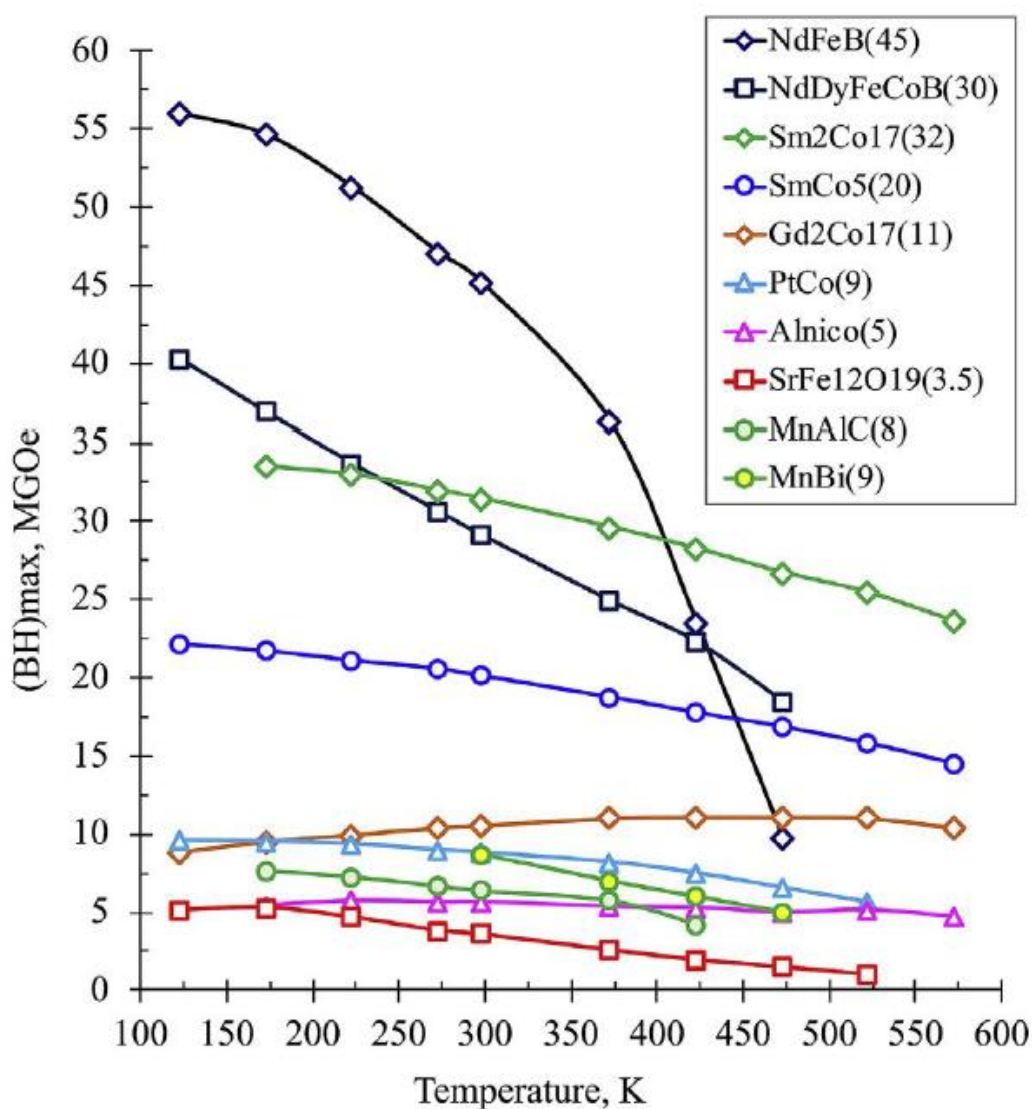


Figura 2.4 Forza magnetica $(BH)_{max}$ dei magneti permanenti in commercio, in funzione della temperatura. Il valore tra parentesi è il massimo a 25 °C (Cui et al., 2018).

I magneti permanenti sono la principale applicazione del neodimio, utilizzati nei motori di veicoli elettrici a due ruote e quattro ruote, generatori per turbine eoliche, scanner per l'imaging a risonanza magnetica (*Magnetic Resonance Imaging*, MRI), macchine industriali, elettronica di consumo (ad esempio dischi rigidi per computer, altoparlanti per cellulari) ed elettrodomestici. Questa versatilità è dovuta al fatto che, modificando la composizione chimica del magnete, si possono modulare le sue proprietà. L'aggiunta di Dy, Tb o Co permette di incrementare la coercività del magnete e la temperatura di Curie, migliorandone le prestazioni ad alte temperature, ma riducendo la rimanenza e la densità energetica. L'aggiunta di Cu e Al migliora la sinterizzazione della lega metallica, mentre l'addizione di Ga la lavorabilità (Y. Yang et al., 2017). La composizione del magnete è variabile in base alle condizioni richieste dall'applicazione finale, nella **Tabella 2.3** sono riportati alcuni esempi. I magneti NdFeB

possono essere distinti in due tipologie: magneti sinterizzati, noti anche come di nucleazione; e magneti con legante polimerico, di natura nanocristallina.

Fonte	Nd	Fe	B	Pr	Dy	Co	Ga	Al	Cu	Ni
(Karal et al., 2021)	24,3	67,4	1,2		1,1			0,8		0,8
(Jin et al., 2018)	18,0	66,88	1,02	4,60	6,15	2,84	0,21	0,12	0,18	
(Schulze et al., 2018)	28,9	63,4	1,0	0,67	2,72	2,91	0,07	0,14	0,19	

Tabella 2.3 Composizione elementale di diversi magneti NdFeB, % m/m.

2.4.1.1 Produzione magneti

Il mercato dei magneti NdFeB è dominato dalla tipologia sinterizzata, prodotti con il processo schematizzato nella Fig. (5).

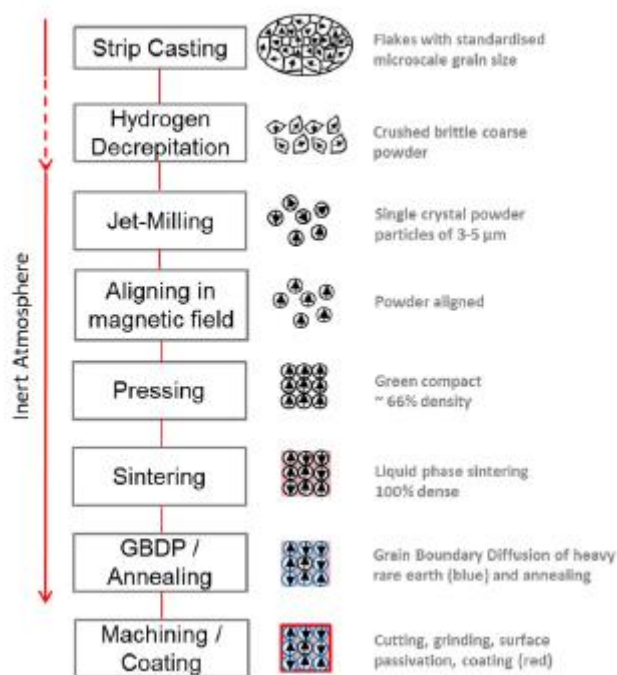


Figura 2.5 Schema del processo moderno di manifattura dei magneti NdFeB sinterizzati (Y. Yang et al., 2017).

Il processo industriale tipicamente usato per la formazione della lega iniziale di NdFeB è quello della colata di nastri. Il vantaggio rispetto ai metodi tradizionali di colata è che la lega risultante ha una microstruttura di granuli di NdFeB omogenea ed è evitata la formazione di piccole quantità di ferro tra i granuli. Nella colata di nastri, la miscela di Nd, Fe e B viene fusa in una fornace a induzione alla temperatura di 1400 °C. La lega viene poi versata su una ruota di rame raffreddata con acqua, che gira rapidamente. Al contatto con la ruota la lega solidifica e si rompe in fiocchi di pochi millimetri di larghezza e lunghi qualche centimetro. I fiocchi sono costituiti

da cristalli di NdFeB, che formano granuli di 100-300 nm. Lo spazio tra i granuli è denominato come bordo di grano ed è occupato da Nd metallico.

Il passaggio successivo è la decrepitazione con idrogeno, nel quale i fiocchi vengono esposti all'idrogeno per ottenere la formazione di idruro nel *grain boundary*, ricco di Nd. La formazione di idruri porta all'espansione del *grain boundary* e di conseguenza allo sgretolamento dei fiocchi in una polvere fine, con dimensioni delle particelle pari a quella dei granuli. A volte si ha un passaggio di degassaggio per riscaldamento a 600 °C, sottovuoto. Il degassaggio viene attuato per aumentare il volume delle particelle, che favorisce il processo di pressatura, ma d'altra parte rende il materiale più pericoloso da gestire, in quanto la polvere senza idruri risulta essere piroforica. Se la polvere non subisce il processo di degassaggio, l'idrogeno viene fatto rilasciare nello stadio di sinterizzazione del materiale.

Successivamente, nel passaggio di fresatura a getto la polvere viene alimentata con un gas compresso (Ar o N₂) in una camera di macinazione cilindrica. All'interno della camera il gas compresso forma un vortice che accelera le particelle e si ha la riduzione delle dimensioni per impatto con le pareti o con altre particelle. La forza centrifuga porta le particelle più grandi a spostarsi fuori dal vortice, mentre quelle di dimensioni desiderate (3-5 µm) si muovono verso il centro, uscendo dallo scarico.

Lo stadio di allineamento, nel quale alle particelle viene imposta un'orientazione magnetica, tipicamente avviene insieme allo stadio di pressatura. La polvere di NdFeB viene versata in uno stampo e in presenza di un campo magnetico di 1,5 T vengono pressate. Il processo di pressatura può essere con matrice oppure isostatica, entrambi usati industrialmente. Nella pressatura con matrice la polvere è versata in uno stampo dove viene pressata da entrambi i lati, mentre nella pressatura isostatica la polvere è in uno stampo di gomma immerso in una vasca con olio. La pressatura con matrice è più veloce ed economica, ma l'allineamento magnetico delle particelle è leggermente deviato dalla pressione. L'olio invece rende la pressatura della polvere più uniforme e l'allineamento risulta invariato. La pressione utilizzata è di 100 kg/cm² e la densità del blocco compatto è di circa 6,4 g/cm³.

I blocchi vengono poi sinterizzati sottovuoto (2-10 mbar), alla temperatura di 1000°C. La temperatura scelta causa la liquefazione della fase ricca di Nd e si ha la riduzione del volume del *grain boundary*. Se l'idrogeno non è stato rimosso in precedenza, il degassaggio avviene in questa fase. Il processo di ricottura avviene in due passaggi, prima il materiale è riscaldato

sottovuoto a 900 °C e successivamente a 600 °C. La ricottura migliora le proprietà magnetiche del materiale, in particolare la sua coercività.

Dopodiché i blocchi vengono lavorati meccanicamente per ottenere la forma finale desiderata. In questa fase il materiale perso può essere recuperato e riusato per produrre i magneti, ma con una qualità inferiore. I magneti NdFeB sono molto suscettibili all'umidità, perché la fase ricca in neodimio nel *grain boundary* catalizza la formazione di idrogeno dall'acqua, che poi reagisce con il neodimio stesso per formare l'idruro. Analogamente al processo di decrepitazione con idrogeno, l'espansione in volume causato dalla formazione di idruro disintegra il magnete. Perciò il materiale viene rivestito tramite elettrodeposizione con uno strato protettivo di metallo, ad esempio Ni o Ni-Cu-Ni.

Per i magneti NdFeB con legante polimerico, invece, i passaggi principali della produzione sono: raffreddamento della lega per *melt spinning*, che raggiunge velocità di solidificazione superiori a quelle della colata di nastri, per ottenere fiocchi policristalli con granulometria nella nanoscala; macinazione dei fiocchi per omogeneizzare la granulometria; infine miscelazione dei fiocchi con polimero e iniezione o pressatura del composto nel magnete. Polimeri comunemente usati sono resine epossidiche. I vantaggi di questo processo sono possibilità di generare magneti con forme geometriche più complesse, orientazioni dei poli personalizzabili e maggior resistenza alla corrosione. Lo svantaggio è che la densità energetica è inferiore rispetto ai magneti sinterizzati, dato che il materiale magnetico è diluito nel polimero.

2.4.2 Altre applicazioni intermedie

Le batterie nichel-metallo idruro (*nickel-metal hydride*, NiMH) possono impiegare come catodo il neodimio per l'accumulo di idrogeno. Introdotte nel mercato nel 1989, sono batterie ricaricabili simili a quelle di nichel-cadmio (NiCd), ma con prestazioni migliori, per via della maggiore capacità e stabilità e dei minori problemi di effetto memoria. Inoltre, sono considerate più sostenibili ambientalmente data la sostituzione del cadmio con un idruro di un lantanide, che rappresenta il 17% della composizione in peso della batteria (European Commission, 2020a). Le batterie di NiMH vengono impiegate in diverse applicazioni come per gli attrezzi portatili, l'elettronica di consumo e principalmente nel settore emergente delle auto elettriche. Però, negli ultimi anni le batterie al litio stanno rimpiazzando quelle di NiMH all'interno dei veicoli elettrici a due e quattro ruote, grazie alla loro densità energetica maggiore, la quale garantisce una maggiore accelerazione e autonomia. Nonostante ciò, le batterie NiMH sono

preferite per le applicazioni ad alta temperatura, dove risultano più sicure di quelle al Li, e per applicazioni dove il rapporto energia-peso è meno importante (Machacek & Kalvig, 2017).

I materiali ceramici contenenti neodimio sono utilizzati come componenti dielettrici nei condensatori, per cellulari e altre applicazioni elettroniche e di comunicazione. Con la tendenza della miniaturizzazione elettronica e la diffusione del 5G, l'applicazione di queste ceramiche tenderà a incrementare, date le loro ottime proprietà isolanti (Xia et al., 2022). Un altro impiego del neodimio nel settore delle ceramiche è come colorante blu per le piastrelle. Anche per la manifattura di vetri può essere utilizzato come colorante o rivestimento. In metallurgia, il neodimio è presente nella lega *mischmetal* (dal tedesco “mischmetall”, miscela di metalli), insieme a cerio, lantanio e tracce di altre terre rare. Questa lega viene tipicamente miscelata con ossidi di ferro e magnesio per essere usata come pietra focaia negli accendini. Nel settore della catalisi, il neodimio può essere applicato nei catalizzatori del cracking catalitico a letto fluido (zeoliti), usati per la raffinazione del petrolio, e dei convertitori catalitici, utilizzati per la riduzione di emissioni dai veicoli. La presenza di neodimio e altre terre rare (La e Ce) aumenta la stabilità e l'attività di questi catalizzatori (Sousa-Aguiar et al., 2013). Altri impieghi di minore rilevanza sono: cristalli e granati per laser e dispositivi a microonde; formulazioni di farmaci per la trombosi; refrigerazione magnetica.

2.5 Prodotti finali

2.5.1 Principali applicazioni

Di seguito sono descritte le principali applicazioni del neodimio, che sono state investigate per il modello di MFA. Rappresentano un sottoinsieme di tutti i prodotti sul mercato contenenti neodimio.

In computer desktop e portatili è possibile trovare neodimio all'interno dei dischi rigidi (*hard disk drives*, HDD). Gli HDD sono dispositivi di archiviazione di massa che utilizzano magneti NdFeB per far ruotare uno o più dischi, in cui i dati vengono conservati. Gli HDD contengono due tipologie di magneti al neodimio: magneti sinterizzati nel motore “*voice coil*”, che controlla la scannerizzazione dei dati, e magneti legati con resine nel motore “*spindle*”, che ruota il disco (Remanence, 2012). I dischi rigidi hanno dimensioni di 5-10 cm e un peso che va dai 50 fino ai 600 g, in base al modello e in base al dispositivo in cui viene utilizzato, se fisso o portatile. La domanda mondiale per sistemi di archiviazione di dati sta aumentando, ma quella degli HDD sta calando a causa delle unità di memoria a stato solido (*solid-state drive*, SSD), che risultano più veloci degli HDD e non contengono neodimio o altre terre rare. D'altra parte, l'incremento

di servizi di archiviazione cloud, che richiedono HDD per i server, e il minore prezzo a parità di gigabyte permette agli HDD di rimanere competitivi sul mercato.

I trasduttori elettroacustici sono dispositivi per la conversione di segnali elettrici in suoni o viceversa. Applicazioni comuni includono altoparlanti, cuffie e microfoni. I magneti NdFeB vengono principalmente usati per gli altoparlanti piccoli, come quelli presenti negli smartphone, tablet, auricolari e computer portatili, dato che possiedono una maggior potenza magnetica rispetto alla ferrite. Secondo Lucas et al. (2015), il mercato dei magneti NdFeB nei trasduttori non crescerà in modo significativo a causa dei trasduttori piezoelettrici, che possono essere prodotti con dimensioni ancora più piccole e che consumano meno energia.

Gli scanner MRI possono utilizzare magneti permanenti, superconduttori o elettromagneti. Esistono due tipologie di scanner: aperti e chiusi. Gli scanner aperti sono progettati per evitare sensazioni di claustrofobia e principalmente usano magneti permanenti. Rispetto agli scanner chiusi, che utilizzano solo magneti superconduttori, hanno un prezzo e un costo di manutenzione inferiori (non richiedendo liquidi criogenici), ma generano un campo magnetico più debole (inferiore a 0,5 T) e perciò producono immagini di qualità inferiore (Health Images, 2022).

I condizionatori d'aria possono utilizzare magneti permanenti nei motori dei compressori, sia nei modelli domestici che industriali. Gli standard di efficienza per i condizionatori vengono incrementati continuamente per raggiungere i target di emissione di gas serra ed è previsto che la domanda di compressori con magneti NdFeB aumenti, data la loro maggiore efficienza. Altri elettrodomestici che possono contenere magneti permanenti sono lavatrici, asciugatrici, frigoriferi e freezer. Per le lavatrici e le asciugatrici i magneti sono usati nei motori per la rotazione del tamburo, mentre nei frigoriferi e freezer sono usati per il motore di compressione del fluido refrigerante.

Uno dei maggiori impieghi del neodimio è legato al settore automobilistico, dove se ne è fatto uso sin dagli anni 90. All'interno di un autoveicolo il neodimio può essere contenuto all'interno del servosterzo, del motore, delle batterie, dell'alternatore, del cambio, del climatizzatore, degli altoparlanti e dei vari sistemi elettronici, dedicati alla sicurezza o all'*infotainment*. Secondo Alves Dias et al., (2020), il 90-95% dei modelli di auto elettriche possiedono motori con magneti permanenti, ma esistono alternative come i modelli della Tesla, che utilizzano motori a induzione. Il motore elettrico è la componente che contiene la quantità maggiore di neodimio all'interno del veicolo. Il servosterzo può essere meccanico, noto come idrosterzo e quindi non

contenente terre rare, o elettrico (*Electric Power Steering*, EPS), che negli ultimi anni sta sempre di più rimpiazzando l'idrosterzo. Come già discusso nel paragrafo 2.4.2, le batterie possono contenere neodimio (batterie NiMH), ma quelle al litio stanno diventando più popolari. Il grande numero di applicazioni del neodimio all'interno di un'automobile, unito alla crescita esponenziale delle vendite di auto ibride ed elettriche negli ultimi anni (**Figura 2.6**), dimostra quanto sarà critico il settore automobilistico nel consumo di neodimio.

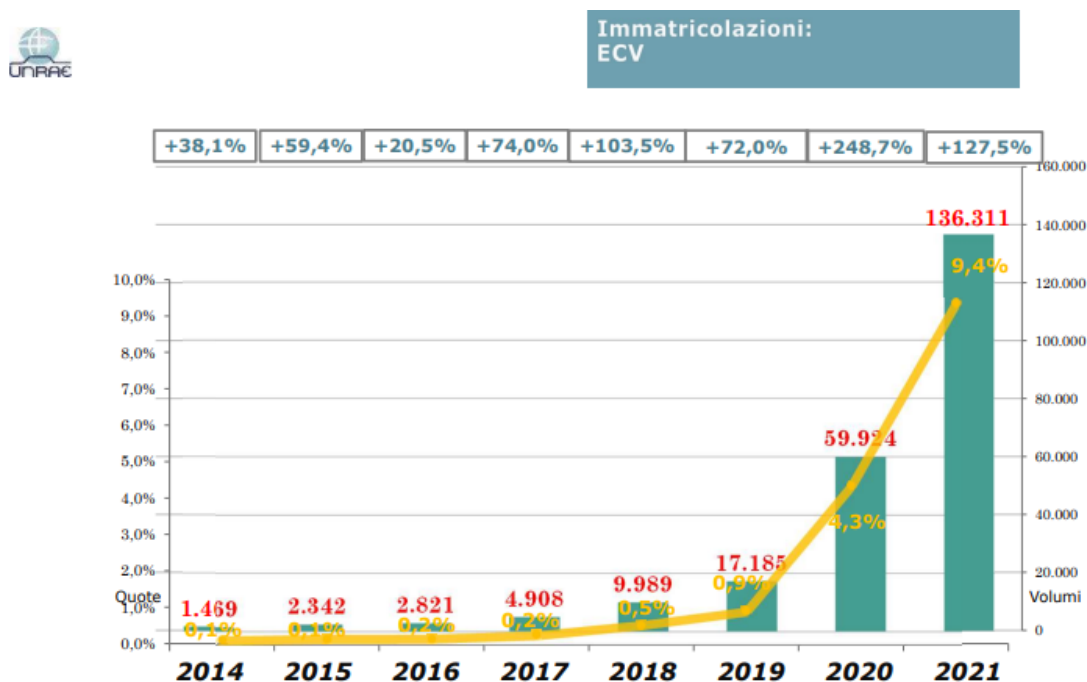


Figura 2.6 Immatricolazioni autoveicoli elettrici in Italia (UNRAE, 2022).

Un mercato relativamente nuovo e in crescita per il neodimio è quello dei veicoli elettrici a due ruote, che comprende sia i veicoli in cui il motore elettrico assiste solo la pedalata (pedelec), sia quelli in cui il motore elettrico è azionato dalla manopola dell'acceleratore (e-bike, monopattini elettrici). Il neodimio può essere contenuto nel magnete del motore, in particolare per i modelli ad alte prestazioni, e del sensore di velocità e all'interno delle batterie.

I generatori per le turbine eoliche sono un altro importante settore emergente per la domanda di neodimio. Esistono diverse tecnologie per le turbine eoliche, che possono essere distinte in tre categorie: con *gearbox*, *direct drive* (detta anche *gearless*) e ibride. La tabella 3 riassume le configurazioni di generatori presenti sul mercato. Le configurazioni con *gearbox* sono le più diffuse e non utilizzano magneti permanenti. La *gearbox* è costituita da acciaio, rame e silice e ha la funzione di trasformare il basso numero di giri delle pale (18-25 giri al minuto) in un numero di giri elevato del rotore del generatore (fino a 1800 giri al minuto) (Enel Green Power, 2022). Le configurazioni *direct drive* D-PM e ibrida E-PM invece utilizzano generatori a

magneti permanenti per convertire l'energia meccanica in energia elettrica. Rispetto alle turbine eoliche con *gearbox* hanno una maggiore efficienza, tempi di vita più lunghi e richiedono una frequenza minore di manutenzione. La possibilità di operare ininterrottamente per più tempo senza necessità di manutenzione rende i generatori *direct drive* la configurazione dominante nelle turbine *offshore*. Lo svantaggio principale sono i maggiori costi di costruzione rispetto alle turbine con *gearbox*.

Type	Configuration	Gearbox/Gearless	Category
A	High-speed - Squirrel Cage Induction Generator (SCIG)	Gearbox	Geared high-speed WT
B	High-speed Wounded Rotor Induction Generator (WRIG)	Gearbox	
C	High-speed Doubly-Fed Induction Generator (DFIG)	Gearbox	
D-EE	Low-speed Electrically excited synchronous generator (EESG) with full power converter	Gearless (Direct Drive)	Direct drive WT
D-PM	Low-speed Permanent magnet synchronous generator (PMSG) with full power converter	Gearless (Direct Drive)	
E-EE	Medium/High-speed synchronous generator (EESG) with full power converter	Gearbox	Hybrid drive trains
E-PM	Medium/High-speed synchronous generator (PMSG) with full power converter	Gearbox	
F	High-speed - Squirrel Cage Induction Generator (SCIG) with full power converter	Gearbox	

Tabella 2.4 Configurazioni dei generatori per turbine eoliche (Telsnig, 2020).

La domanda per le turbine con magneti permanenti è prevista crescere in futuro, considerando che il potenziale eolico italiano è ancora inespresso, in particolare per quello *offshore*. Nel 2022, a Taranto, è stato costruito il primo parco eolico *offshore* e l'Associazione Nazionale Energia del Vento (ANEV) prevede che entro il 2030 saranno installati in totale 5,5 GW di eolico sul mare.

2.5.2 Altri prodotti

Data la versatilità del neodimio e l'assenza di informazioni dettagliate sulle quantità contenute o della penetrazione di mercato, sono molte le applicazioni che possono utilizzarlo che non sono state investigate per il modello di MFA. I separatori magnetici sono presenti in molti settori industriali, tra i quali l'industria alimentare, chimica, farmaceutica, del carbone, del vetro, dell'imballaggio e del riciclo (Akil et al., 2019). La loro funzione è garantire la purezza

degli intermedi e prodotti o la protezione degli strumenti di manifattura a valle, tramite la rimozione di materiali ferrosi e paramagnetici. Motori e robot industriali costituiscono un altro impiego rilevante di neodimio. Le attrezzature industriali idonee all'uso di magneti permanenti includono pompe a velocità regolabile, ventilatori, estrusori, nastri trasportatori, gru e avvolgitori. Altri macchinari ed elettrodomestici che non sono stati considerati sono ascensori, aspirapolvere, forni a microonde e lettori CD/DVD.

2.6 Riciclo del neodimio

Diverse sono le soluzioni solitamente discusse per soddisfare la domanda nazionale di neodimio: queste includono la ricerca e lo sfruttamento di depositi minerari, sia l'uso di materiali sostitutivi o l'impiego di minori quantità per unità di prodotto, sia strategie di Economia Circolare. Tra queste ultime, in particolare, il riciclo di materiali a fine vita è considerato uno dei più promettenti, risultando meno energivoro e impattante rispetto alla produzione primaria (Jin et al., 2018; Karal et al., 2021). Inoltre, garantisce che la catena di approvvigionamento sia meno influenzata dalla volatilità del prezzo del neodimio. Nel 2011 il prezzo medio dell'ossido è incrementato di circa 5 volte (**Figura 2.7**), raggiungendo un picco di 467 \$/kg nel mese di luglio di quell'anno.

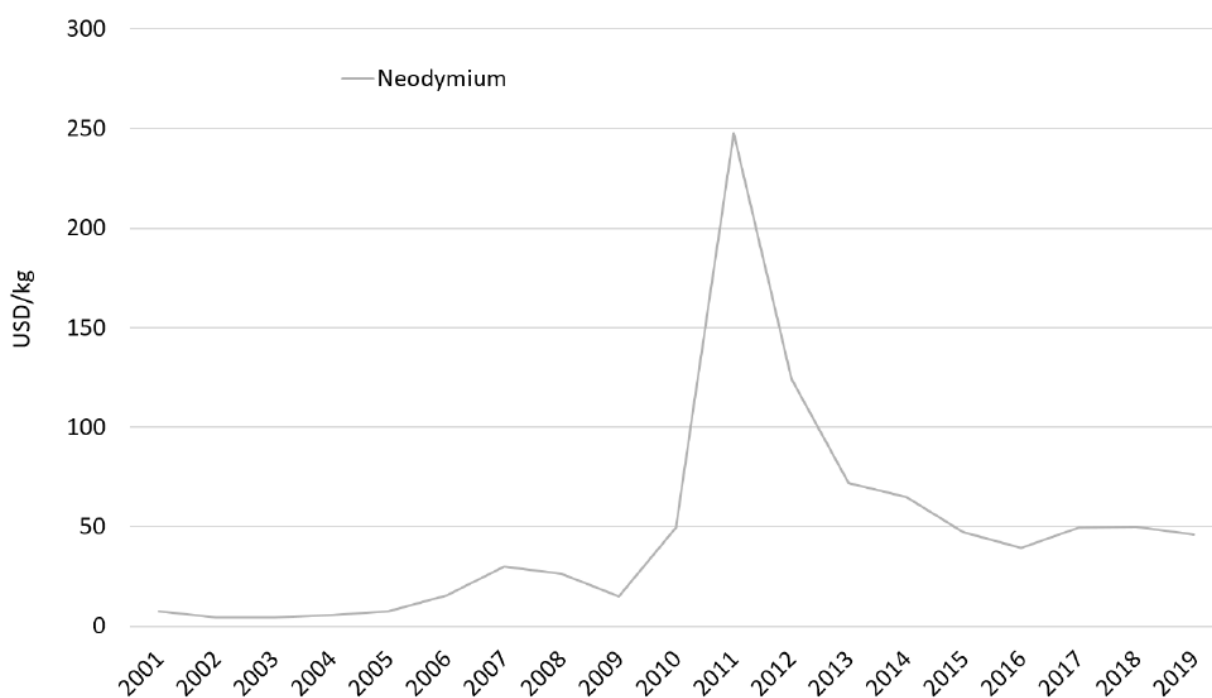


Figura 2.7 Prezzi medi annuali dell'ossido di neodimio (99% di purezza) in \$/Kg dal 2001 al 2019 (European Commission, 2020a).

Esistono molte tecnologie per il recupero e riciclo di neodimio e delle altre terre rare, con diversi livelli di maturità tecnologica (*Technology Readiness Level*, TRL). Le tecnologie di riciclo più diffuse per le terre rare si basano su processi idrometallurgici e pirometallurgici. Nei processi idrometallurgici le leghe delle terre rare vengono disciolte in acidi minerali forti e selettivamente precipitati sotto forma di fluoruri, ossalati o solfati doppi. Nei processi pirometallurgici, invece, le leghe sono sottoposte a trattamenti ad alta temperatura. Esempi di processi pirometallurgici sono il *roasting*, l'estrazione liquido-metallo e raffinazione elettrochimica. La ricerca negli ultimi anni ha dedicato molti studi allo sviluppo di questi processi, in particolare per il riciclo da magneti permanenti (Kumari et al., 2018; Yadav et al., 2018) e da batterie NiMH (X. Yang et al., 2014). Xia et al. (2022) hanno creato un processo idrometallurgico per i componenti ceramici di rifiuti da apparecchiature elettriche ed elettroniche (RAEE), che impiega sensori ottici e spettroscopia a raggi X per l'identificazione e la pre-concentrazione del neodimio. Altri studi sono stati effettuati su processi differenti, come la bio-lisciviazione (Dev et al., 2020; Schmitz et al., 2021) e l'estrazione con CO₂ supercritica (Y. Yao et al., 2018).

Un processo alternativo e promettente per i magneti permanenti è il riciclo “*magnet-to-magnet*”, nel quale si ha la manifattura di un nuovo magnete a partire da quelli recuperati da prodotti a fine vita. Il processo si basa sulla decrepitazione con idrogeno dei magneti a fine vita per ottenere la polvere della lega NdFeB, da cui si produce il magnete nuovo in maniera analoga alla produzione primaria (**Figura 2.8**). I vantaggi del riciclo *magnet-to-magnet* rispetto ai processi precedenti sono la maggior semplicità e l'impiego minore di sostanze chimiche, che risulta in una generazione inferiore di rifiuti ed emissioni. La Noveon Magnetics (Texas, Stati Uniti) ha sviluppato questo processo su scala commerciale (M2M®), nel quale il ~97% dell'alimentazione è composta da magneti permanenti a fine vita di HDD, condizionatori d'aria, turbine eoliche, scanner MRI, auto elettriche e altre applicazioni e il restante ~3% è un input di terre rare vergini.

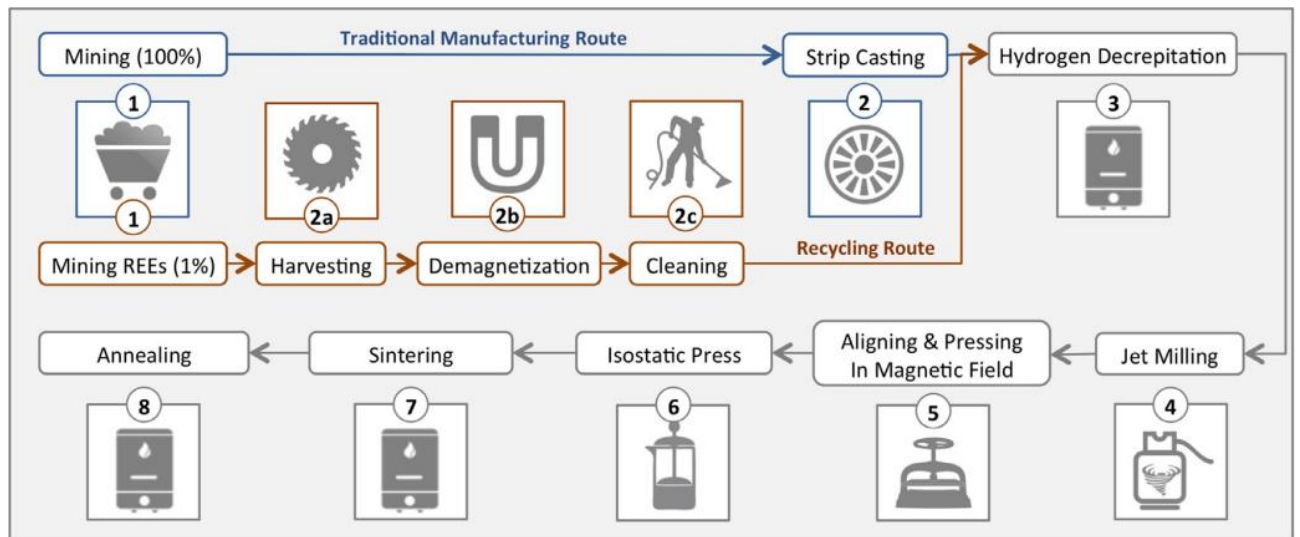


Figura 2.8 Confronto tra il processo di manifattura della lega NdFeB e il riciclo magnet-to-magnet (Zakotnik et al. 2016)

Per quanto riguarda l'Unione Europea, diversi progetti sono stati realizzati nel corso degli anni, tra cui:

- REEcover (2013-2016), nel quale sono stati sviluppati due processi per recuperare disprosio e neodimio dagli scarti di apatite dell'estrazione del ferro e dalla frazione ferrosa dei RAEE. I processi consistono in una pre-concentrazione delle terre rare tramite demagnetizzazione e setacciatura, seguita da un trattamento pirometallurgico per ottenere i REO e, infine, uno stadio di elettrolisi per la produzione dei metalli.
- REMANENCE (2013-2016), che ha sviluppato sensori magnetici e ottici per l'identificazione del materiale magnetico in un flusso di rifiuti, tecniche di separazione meccaniche per il recupero dei magneti dai RAEE e due processi di riciclo *magnet-to-magnet* tramite decrepitazione con idrogeno. Inoltre, è stato studiato anche un processo idrometallurgico per la produzione di Nd_2O_3 da rifiuti contaminati, non idonei alla decrepitazione.
- EREAN (2013-2017), in cui è stato studiato il recupero di magneti da componenti di automobili usando idrogeno. Sono stati anche sviluppati diversi schemi di processo per il recupero delle terre rare da magneti ossidati, basati su: *roasting* ad alta temperatura seguito da lisciviazione selettiva; processi elettrochimici di dissoluzione anodica dei REE in alternativa al *roasting*; estrazioni con liquidi ionici per il recupero di neodimio, disprosio e cobalto.
- REE4EU (2015-2019), che ha costruito il primo impianto pilota in Europa per il recupero di terre rare da rifiuti contenenti magneti. L'impianto è in grado di trattare 2

tonnellate di rifiuti, producendo leghe di terre rare e magneti permanenti con prestazioni equiparabili a quelle di magneti nuovi. Le tecnologie impiegate sono estrazione con liquidi ionici per recuperare le terre rare, sotto forma di ossalati, dai rifiuti, calcinazione per ottenere i REO ed elettrolisi ad alta temperatura per la produzione delle leghe.

Attualmente, oltre a ERMA, è ancora in corso il progetto SUSMAGPRO (2019-2023), che ha costruito quattro impianti pilota basati sulla tecnologia di riciclo *magnet-to-magnet* sviluppata dal progetto REMANENCE. Gli impianti sono situati in Svezia, Slovenia, Germania e Regno Unito.

Malgrado le alte rese di queste tecnologie, attualmente non sembrano esistere processi commerciali di riciclo di neodimio in Italia. La bassa percentuale è dovuta a molteplici fattori, sia di natura economica che tecnologica. Ad eccezione dei magneti permanenti di grandi dimensioni, come quelli presenti nei motori delle auto elettriche e nei generatori delle turbine eoliche, i magneti non vengono smantellati prima dei processi di trattamento dei rifiuti. La maggior parte dei dispositivi elettronici e degli elettrodomestici viene tritata una volta rimossi schermi, batterie e altri componenti pericolosi. A causa del forte magnetismo, i frammenti contenenti neodimio tendono ad attaccarsi alla frazione ferrosa dei rifiuti e anche ai macchinari utilizzati per la macinazione e gli altri processi di separazione fisica. In misura minore i frammenti tendono anche a essere persi nella frazione non ferrosa. Queste condizioni operative per il trattamento dei RAEE comportano una diluizione del neodimio, che non permette un recupero fattibile dal punto di vista economico. Inoltre, sono presenti anche difficoltà nell'integrazione economica di nuovi processi di riciclo con i processi esistenti per altri metalli. Una lega di neodimio o un suo semilavorato prodotto da materie prime vergini ha un costo inferiore rispetto al materiale riciclato dal complesso flusso di rifiuti. Un problema dal punto di vista tecnologico, è che molti processi sono ancora in scala di laboratorio e progettate per il trattamento di campioni di rifiuti relativamente puliti e omogenei. La pre-concentrazione di neodimio dai rifiuti risulta particolarmente difficile, in quanto non sono diffuse industrialmente tecnologie di smistamento selettive per singolo elemento. Inoltre, nel caso dei magneti permanenti, la separazione può essere ostacolata dallo strato protettivo metallico e dalla presenza di colla e viti tra il magnete e gli altri componenti del prodotto. Di conseguenza, il destino finale del neodimio è verosimilmente come impurezza all'interno dei metalli maggiormente riciclati, come dimostrato da uno studio effettuato su acciaio riciclato da veicoli a fine vita e rifiuti elettronici, che ha individuato una concentrazione media di 320 ppm di neodimio nei campioni analizzati (Bandara et al., 2015).

3 METODOLOGIE

3.1 Material Flow Analysis

L'analisi dei flussi di materia è una metodologia per identificare e quantificare i flussi e le riserve di risorse, sia materiali che immateriali (ad esempio, energia), all'interno di un sistema definito nello spazio e nel tempo. Il principio di conservazione della massa è alla base della metodica e perciò, tramite un sistematico bilanciamento degli input e degli output del sistema, è possibile caratterizzare le fonti, i percorsi e le perdite di un materiale. Il consumo o l'accumulo di beni, i flussi di rifiuti e i carichi ambientali diventano noti e le loro fonti possono essere identificate. È possibile individuare tendenze degli anni passati o prevedere scenari futuri, consentendo l'attuazione di azioni di correttive e di miglioramento di un sistema. Queste caratteristiche rendono l'MFA una metodologia attrattiva per gli *stakeholder* (portatori d'interesse) come strumento di supporto decisionale nella gestione delle risorse, dei rifiuti e dell'ambiente.

Per poter interpretare e utilizzare meglio i risultati ottenuti, può essere integrata con altri strumenti di quantificazione e valutazione come analisi energetiche, economiche, LCA e di *urban planning*, in modo da considerare, insieme ai flussi e alle riserve di materia, aspetti energetici e socio-economici che caratterizzano un sistema antropogenico. È applicabile ad un ampio numero di tematiche, tra cui il controllo di processo, la gestione delle acque reflue, il trattamento dei rifiuti, la conservazione e il recupero di risorse e la progettazione di prodotti.

Gli obiettivi di un'MFA sono:

- Determinare un sistema di flussi e riserve di materiali attraverso l'uso di termini ben definiti e uniformi.
- Ridurre il più possibile la complessità del sistema, ma preservando la completezza delle informazioni per garantire un solido processo decisionale.
- Applicare il principio di bilancio per stimare i flussi e le riserve più rilevanti, in termini quantitativi, e analizzare sensibilità e incertezze.
- Presentare i risultati sui flussi e sulle riserve di un sistema in un modo riproducibile, comprensibile e trasparente.
- Interpretare i risultati per individuare gli aspetti più critici e prioritari del sistema e utilizzarli per effettuare azioni preventive e correttive.

3.1.1 Terminologia e definizioni

L'uso di una terminologia specifica è un requisito fondamentale per rendere i risultati di un'MFA trasparenti, riproducibili e comparabili con i risultati di una MFA differente. Il termine “materiale” in un'MFA indica sia i beni che le sostanze.

Per il termine “sostanza”, l'MFA segue la definizione chimica, ossia un qualsiasi elemento o composto formato da unità uniformi. Tutte le sostanze sono caratterizzate da una composizione unica e identica e perciò sono omogenee. In un'MFA le sostanze possono essere definite come conservative o non-conservative. Una sostanza conservativa è definita come tale quando non è trasformata o distrutta in un processo. Ad esempio, in un processo di combustione, il cadmio può trasformarsi in cloruro di cadmio. Il cadmio metallico viene classificato come conservativo, in quanto non scompare, mentre il cloruro di cadmio è considerato non-conservativo all'interno del sistema indagato.

Un “bene” è una sostanza o una miscela di sostanze a cui è assegnato un valore economico dal mercato. Il valore può essere positivo (ad esempio della legna, acqua potabile, un'automobile) o negativo (rifiuti solidi urbani, fanghi di depurazione). In economia, la definizione include anche i beni immateriali, come l'energia, i servizi o le informazioni, ma per l'MFA comprende solo i beni materiali. I termini prodotto, merce o commodity possono essere usati come sinonimi, anche se tipicamente prodotto indica solo l'output di un processo, mentre merce e commodity indicano dei beni con un valore positivo e raramente sono applicati a beni con valori negativi. Il giro di affari dei beni è solitamente riportato dalle indagini statistiche (di governi, enti nazionali o internazionali, aziende e altri) e quindi è possibile ricavarne le informazioni per stabilire i bilanci di materia.

Il “sistema” è l'oggetto investigato dall'MFA. Un sistema comprende l'insieme di flussi di materiali, riserve e processi all'interno di confini ben definiti. I confini del sistema sono definiti nello spazio e nel tempo. Un sistema che interagisce con l'ambiente circostante, tramite scambi di materia o energia (import ed export), è definito “aperto”. Un sistema che non ha scambi con l'ambiente è definito “chiuso” in MFA. I confini spaziali possono essere confini geografici oppure limiti arbitrari, all'interno dei quali i processi sono collocati. Possono essere i confini di una nazione, di una città, di una azienda o i confini astratti del sistema di gestione di rifiuti di uno Stato. I confini temporali sono l'intervallo di tempo nel quale il sistema è investigato e bilanciato. Tipicamente è nell'ordine di grandezza degli anni, data la disponibilità di dati. Informazioni che coprono periodi di un anno sono facilmente recuperabili, considerando che

analisi di bilancio e altri tipi di rapporti vengono svolti annualmente. Il termine sistema può essere sostituito dal termine “ciclo” per i bilanci di materia sui sistemi più grandi, come continenti o il pianeta. Il termine scaturisce dai cicli biogeochimici degli elementi nella biosfera (ad esempio del carbonio, ossigeno, azoto).

Un “processo” è definito come il trasporto, la trasformazione o lo stoccaggio di materiali. Un processo può essere di origine naturale o antropica. Ad esempio, il movimento di fosforo disciolto in un fiume è un trasporto naturale, mentre il flusso di metano in una conduttura è un trasporto artificiale. Tipicamente, i processi vengono visualizzati come scatole nere, dove solo gli input e gli output sono considerati mentre il processo stesso è trascurato. Il modello della scatola nera non è applicato per i processi di stoccaggio, dove sia la velocità di cambio della riserva (accumulo o consumo) sia la massa della riserva sono necessari alla descrizione del processo.

Le “riserve” sono depositi di materiale all’interno del sistema analizzato, rappresentate da una scatola piccola contenuta all’interno della scatola nera di un processo (**Figura 3.1**). Una riserva può incrementare le sue quantità, ossia avere un accumulo di materiali, o diminuirle, quindi avere un consumo di materiali.

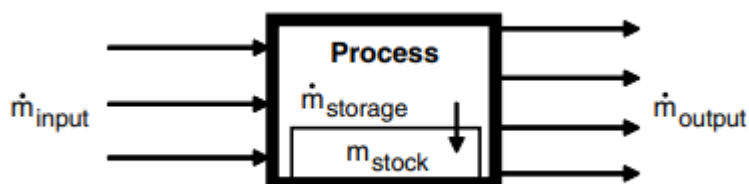


Figura 3.1 Esempio di un processo con una riserva e molteplici input e output.

I processi sono collegati tra loro dalle “portate” o dai “flussi”. Una portata è definita come la quantità di materia che attraversa nell’unità di tempo una sezione trasversale. Un flusso può essere considerato una portata specifica e corrisponde alla quantità di materia per unità di tempo e sezione. In un’MFA si fa riferimento alla quantità in massa e perciò le grandezze fisiche sono, rispettivamente, massa su tempo e massa su tempo e area. Le portate e i flussi che attraversano i confini della scatola di un processo sono detti input e output. Le portate e i flussi che entrano ed escono dal sistema sono chiamati importazioni ed esportazioni. Nel presente elaborato il termine flusso verrà utilizzato per indicare entrambe le grandezze fisiche.

Un’“attività” comprende un insieme di sistemi costituiti da flussi, riserve e processi di molti materiali che sono necessari a soddisfare un bisogno fondamentale dell’uomo, come il bisogno

di nutrirsi, di risiedere e di comunicare. La nozione di attività è utile per poter valutare e progettare nuovi processi e sistemi antropogenici. Quando scenari alternativi vengono sviluppati per un'attività, l'MFA può aiutare nell'identificazione dei principali cambiamenti nelle riserve e flussi di materiali.

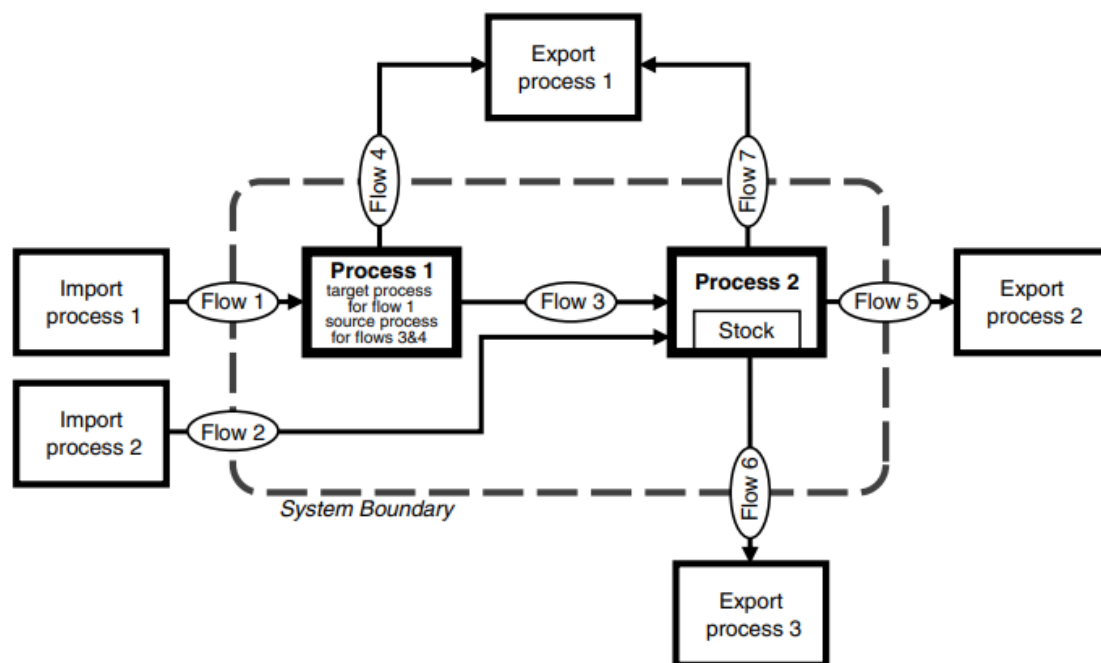


Figura 3.2 Esempio di schema di un sistema di MFA.

3.1.2 Procedura/Fasi

La procedura di un'MFA non ha un ordine rigido, le varie fasi non devono essere necessariamente eseguite in maniera consecutiva. È un processo iterativo e perciò le scelte e le disposizioni prese durante il corso dell'MFA devono essere verificate continuamente e affinate fino a ottenere la qualità desiderata del modello. In generale, un'MFA comincia con la definizione del problema e degli obiettivi. Dopodiché vengono identificate le sostanze più rilevanti, fissati i confini di sistema appropriati e selezionati i processi e i beni da analizzare. Poi, i flussi in massa dei beni e le concentrazioni della sostanza nei flussi vengono valutati. Si ha il calcolo dei flussi e delle riserve della sostanza e viene svolta l'analisi delle sensibilità e delle incertezze. Infine i risultati e le conclusioni vengono presentate in modo da dare un quadro del ciclo antropogenico della sostanza e fornire informazioni di supporto ai decisori. La **Figura 3.3** riassume la procedura.

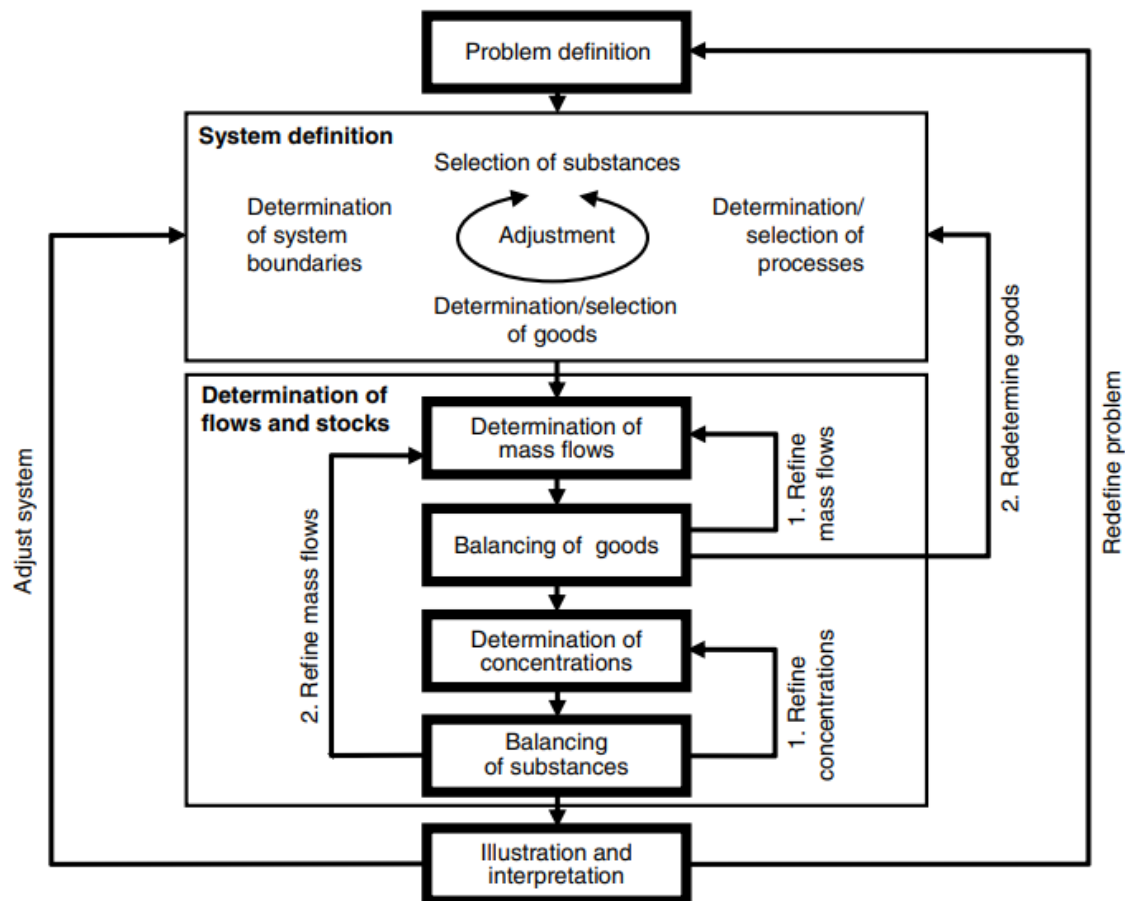


Figura 3.3 Procedura iterativa di un'MFA

3.1.2.1 Selezione delle sostanze

Diversi sono gli aspetti da considerare per la selezione delle sostanze da analizzare. La selezione dipende dallo scopo dell'MFA, il tipo di sistema considerato, il grado di precisione desiderato e le risorse disponibili (finanziarie, temporali e umane) per lo studio di MFA. Uno degli obiettivi dell'MFA è di ridurre il più possibile il numero di parametri da considerare e un approccio per realizzare ciò è l'uso degli elementi indicatori. Un elemento indicatore rappresenta un gruppo di sostanze con caratteristiche fisiche, chimiche e/o biochimiche simili tra loro. L'elemento indicatore può essere utilizzato per prevedere il comportamento delle altre sostanze, riducendo il numero richiesto di dati e calcoli. La **Tabella 3.1** elenca una lista di elementi indicatori usati frequentemente in un'MFA. Esistono tanti altri approcci per la scelta delle sostanze rilevanti per un'MFA, come ad esempio riferirsi alle sostanze regolate dalle normative.

Indicator Element	Symbol	Relevant Activity ^a	Properties
Carbon (organic)	C _{org}	N, R&W, C, T&C	Carrier of chemical energy Carrier of nutrients Main matrix element in many toxic compounds
Nitrogen	N	N, C, T&C	As NO ₃ ⁻ , an essential nutrient As NO _x , a potential air pollutant As NH ₄ ⁺ and NO ₂ ⁻ , toxic for fish Eutrophication of aquatic ecosystems
Fluorine	F	C	As F ⁻ , a strong inorganic ligand In incineration, HF is formed, a strong acid
Phosphorous	P	N, C	As PO ₄ ³⁻ , an essential nutrient Eutrophication of aquatic ecosystems
Chlorine	Cl	N, C	Forms as Cl ⁻ , soluble salts Forms stable, sometimes toxic chloro-organic compounds (e.g., PCB and dioxins)
Iron	Fe	R&W, T&C	Forms as Fe ³⁺ , poorly soluble oxides, and hydroxides As metal, easily oxidized under atmospheric conditions (H ₂ O and CO ₂) Recycling of metallic iron is economical Resource in construction
Copper	Cu	R&W, C, T&C	Forms as Cu ²⁺ , stable complexes with organic ligands As metal, an important electrical conductor Even in small concentrations, toxic for unicellular organisms Resource in construction
Zinc	Zn	R&W, C	Forms as Zn ²⁺ , soluble salts Important anticorrosive and rubber additive Atmophile Resource in construction
Cadmium	Cd	C, T&C	Stabilizer for PVC, pigment, anticorrosive Constituent of rechargeable batteries Toxic for humans and animals, less so for plants Atmophile
Mercury	Hg	C	Forms metal-organic and toxic compounds under reduced conditions Atmophile and liquid metal
Lead	Pb	R&W, C, T&C	Forms as Pb ²⁺ , stable complexes with natural organic ligands Lithophile element Was and still is an important additive in gasoline

^a N, to nourish; R&W, to reside and work; C, to clean; T&C, to transport and communicate.

Tabella 3.1 Elementi indicatori comunemente applicati in una MFA. N: per nutrirsi; R&W: per risiedere e lavorare; C: per pulire; T&C: per il trasporto e comunicare (Brunner & Rechberger, 2004).

3.1.2.2 Determinazione dei confini spaziali e temporali

I confini spaziali sono tipicamente determinati dall'obiettivo del progetto. Come già accennato nel paragrafo 3.1.1, i confini spesso coincidono con una regione amministrativa, come nazioni, regioni o città, in quanto le informazioni vengono raccolte sistematicamente a questi livelli. Oltre a rendere la raccolta di dati più semplice, la scelta di spazi definiti politicamente permette

agli stakeholder di implementare più facilmente le misure basate sui risultati della MFA. Altri esempi di confini spaziali usati nella MFA sono i confini di una regione idrologica, come il bacino idrografico di un fiume, oppure del terreno di una azienda. In generale lo spazio dovrebbe essere scelto per essere il più piccolo e consistente possibile pur rimanendo sufficiente ampio da poter includere tutti i processi e flussi di materiali necessari al sistema.

I confini temporali sono relativamente più semplici da scegliere, specialmente se sono di interesse i flussi e le riserve medie lungo un grande periodo di tempo. In tal caso, l'intervallo di tempo scelto deve essere sufficientemente ampio da superare l'instabilità temporanea iniziale del sistema. D'altra parte, la scelta di periodi di tempi più brevi ha il vantaggio di poter rilevare anomalie a breve termine.

3.1.2.3 Identificazione dei flussi, riserve e processi rilevanti

La raccolta e gestione dei dati sono tra i compiti più importanti e dispendiosi di una MFA. In base alle sostanze e ai confini selezionati, vengono individuati i beni da investigare e i loro flussi. Informazioni sui flussi di materia sono tipicamente ottenute da rapporti nazionali o aziendali, oppure dalla letteratura. A volte è necessario stimare dei dati contattando delle associazioni o esperti del settore e, se le risorse disponibili per la MFA lo permettono, i flussi dei beni e le concentrazioni delle sostanze possono essere misurati direttamente. Le fonti di dati comunemente impiegate in una MFA includono:

- Uffici e agenzie regionali nazionali o internazionali.
- Banche dati ufficiali.
- Agenzie per la protezione dell'ambiente.
- Associazioni industriali.
- Associazioni dei consumatori.
- Società professionali.
- Dati proxy (sono dati di un sistema simile applicabili in caso di assenza di dati).
- Misurazioni dirette.
- Pubblicazioni scientifiche.
- Assunzioni personali.

Il numero di processi necessari alla descrizione del sistema dipende dalla sua complessità e dagli obiettivi dello studio. Per aumentare il grado di dettaglio, un processo può essere diviso in dei sottoprocessi. Per rendere più chiaro il modello, più processi possono essere uniti in un singolo processo (**Figura 3.4**).

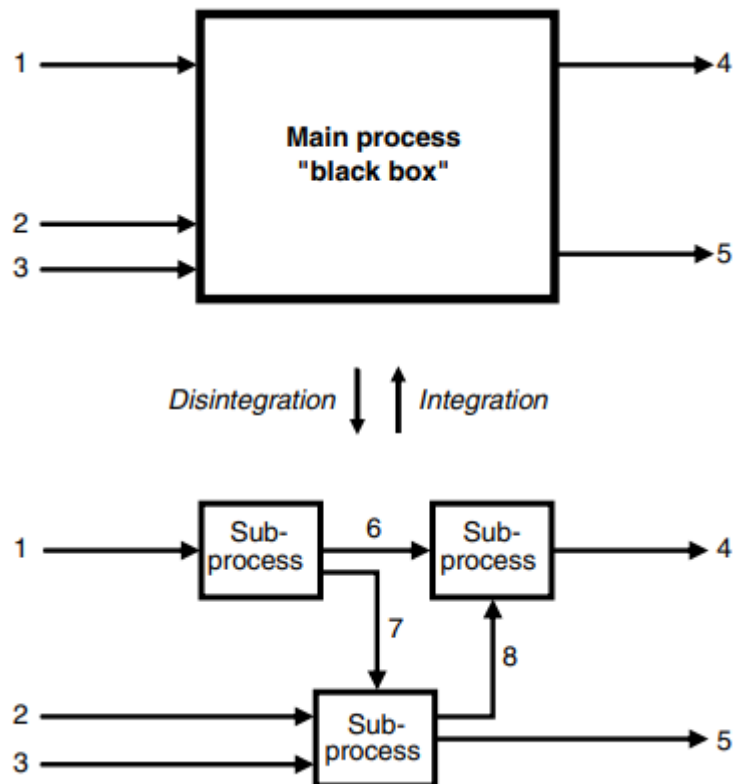


Figura 3.4 Scomposizione di un processo in sottoprocessi e viceversa.

La **Figura 3.5** riporta un esempio di ciclo di vita di un metallo. Nella maggior parte dei casi, le riserve nei processi di raffinazione, fabbricazione, manifattura e riciclo non risultano rilevanti, dato che i materiali si muovono rapidamente da questi processi e perciò le quantità accumulate risultano piccole e trascurabili nel medio-lungo termine.

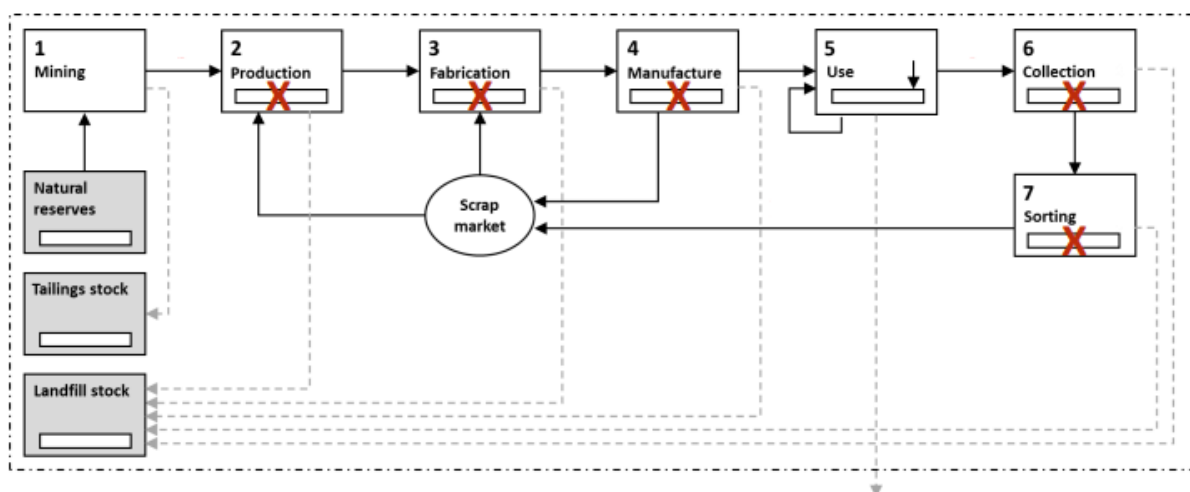


Figura 3.5 Ciclo di vita di un metallo generico. Le riserve segnate con una croce sono ritenute trascurabili.

3.1.2.4 Valutazione dei flussi e delle riserve della sostanza, bilanci di massa

La quantificazione dei flussi e delle riserve è il compito principale di una MFA e si compie utilizzando i bilanci di materia dei flussi per ogni processo, in accordo al principio di conservazione della massa. Il bilancio di materia per un processo generico (**Figura 3.6**) è descritta nell'**Eq. (3.1)**.

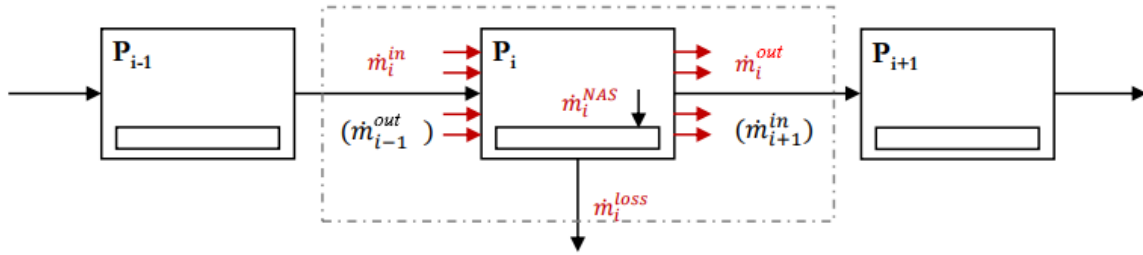


Figura 3.6 Bilancio di massa per un processo generico.

$$\sum \dot{m}_i^{in} = \dot{m}_i^{loss} + \sum \dot{m}_i^{out} + \dot{m}_i^{NAS} \quad (3.1)$$

Dove: $\sum \dot{m}_i^{in}$ è la sommatoria dei flussi in entrata nel processo i; $\dot{m}_i^{loss}$ è la perdita di materiale nel processo i; $\sum \dot{m}_i^{out}$ è la sommatoria dei flussi in uscita dal processo i; $\dot{m}_i^{NAS}$ è l'addizione netta alla riserva nel processo i.

Il calcolo della perdita di materiale dal processo i si calcola con la seguente equazione (**Eq. (3.2)**):

$$\dot{m}_i^{loss} = \dot{m}_i^{in} \cdot r_i^{loss} \quad (3.2)$$

r è il coefficiente di perdita del materiale dal processo i.

La quantità nella riserva può essere determinata con due approcci. Il primo è una misurazione diretta della massa (o volume e densità della riserva) ed è usato per riserve che non cambiano significativamente nel tempo (ad esempio riserve naturali). Approssimativamente, una riserva non cambia velocemente se:

$$\frac{\dot{m}_{storage}}{m_{stock}} < 0,01 \quad (3.3)$$

Dove $\dot{m}_{storage}$ è la variazione della riserva e m_{stock} è la riserva totale.

Il secondo approccio è preferito per riserve che cambiano velocemente (**Eq. 3.4**), caratteristico delle attività antropogeniche, e consiste nel calcolare la quantità nella riserva per differenza tra

gli input e output del processo lungo un ampio arco temporale (**Eq. 3.5**). L'ampio arco temporale permette di assumere che la riserva iniziale (m_{stock} a t_0) di materiale sia nulla.

$$\frac{\dot{m}_{\text{storage}}}{m_{\text{stock}}} > 0,05 \quad (3.4)$$

$$m_{\text{stock}} = \int_{t_0}^t \frac{dm_{\text{stock}}(t)}{dt} = \int_{t_0}^t \dot{m}_i^{\text{in}} - \int_{t_0}^t \dot{m}_i^{\text{out}} + m_{\text{stock}}(t_0) \quad (3.5)$$

L'introduzione di equazioni differenziali e della variabile tempo richiede l'utilizzo di un modello dinamico di MFA, descritto in dettaglio nel paragrafo successivo 3.1.3.

I flussi della sostanza ($\dot{X}_{ij}$), indotti dai flussi dei beni, vengono calcolati applicando ai flussi dei beni ($\dot{m}_i$) la concentrazione della sostanza nel bene (C_{ij}), come fattore di conversione (**Eq. 3.6**).

$$\dot{X}_{ij} = \dot{m}_i \cdot C_{ij} \quad (3.6)$$

La tabella **Tabella 3.2** è un esempio semplificato della struttura usata nei fogli di calcolo per un modello di MFA.

Goods	Flow Rate, t/year	Concentration of Substance $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$, mg/kg					Substance Flow Rate $S_1, S_2, S_3, \dots, S_n$, kg/year				
G_1	$\dot{m}_1$	c_{11}	c_{12}	c_{13}	$\dots$	c_{1n}	$\dot{X}_{11}$	$\dot{X}_{12}$	$\dot{X}_{13}$	$\dots$	$\dot{X}_{1n}$
G_2	$\dot{m}_2$	c_{21}	c_{22}	c_{23}	$\dots$	c_{2n}	$\dot{X}_{21}$	$\dot{X}_{22}$	$\dot{X}_{23}$	$\dots$	$\dot{X}_{2n}$
G_3	$\dot{m}_3$	c_{31}	c_{32}	c_{33}	$\dots$	c_{3n}	$\dot{X}_{31}$	$\dot{X}_{32}$	$\dot{X}_{33}$	$\dots$	$\dot{X}_{3n}$
$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\vdots$	$\dots$	$\vdots$
G_k	$\dot{m}_k$	c_{k1}	c_{k2}	c_{k3}	$\dots$	c_{kn}	$\dot{X}_{k1}$	$\dot{X}_{k2}$	$\dot{X}_{k3}$	$\dots$	$\dot{X}_{kn}$

Tabella 3.2 Struttura semplificata dei fogli di calcolo per un modello di MFA (Brunner & Rechberger, 2004).

3.1.3 Riserva della fase d'uso e modello dinamico

La determinazione della riserva nella fase d'uso è estremamente importante, in quanto costituisce una potenziale risorsa a supporto della produzione primaria. La riserva in uso rappresenta la quantità di materiale incorporata nella nostra società, all'interno di prodotti, costruzioni, infrastrutture e altre riserve antropogeniche. È quindi una *urban mine* (miniera urbana) dalla quale è possibile estrarre materia prima tramite riciclo, ma può essere vista anche come una fonte a lungo termine di inquinanti per l'ambiente. L'alta potenzialità dell'*urban mining* è legata alle concentrazioni degli elementi presenti nelle riserve antropogeniche, che possono risultare comparabili o superiori a quelle delle miniere naturali. Però, in confronto all'estrazione tradizionale, il materiale nella riserva in uso non è accessibile in qualsiasi

momento, ma la sua disponibilità dipende dai tempi di vita dei beni in cui è incorporato. Il tempo di vita utile di un bene causa una discrepanza temporale tra il flusso in entrata nello stadio d'uso e il flusso in uscita, ossia il flusso di rifiuti potenzialmente riciclabile (**Figura 3.7**). Tramite la valutazione della riserva è possibile tenere in considerazione di questa discrepanza e ottenere informazioni più dettagliate sul fine vita dei prodotti: l'anno in cui diventeranno disponibili per il riciclo, le quantità generate, i prodotti e settori in cui è contenuto la sostanza d'interesse. Informazioni fondamentali per poter impostare strategie di recupero e riciclo su larga scala.

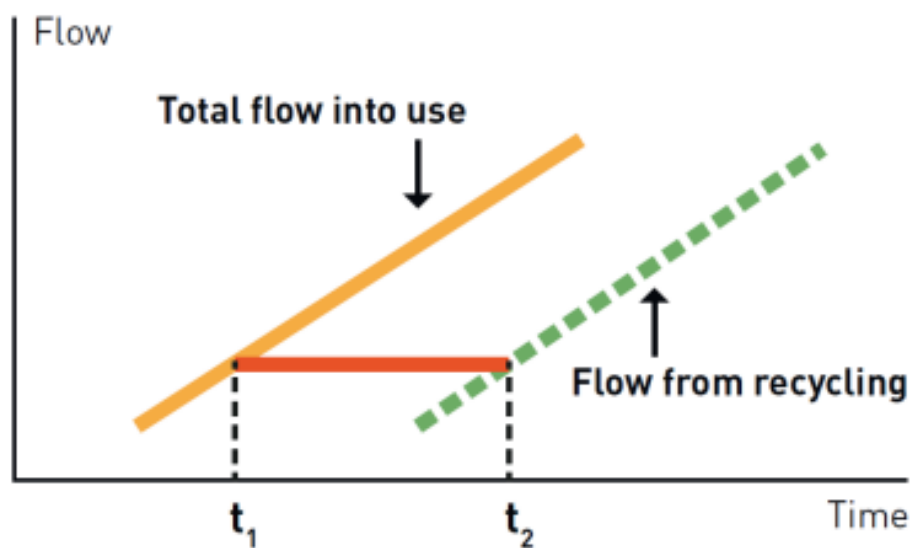


Figura 3.7 Flusso totale in entrata nella fase d'uso e flusso secondario dal riciclo. Il tempo tra t_1 e t_2 corrisponde al tempo di vita utile del prodotto.

Per poter valutare la riserva totale in uso è necessario applicare un modello dinamico di MFA. Un modello di MFA è definito statico quando tutti i flussi e le riserve analizzati fanno riferimento a un singolo periodo di tempo, comunemente un anno, per ottenere una “fotografia istantanea” del sistema (**Figura 3.8**). L'MFA statica ricava informazioni sul ciclo di vita del materiale, sui flussi e le riserve, le percentuali di raccolta dei rifiuti e altri indicatori di prestazione. Il difetto del modello statico è che non permette di valutare la riserva totale in uso, ma soltanto la quantità aggiunta in quel periodo alla riserva.

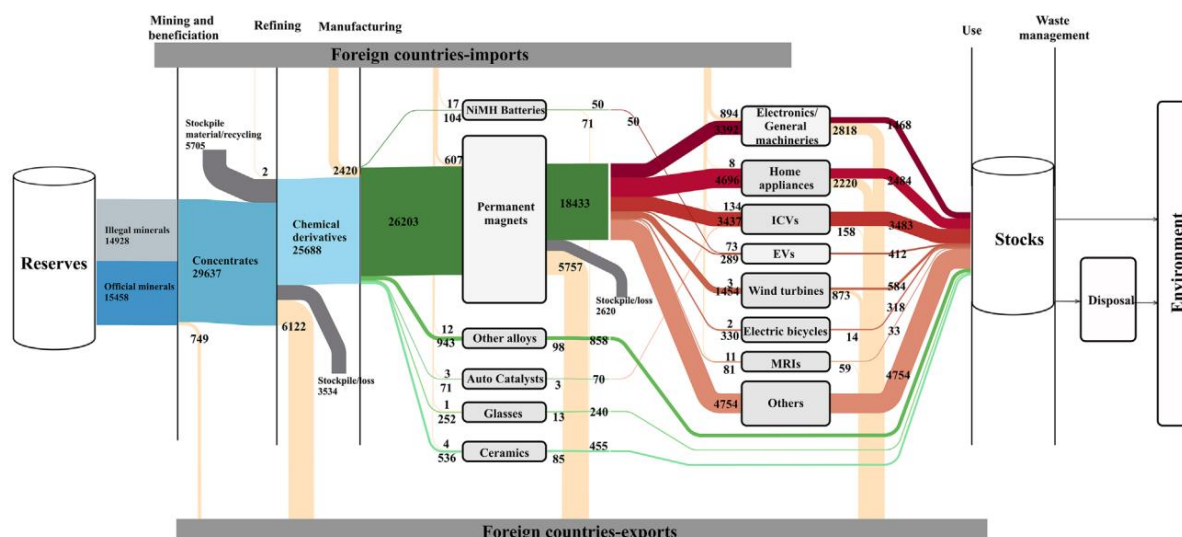


Figura 3.8 Flussi di materia del neodimio in Cina nel 2016, unità di misura: t di Nd (Geng et al., 2021).

Un modello dinamico di MFA (*dynamic material flow analysis*, dMFA) consente di descrivere i flussi e le riserve di materiali lungo diversi intervalli di tempo. Può essere retrospettiva, analizzando dati storici per valutare il sistema, o prospettiva, stimando i flussi e le riserve nel futuro tramite estrapolazione di dati, o una combinazione di entrambe le tipologie. Il modello retrospettivo è quello più frequentemente utilizzato, data la quantità maggiore di dati disponibili. La quantificazione della riserva in uso può essere eseguita tramite i metodi top-down o bottom-up. L'approccio top-down calcola l'aggiunta netta alla riserva dai bilanci di massa (**Eq. 3.1**) e dall'integrazione di anno in anno dei bilanci si ottiene la quantità totale accumulata nella riserva (**Eq. 3.5**). Il metodo bottom-up utilizza informazioni sul contenuto della sostanza nei diversi prodotti e servizi e insieme ai dati di censimento sul numero di prodotti e servizi, nell'area del sistema, determina la riserva in uso. Il metodo top-down è l'approccio preferito in letteratura (Müller et al., 2014), in particolare su scala nazionale o globale, dove c'è una maggiore disponibilità di dati sulla produzione, manifattura, importazione ed esportazione. Invece, il metodo bottom-up è preferito su una scala più locale (ad esempio, una città).

La risoluzione dei bilanci di materia per la determinazione della riserva in uso richiede la conoscenza dei flussi in entrata e in uscita della fase d'uso. I dati per i primi sono spesso documentati, ma i flussi in uscita sono raramente misurati. Per stimare la quantità dell'output viene impiegata una funzione di risposta impulsiva (*impulse-response function*, IRF). La IRF calcola l'uscita da un sistema dinamico dovuta a degli input detti impulsi, come ad esempio, l'entrata di prodotti nella fase d'uso in un determinato anno. Ogni impulso crea degli output

dopo alcuni anni e la loro somma fornisce l'output totale, ovvero una stima della quantità di materia generata al termine della fase d'uso sotto forma di rifiuto o prodotto a fine vita (**Figura 3.9**). Esistono due modelli di IRF per la determinazione del flusso di rifiuti: il modello dei tempi di vita o di ritardo; e il modello di lisciviazione o declino esponenziale. Il primo modella il fine vita del prodotto come un input dilazionato sul suo tempo di vita. Può utilizzare tempi di vita “fissi” o distribuzioni di probabilità (**Eq. 3.7**). Il modello di lisciviazione modella le perdite durante l'uso in funzione delle quantità nella riserva. È applicato principalmente per le emissioni di contaminanti.

$$\dot{m}_i^{\text{out}}(t) = \int_{t_0}^t L(t, t') \cdot \dot{m}_i^{\text{in}}(t') dt \quad (3.7)$$

$L(t, t')$ descrive la probabilità che il prodotto entrato nella fase d'uso al tempo t' diventi rifiuto al tempo t .

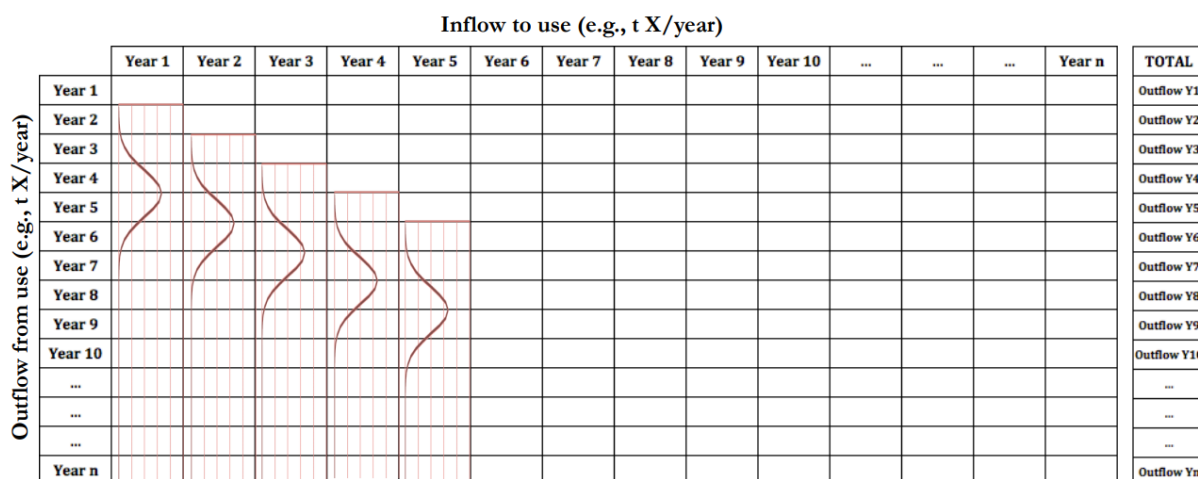


Figura 3.9 Modello di distribuzione dei tempi di vita. La somma degli flussi in uscita in una riga fornisce la quantità totale di rifiuti generati in un anno.

3.1.4 Analisi d'incertezza e sensibilità

I calcoli e risultati di un modello di MFA sono influenzati da incertezze, dovute a quella intrinseca dei dati e all'incertezza della rappresentatività e completezza del modello. I dati raccolti provengono da molte fonti differenti con un'attendibilità dei dati variabile e spesso sono valori singoli di cui è difficile valutarne l'incertezza. In questi casi, l'incertezza del valore può essere stimata valutandone la fonte o il contesto da cui il dato è stato ottenuto. Nel caso in cui siano presenti più valori per la stessa entità è possibile utilizzare medie, deviazioni standard, mediane, valori percentili e altri strumenti della statistica classica.

Quando due variabili casuali vengono utilizzate in una funzione, il risultato è un'altra variabile casuale. Per tenere in considerazione di questa propagazione delle incertezze, i metodi comunemente applicati in una MFA sono la legge di propagazione degli errori di Gauss e la simulazione di Monte Carlo.

L'analisi di sensibilità permette di valutare la rilevanza delle incertezze, mostrando come i risultati del modello vengono influenzati dalle modifiche sui parametri e verificando la robustezza del modello. Il metodo più semplice per eseguire un'analisi di sensibilità è quello di cambiare un solo parametro alla volta e misurarne l'effetto. Cambiando una sola variabile e mantenendo tutte le altre costanti, si calcolano i risultati e si confrontano con il modello iniziale. Dopodiché l'analisi è ripetuta per le altre variabili.

3.2 Life Cycle Assessment

La valutazione del ciclo di vita è una metodologia internazionalmente standardizzata dalla serie di norme ISO 14040-14044 (International Standard Organisation, 2006), in cui è riportata la seguente definizione, originariamente proposta nel 1993 dalla SETAC (Society of Environmental Toxicology and Chemistry): “Una LCA è un processo oggettivo di valutazione dei carichi ambientali connessi con un prodotto, un processo o una attività, attraverso l'identificazione e la quantificazione dell'energia e dei materiali usati e dei rifiuti rilasciati nell'ambiente, per valutare l'impatto di questi usi di energia e di materiali e dei rilasci nell'ambiente e per valutare e realizzare le opportunità di miglioramento ambientale. La valutazione include l'intero ciclo di vita del prodotto, processo o attività, comprendendo l'estrazione e il trattamento delle materie prime, la fabbricazione, il trasporto, la distribuzione, l'uso, la manutenzione, il riuso, il riciclo e lo smaltimento finale”. L'ISO 14040 descrive i principi e la struttura di una LCA, mentre l'ISO 14044 specifica i requisiti e le linee guida per effettuare uno studio di LCA. L'approccio sistematico della LCA permette di ottenere miglioramenti dal punto di vista ambientale per l'oggetto studiato senza trasferire gli impatti altrove o più avanti nel tempo. È un importante strumento di supporto decisionale, particolarmente adatto alle politiche di sviluppo sostenibile e presenta un ampio campo di applicazioni, risultando interessante sia per il settore amministrativo che quello produttivo privato. Le applicazioni comuni di una LCA includono:

- l'identificazione di opportunità di miglioramento, dal punto di vista ambientale, identificando gli stadi più impattanti del ciclo di vita di un prodotto;
- confrontare scenari alternativi o prodotti diversi che svolgono funzioni simili;

- dare un quadro più complessivo delle interazioni tra l'ambiente e le attività umane;
- la definizione di indicatori rilevanti di prestazioni ambientali;
- comunicazione di informazioni ambientali e marketing (ad esempio dichiarazioni ambientali, etichette ecologiche).

L'integrazione delle metodologie MFA e LCA permette di superare i limiti e gli svantaggi che caratterizzano i singoli metodi, rendendo il modello più completo. La valutazione degli impatti ambientali della LCA può essere applicata ai risultati di un'MFA, mentre quest'ultima può essere vista come un metodo per la costruzione di un inventario per una LCA. Una certa discrepanza può nascere dal fatto che la LCA tende a valutare il maggior numero possibile di sostanze e composti, a differenza dell'MFA che si focalizza sul minor numero di sostanze per garantire gestibilità e comprensibilità.

3.2.1 Struttura della valutazione del ciclo di vita

La struttura di una LCA è divisa in quattro fasi principali:

1. Definizione degli scopi e degli obiettivi (*Goal and Scope definition*): è la parte preliminare in cui viene definito l'obiettivo dello studio e il sistema studiato.
2. Analisi di inventario (*Life Cycle Inventory, LCI*): è la fase di quantificazione degli input e output di energia e materia del sistema.
3. Analisi degli impatti (*Life Cycle Impact Assessment, LCIA*): si ha l'elaborazione dell'inventario e la stima degli impatti ambientali causati dagli input e output.
4. Interpretazione e miglioramento (*Life Cycle interpretation*): è la parte finale di una LCA, nella quale si traggono le conclusioni e raccomandazioni dello studio.

Come per l'MFA, la metodologia è dinamica e iterativa e perciò durante l'analisi le varie fasi, i dati raccolti e i calcoli eseguiti vengono continuamente revisionati e aggiornati. La **Figura 3.10** riporta lo schema proposto dalla ISO 14040.

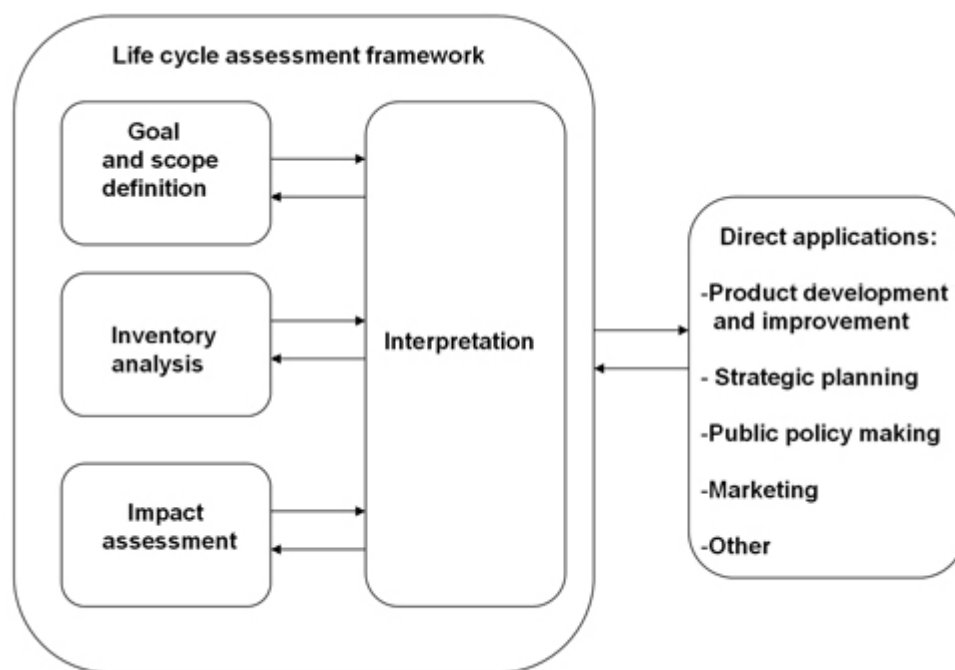


Figura 3.10 Struttura della LCA e possibili applicazioni (ISO 14040, 2006).

3.2.1.1 Definizione degli obiettivi e del campo di applicazione

Uno studio di LCA modella il ciclo di vita del prodotto o servizio analizzato. Un modello è una semplificazione della realtà e, di conseguenza, porta con sé delle approssimazioni e semplificazioni. Per garantire che le scelte e le ipotesi fatte durante la modellazione non influenzino negativamente i risultati, è fondamentale affermare all’inizio le finalità dello studio. L’oggetto dello studio, le applicazioni previste, le motivazioni e il tipo di pubblico a cui è destinato vengono stabiliti con chiarezza in questa fase preliminare. Tra le caratteristiche dello studio fortemente influenzate dalle finalità sono presenti: l’ampiezza del ciclo di vita, le eventuali alternative da considerare, la qualità e affidabilità dei dati a disposizione, la scelta dei parametri ambientali con cui riassumere i risultati, l’estensione della fase di valutazione e di miglioramento, il livello di dettaglio a cui arrivare.

In questa prima fase della LCA è importante definire l’“unità funzionale”, che è una misura di riferimento della prestazione del sistema studiato. È la base di calcolo per i flussi in entrata e uscita e permette di comparare tra loro i risultati di diversi sistemi. La scelta dell’unità funzionale dipende dallo scopo della LCA e può risultare complicata, dato che le unità di misura normalmente usate (massa, volume, numero di prodotti, ...) non sempre sono idonee a rappresentare la funzione di un processo produttivo. Ad esempio, se l’obiettivo di una LCA è il confronto tra delle vernici per pareti, l’unità funzionale potrebbe essere i metri quadrati per una durata minima e con una determinata percentuale di opacità. Il chilogrammo di vernice non

offrirebbe informazioni e comparabilità sulle funzioni delle vernici, di protezione e di colorazione della parete. In questa fase vengono anche definiti i confini del sistema e il diagramma di flusso. Come per un sistema di MFA, i confini possono essere geografici o temporali oppure possono riferirsi agli stadi del ciclo di vita del prodotto: se si considera l'intero ciclo, i limiti sono definiti "*from cradle to grave*" (dalla culla alla tomba); se l'analisi si conclude al termine del processo produttivo si parla di "*from cradle to gate*" (dalla culla all'uscita dello stabilimento). In base ai confini selezionati, i criteri per l'inclusione o esclusione degli input e output vengono scelti. Le soglie di inclusione possono essere imposte in base al contributo percentuale sulla massa o sull'energia totale dei flussi o sugli impatti ambientali totali.

3.2.1.2 Analisi di inventario

Dalla fase di definizione degli obiettivi e del campo di applicazione è possibile individuare i dati richiesti per l'inventario. Il sistema prodotto può essere visto come un insieme di operazioni unitarie, che si intrecciano tra loro e con l'ambiente attraverso gli input e gli output. Nell'analisi di inventario si ha la raccolta dei dati su questi flussi e la loro normalizzazione sull'unità funzionale, ossia la quantificazione relativa all'unità scelta. La raccolta dati avviene in maniera analoga a quanto descritto nel paragrafo 3.1.2.3 per l'MFA e anche per uno studio di LCA risulta essere la fase più esigente. In questa fase non sono compresi analisi, valutazioni o giudizi sugli effetti ambientali provocati dai flussi del sistema. L'inventario fornisce dati quali- e quantitativi, che nelle fasi successive verranno elaborati e discussi.

Un'operazione importante dell'analisi di inventario è la procedura di allocazione dei dati. L'allocazione è la distribuzione dei carichi ambientali ed energetici del sistema ai vari coprodotti e sottoprodotti. Se il sistema studiato è un processo per la manifattura di un solo prodotto, il problema dell'allocazione non si pone, ma spesso a livello industriale un singolo processo produce più prodotti. In questi casi l'allocazione potrebbe essere evitata dividendo il processo in più sottoprocessi, di cui si raccolgono i dati per gli input e gli output per ciascuno. Questo approccio può risultare complesso, dato che, per esempio, raramente vengono misurati l'elettricità e il calore consumato per ogni linea di produzione in un'azienda. Quando la suddivisione non è possibile, è necessario applicare una forma di allocazione. Una possibilità è la ripartizione dei flussi sulla base delle caratteristiche fisiche dei prodotti, come massa o volume. Se non è possibile stabilire una relazione fisica come base per l'allocazione, un altro approccio possibile è l'allocazione economica. La normativa ISO suggerisce l'allocazione economica come ultima opzione, in quanto i fenomeni chimici e fisici che governano i processi

produttivi non sono vincolati da considerazioni economiche, sebbene queste ultime siano essenziali per la sostenibilità di un processo. Per tale motivo, un'allocazione economica è spesso usata nella pratica, consentendo di esprimere l'importanza relativa di un output e di marcare una distinzione più netta tra rifiuti e prodotti (Goedkoop et al., 2016). Gli svantaggi dell'allocazione economica sono la fluttuazione dei prezzi, che può influenzare significativamente i risultati, e non sempre informazioni (aggiornate) sui prezzi sono fornite dai produttori.

3.2.1.3 Analisi degli impatti

Nell'analisi degli impatti i dati dell'inventario vengono elaborati e si ha la quantificazione degli impatti in relazione all'ambiente, alla salute umana e alla disponibilità di risorse. Nella maggior parte degli studi di LCA non viene sviluppata una metodologia propria di valutazione degli impatti, ma viene selezionata una metodologia standard e universalmente accettata dalla comunità scientifica (**Figura 3.11**).

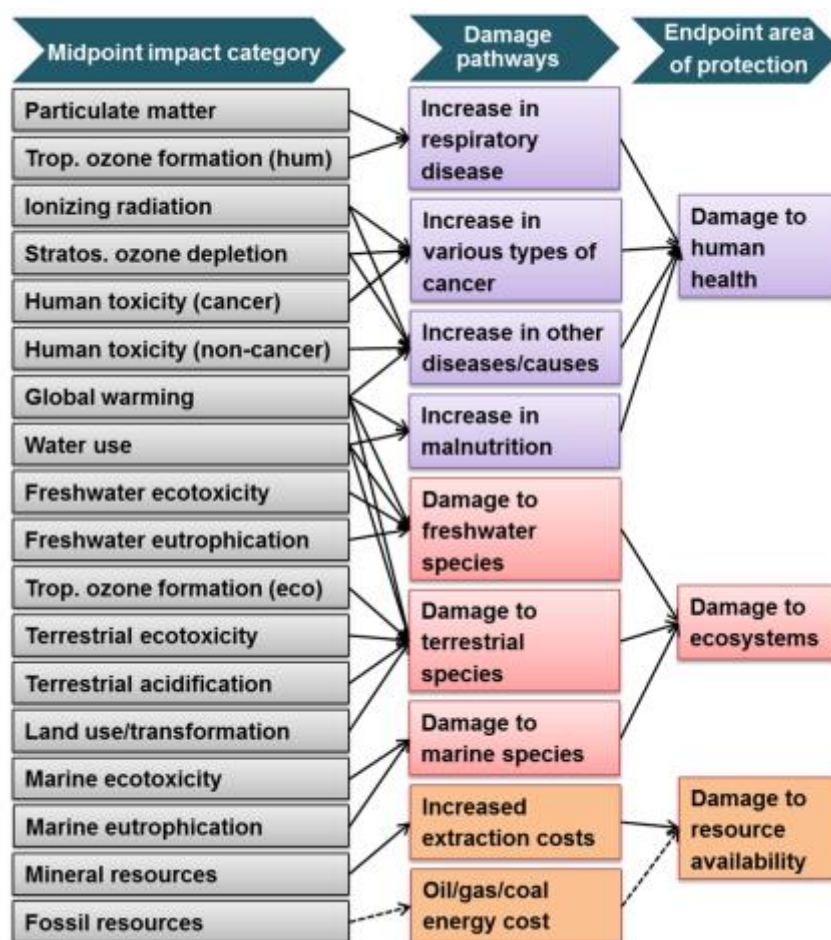


Figura 3.11. Categorie della metodologia ReCiPe 2016. Le categorie midpoint presentano un'incertezza minore rispetto a quelle endpoint, dato che la modellazione risulta più semplice (National Institute for Public Health and the Environment).

Le norme ISO definiscono come elementi obbligatori dell'analisi di impatti:

1. La selezione e definizione delle categorie di impatto ambientale (ad esempio, effetto serra, acidificazione, eutrofizzazione, ...).
2. La classificazione, che consiste nell'assegnazione dei risultati della fase di inventario alle categorie scelte.
3. La caratterizzazione, ossia il calcolo dei risultati per ogni categoria tramite opportuni fattori di caratterizzazione.

Quindi, il primo passaggio di questa fase è la scelta delle categorie di impatto (o effetti ambientali), a cui sono assegnati dei fattori di caratterizzazione, che stimano il potenziale impatto di ogni sostanza a quella categoria, espressi per unità di sostanza equivalente. Questi fattori presentano un grado di incertezza in base alla categoria considerata. Nel caso di impatti su scala globale, come effetto serra e riduzione dell'ozono stratosferico, l'incertezza dei fattori risulta essere bassa, in quanto la conoscenza della dinamica degli inquinanti all'origine di questi fenomeni è elevata. Invece, per impatti su scala locale, come eutrofizzazione e acidificazione, l'incertezza risulta più alta dato che non vengono considerate le variabili locali (ad esempio, condizioni dei flussi d'acqua, condizioni meteorologiche).

Una volta selezionate le categorie di impatto, si ha l'operazione di classificazione, che consiste nell'assegnare i flussi dell'inventario alle categorie scelte. Un flusso può contribuire a più categorie di impatto, come mostrato in **Tabella 3.3**.

Elementary flow	Climate change	Ozone layer depletion	Eutrophication
1 kg CO ₂ (Carbon dioxide)	X		
100 gram CH ₄ (methane)	X		
1 gram CFC142b	X	X	
5 gram NO ₂ (nitrogen dioxide)			X

Tabella 3.3 La classificazione colloca i risultati della fase di LCI nelle tre categorie di impatto ambientale considerate. Il CFC142b contribuisce sia al cambiamento climatico che al consumo dello strato di ozono (Goedkoop et al., 2016).

Completata la classificazione, i metodi di caratterizzazione consentono di omogeneizzare e quantificare il contributo dei singoli flussi. Tramite i fattori di caratterizzazione, ognuno con opportuna unità di misura, vengono calcolati gli impatti ambientali associati ai flussi dell'inventario (**Eq. 3.8**). La sommatoria dei singoli contributi per una categoria di impatto dà

l'impatto totale per tale categoria (**Eq. 3.9**). Nella **Tabella 3.4** è presente un esempio della caratterizzazione.

$$EP(j)_i = Q_i * EF(j)_i \quad (3.8)$$

$$EP(j) = \sum_i EP(j)_i = \sum_i (Q_i * EF(j)_i) \quad (3.9)$$

Dove: i è l'emissione di una generica sostanza, che ha una magnitudo (quantità) pari a Q_i e un fattore di caratterizzazione $EF(j)$ relativo alla generica categoria di impatto ambientale (j); $EP(j)_i$ è il contributo potenziale della sostanza i alla categoria di impatto j ed $EP(j)$ è il contributo di più sostanze alla categoria di impatto j .

Elementary flow	Climate change		Ozone layer depletion		Eutrophication	
	CF	Result	CF	Result	CF	Result
1 kg CO ₂ (carbon dioxide)	1	1				
10 gram CH ₄ (methane)	25	0.25				
1 gram CFC142b	2310	2.31	0.07	0.00007		
5 gram NO ₂					0.56	0.0028
Impact Category Indicator Result		3.56		0.00007		0.0028
Unit of the result	kg CO ₂ equivalent		kg CFC11 equivalent		kg P equivalent	

Tabella 3.4 Risultato di una caratterizzazione con la metodologia ReCiPe 2016. I flussi sono stati moltiplicati per i fattori di caratterizzazione (CF) e poi sommati (Goedkoop et al., 2016).

3.2.1.4 Interpretazione e miglioramento

La fase di interpretazione e miglioramento è la parte conclusiva di una LCA, che la norma ISO 14040 definisce come il momento in cui si realizza una valida correlazione tra i risultati dell'analisi di inventario e i risultati dell'analisi di impatti. In questa fase dovrebbero essere incluse le operazioni di:

- Identificazione degli aspetti più significativi delle analisi precedenti.
- Controllo dei risultati dello studio, tramite controlli di completezza e consistenza dei dati e analisi di incertezza e sensibilità.
- Conclusioni dello studio e raccomandazioni. Si effettua un confronto con l'obiettivo iniziale dello studio e si riportano i risultati del modello e della revisione dei dati.

PARTE SPERIMENTALE

4 MFA: CICLO ANTROPOGENICO DEL NEODIMIO

4.1 Raccolta dati

Un modello dinamico retrospettivo di MFA è stato applicato per analizzare il ciclo antropogenico del neodimio in Italia, identificando e quantificando i flussi e le riserve del metallo dal 1995 al 2020. Tutti i flussi e le riserve sono stati stimati applicando il principio di conservazione della massa ed espressi in tonnellate di neodimio. Molte sono le tipologie di fonti di dati che sono state utilizzate, tra cui database ufficiali, pubblicazioni scientifiche, report di agenzie nazionali e internazionali e anche misurazioni dirette. Uno dei principali ostacoli nella caratterizzazione del ciclo di vita di un metallo come il neodimio, rispetto ai metalli tradizionalmente usati nella società (ad esempio, Al e Cu) è la minore quantità di dati disponibili e accessibilità ad essi. Informazioni sulle quantità incorporate in un prodotto, in particolare quando piccole, e sulle penetrazioni di mercato non sempre sono disponibili, soprattutto a livello regionale o nazionale. Ad esempio, dati sul contenuto medio di neodimio per applicazioni industriali sono riportati in letteratura (540 g Nd/unità; Sekine et al., 2017; T. Yao et al., 2021), ma l'affidabilità delle stime sulla penetrazione di mercato con magneti NdFeB non permette una valutazione accurata per l'Italia. Un'altra difficoltà è data dall'assenza di definizioni inequivocabili dei beni nei sistemi di classificazione merceologica, che quindi possono risultare vaghe e macro-aggregazioni di più prodotti. Per queste ragioni, i prodotti finali analizzati per il modello di MFA sono un sottoinsieme di tutti i beni contenenti neodimio presenti sul mercato.

Le rilevazioni geologiche dell'USGS e dell'Istituto nazionale di statistica (ISTAT, 2022), in collaborazione con l'Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA, 2022) sono state consultate per verificare l'assenza di attività estrattiva dei minerali contenenti neodimio in Italia. Il database di Eurostat (Unione Europea, 2022) è stato utilizzato per le informazioni sulla produzione domestica, le importazioni ed esportazioni dei beni scelti in Italia. Non essendo disponibili dati per gli anni precedenti al 1995 e successivi al 2020, i confini temporali scelti per il sistema coincidono con questo periodo. Il database dell'Organizzazione delle Nazioni Unite (United Nations Commodity Trade Statistics Database, UN Comtrade), è stato utilizzato per colmare lacune presenti nei dati di importazione ed esportazione di Eurostat, ma non possiede dati sulla produzione. Il database di Eurostat utilizza il sistema di classificazione merceologica Prodcom (abbreviazione dal francese *Production Communautaire*), nel quale ogni bene viene identificato da un codice a otto cifre. L'UN Comtrade utilizza una classificazione analoga, il sistema armonizzato HS (abbreviazione di

Harmonized Commodity Description and Coding System), nel quale i beni sono identificati da un codice a sei cifre. La lista dei prodotti analizzati per il modello di MFA fa riferimento al sistema di classificazione Prodcom e sono state impiegate tabelle di corrispondenza, fornite da Eurostat, per la conversione dei Prodcom in codici HS. Per colmare altre lacune sui prodotti, come informazioni sul consumo di turbine eoliche e scanner MRI, sono stati utilizzate le pubblicazioni sull'energia elettrica di Terna (2022) e i database di ISTAT e dell'Organizzazione per la cooperazione e lo sviluppo economico (OECD, 2022).

Le quantità di neodimio contenute per unità di prodotto sono state ricavate come medie aritmetiche dai valori riportati in letteratura e dai dati forniti direttamente dalle analisi di composizione eseguite durante la fase sperimentale. Nello specifico, le misurazioni dirette sono state effettuate dal dottorando Gianluca Torta, tramite spettrometria di massa a plasma accoppiato induttivamente (ICP-MS), per la sua ricerca sullo sviluppo di processi di riciclo delle terre rare da magneti permanenti. I dati forniti da Torta provengono dai magneti dei seguenti campioni:

- Monopattino elettrico BIT Mobility (motore)
- Monopattino elettrico Kugoo S1 pro (motore)
- Bici elettrica Bike C1 (motore)
- Fiat Ducato (motore, servosterzo, aria condizionata)
- Fiat 500 (motore, servosterzo, aria condizionata)
- Jeep Compass (alternatore, servosterzo, aria condizionata, cambio elettronico)
- Dischi rigidi

La **Tabella A.2** in Appendice riporta i valori utilizzati nel modello di MFA e le fonti per ogni prodotto.

I tassi di penetrazione del mercato dei prodotti a base di neodimio in Italia non sono disponibili pubblicamente e perciò sono stati utilizzati come proxy le percentuali europee, ritenute sufficientemente rappresentative per il mercato italiano e più idonee rispetto alle percentuali globali. Per gli anni in cui i dati sono mancanti, le penetrazioni di mercato sono state stimate applicando una regressione lineare. Solo per le turbine eoliche non è stata ritenuta rappresentativa la penetrazione di mercato europea ed è quindi stata determinata quella italiana analizzando i modelli delle turbine eoliche installate sul territorio, dal database di Wind Power¹.

¹ The Wind Power, Wind Energy Market Intelligence (www.thewindpower.net)

Per le distribuzioni dei tempi di vita con cui simulare il periodo di residenza in uso e la probabilità di raggiungere la fase di fine vita, si è fatto riferimento ai seguenti studi di letteratura: Forti et al. (2018) per i RAEE (lavatrici, frigoriferi, condizionatori d'aria, trasduttori acustici, VCM, scanner MRI); Morimoto et al. (2019) per le autovetture convenzionali ed elettriche; Cao et al. (2019) per le turbine eoliche e Schulze & Buchert (2016) per le e-bikes.

Le efficienze annuali di raccolta dei prodotti a fine vita sono disponibili nel database di Eurostat, per la maggior parte delle categorie di prodotti. Non sono presenti informazioni per gli scanner MRI e le turbine eoliche, per i quali è stata assunta una percentuale di raccolta del 100%, date le grandi dimensioni dei magneti permanenti in queste applicazioni, che permettono una facile identificazione. Negli anni più vecchi, in cui sono assenti i dati di raccolta, è stato mantenuto costante il valore di raccolta più vecchio disponibile.

4.2 Definizione del sistema e modellazione

In base agli obiettivi dello studio e ai dati disponibili, il ciclo del neodimio è stato diviso in quattro fasi principali: manifattura, uso, raccolta a fine vita e riciclo (**Figura 4.1**). Altre fasi che si sarebbero potute considerare, di “produzione” e di “fabbricazione”, non sono state incluse nel sistema per diverse ragioni. La fase di produzione include tutti i processi dall'estrazione mineraria alla raffinazione per elettrolisi. In Italia non avvengono estrazioni minerarie di neodimio e i processi di purificazione dei minerali e di raffinazione dell'ossido vengono effettuati solo nei paesi in cui è presente l'attività estrattiva. Perciò, l'unico flusso che risulterebbe rilevante in questa fase sarebbe l'importazione del metallo e dei suoi composti, ma non è possibile valutare le quantità importate in quanto i codici dei database di Eurostat e UN Comtrade non forniscono informazioni specifiche sulla composizione del bene importato. Nella fabbricazione, il neodimio e i suoi composti vengono impiegati per la produzione dei semilavorati. In alcuni casi sono assenti i dati sulle quantità prodotte e di commercio internazionale e in altri casi non sono presenti sufficienti informazioni sulla penetrazione di mercato dei semiprodotti a base di neodimio. Le valutazioni delle fasi di produzione e fabbricazione completano il modello, ma non sono necessarie ai fini dello studio.

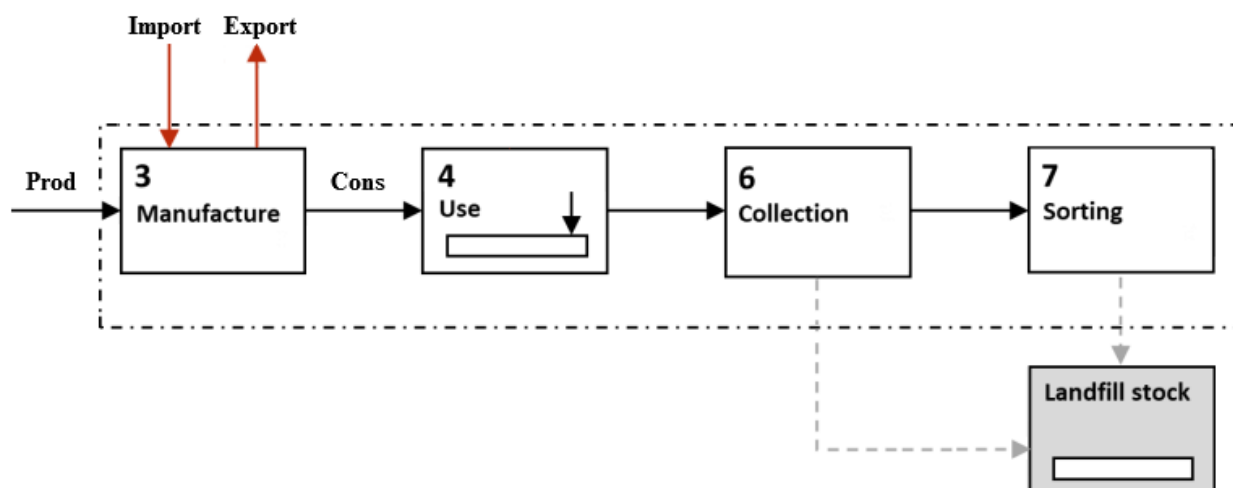


Figura 4.1 Schema del sistema di MFA analizzato.

Nella fase di manifattura i semilavorati sono utilizzati per la produzione e l'assemblaggio dei beni finali. La lista dei prodotti finali è stata compilata in base al lavoro svolto per il modello di MFA sviluppato per l'Unione Europea (Ciacci et al., 2019), tenendo in considerazione anche gli articoli di MFA citati nel capitolo 1, I vari prodotti sono stati classificati nelle seguenti categorie di fine uso: autovetture convenzionali, autovetture elettriche, condizionatori d'aria, lavatrici, frigoriferi, trasduttori acustici, *voice coil motors* (VCM), turbine eoliche ed e-bikes (Tabella 4.1).

Categorie di fine uso	Descrizione categoria	Prodcom ¹
Autovetture convenzionali	Autovetture con motore a combustione interna	29101300, 29102100, 29102230, 29102250, 29102310, 29102330, 29102340, 29102353, 29102355, 29103000
Autovetture elettriche	Autovetture elettriche, ibride e plug-in	29102400, 29105200
Condizionatori d'aria	Climatizzatori a parete e a soffitto	28251220
Lavatrici	Lavatrici e asciugatrici	27511200, 27511300, 28295000, 28942150, 28942230
Frigoriferi	Frigoriferi e freezer	27511110, 27511133, 27511135, 27511150, 27511170, 28251333, 28251335, 28251390, 28294330
Trasduttori acustici	Microfoni, altoparlanti, auricolari	26404100, 26404235, 26404237, 26404270
VCM	Computer desktop e portatili, apparecchiature	26201100, 26201300, 26302200, 26302320

	elettroniche per la comunicazione	
Scanner MRI	Scanner per l'imaging a risonanza magnetica	26601280
Turbine eoliche	Generatori per turbine eoliche <i>direct drive</i> e ibride	28112400
E-bikes	Bici e monopattini elettrici	30921000

¹La descrizione di ogni Prodcom è in Appendice, **Tabella A.1**

Tabella 4.1 Lista di tutti i prodotti contenenti neodimio inclusi in questa analisi

I flussi analizzati per questa fase sono la produzione domestica ($\dot{m}_i^{\text{prod}}$), l'import ($\dot{m}_i^{\text{imp}}$), l'export ($\dot{m}_i^{\text{exp}}$) e il consumo ($\dot{m}_i^{\text{cons}}$), che sono legati tra loro dal bilancio di massa descritto nell'**Eq. 4.1**. Il consumo della fase di manifattura corrisponde all'input nella fase d'uso e può essere anche visto come la domanda nazionale del mercato per quei prodotti. Per la maggior parte delle categorie di fine uso sono stati raccolti i dati sulla produzione domestica e sul commercio internazionale ed è stato determinato il consumo dal bilancio di massa.

$$\dot{m}_i^{\text{cons}} = \dot{m}_i^{\text{prod}} + \dot{m}_i^{\text{imp}} + \dot{m}_i^{\text{exp}} \quad (4.1)$$

Per le turbine eoliche, le autovetture elettriche e gli scanner MRI è stato utilizzato un approccio differente, ricavando direttamente il dato di consumo e ottenendo la produzione dal bilancio. Le informazioni sulle quantità di neodimio contenute nelle turbine eoliche sono disponibili in kg di neodimio per MW e non per unità di prodotto. Perciò, è stato preferibile calcolare il consumo annuale di neodimio in funzione della capacità eolica installata sul territorio. Per le autovetture elettriche sono assenti i dati di produzione domestica in molti anni e di conseguenza si è preferito determinare il consumo dal numero di immatricolazioni in Italia (UNRAE, 2012-2021). Inoltre, le pubblicazioni statistiche sulle immatricolazioni forniscono un grado di dettaglio più elevato sulla tipologia di autovettura elettrica considerata (ibrida o completamente elettrica) rispetto ai codici prodcom. Per gli scanner MRI, il codice prodcom di Eurostat (26601280 – “*Electro-diagnostic, apparatus (excluding electro-cardiographs), n.e.c.*”) non fornisce un grado di dettaglio sufficiente sugli equipaggiamenti medici considerati a differenza del codice HS (901813 – *Medical, surgical instruments and appliances; magnetic resonance imaging apparatus*), che però permette di ricavare solo dati sull'import e l'export. È stato possibile determinare il consumo da informazioni di censimento sulle unità di scanner MRI installate annualmente in Italia dal database dell'OECD. I dati sono disponibili in unità di

scanner per 1.000.000 di abitanti, perciò sono stati anche raccolti i dati sulla popolazione italiana dal database di ISTAT.

I prodotti dalla manifattura entrano nella fase d'uso, dove vengono impiegati e accumulati nella società durante il loro tempo di vita utile. Il neodimio incorporato all'interno di questi beni va a costituire la riserva in uso del metallo. Le perdite di neodimio nell'ambiente durante l'uso, dovuto ad esempio a fenomeni di corrosione o abrasione, sono state ritenute trascurabili. Il neodimio è tipicamente confinato all'interno del prodotto e nel caso dei magneti permanenti protetto da rivestimenti di nichel, alluminio o zinco. Per la determinazione della riserva in uso è stato utilizzato un approccio "top-down" con un modello di distribuzione dei tempi di vita. Conoscendo i flussi in entrata annuali nella fase d'uso, ossia i consumi, e applicando le distribuzioni statistiche per ogni categoria di fine uso sono stati simulati i flussi in uscita annuali, cioè i flussi di rifiuti generati dall'uso (**Figura 4.2**). Nel modello sono state utilizzate le distribuzioni continue di Weibull e di Gauss (nota anche come distribuzione normale) per rappresentare la probabilità che i prodotti diventino rifiuti dopo un certo numero di anni. La distribuzione di Weibull è una distribuzione asimmetrica, definita da un parametro di forma α e un parametro di scala β . È considerata la più idonea nella descrizione del comportamento di scarto dei RAEE (Forti et al., 2018; Islam & Huda, 2020). Dalla differenza tra i flussi in entrata e i flussi in uscita in un anno, è stata calcolata l'aggiunta netta annuale alla riserva. Tramite la somma delle aggiunte nette è stata determinata la riserva totale in uso di neodimio (**Eq. 3.5**).

[illegible]

Figura 4.2 Simulazione della generazione di autovetture obsolete, in uscita dalla fase d'uso.

Nella fase di raccolta, una frazione dei prodotti a fine vita viene separata per entrare nella catena di riciclo, mentre la restante è smaltita come rifiuto. Moltiplicando i flussi in uscita dalla fase d'uso con le percentuali di raccolta annuali per ogni categoria di prodotto, sono state calcolate le quantità collezionate e inviate a riciclo. Le quantità smaltite in discarica sono state ricavate dalla differenza tra il flusso in uscita dalla fase d'uso e il flusso mandato a riciclo. La fase di riciclo comprende le operazioni di separazione e di trattamento per ottenere un riciclo funzionale del materiale. Per funzionale si intende il riciclo in cui le proprietà intrinseche del neodimio, sotto forma di metallo o lega, sono preservate nel prodotto riciclato. Si distingue da un riciclo non funzionale, nel quale un metallo viene perso come impurezza nel riciclo di un altro metallo con cui era stato separato. Per determinare la quantità riciclata, il flusso di rifiuti raccolto è stato moltiplicato con la percentuale di riciclo finale, che tiene considerazione l'efficienza di separazione e dei trattamenti successivi. Questa percentuale è stata considerato pari a zero, in quanto non sono state trovate informazioni su attività di riciclo del neodimio in Italia. Come descritto nel paragrafo 2.1, la percentuale globale di riciclo di neodimio è inferiore all'1%, mentre per l'UE è riportato che dal 2013 al 2019 la percentuale è salita dallo 0% al 1,3% (Q. Liu et al., 2022; Unione Europea, 2022)

Il software adoperato per la costruzione del modello di MFA è Microsoft Excel[®]. In Appendice sono riportati dettagliatamente gli inventari dei fogli di calcolo (**Tabella A.1-Tabella A.3**).

4.3 Inventario Prodotti

Nella **Tabella 4.2** sono riportati i parametri per le distribuzioni dei tempi di vita, utilizzati per il modello dinamico di MFA, e in Appendice (**Tabella A.3**) sono riportate le percentuali di raccolta annuali dei prodotti a fine vita. All'interno delle autovetture la quantità di neodimio è molto variabile, dato l'elevato numero di componenti che possono contenerlo. Per i veicoli convenzionali, ossia con motore a combustione interna, è stato stimato un valore tra 35-162 g Nd/unità. Per i veicoli elettrici è stata fatta distinzione in base alla tipologia:

- nelle auto ibride (*Hybrid Electric Vehicle*, HEV) è stata stimata una quantità di 221-249 g Nd/unità. Le auto ibride possiedono sia un motore endotermico che un motore elettrico. In base al grado di ibridizzazione il motore elettrico può essere solo di supporto oppure in grado di funzionare da solo.
- nelle auto “plug-in” (*Plug in Hybrid Electric Vehicle*, PHEV), il contenuto di neodimio è tra 201 e 400 g Nd/unità. Sono autovetture ibride, in cui le batterie possono essere ricaricate collegandole a una fonte esterna di energia elettrica.

- Nelle auto elettriche (*Battery Electric Vehicle*, BEV), è da 353 a 749 g Nd/unità. Le BEV non utilizzano alcun tipo di motore a combustione interna.

Le quantità stimate per la categoria VCM sono: 1,5-6,0 g Nd/unità per computer desktop; 0,58-2,16 g Nd/unità per computer laptop; e 0,05-0,12 g Nd/unità per smartphone e apparecchi elettronici simili. Per i trasduttori acustici (microfoni, altoparlanti, auricolari) la quantità di neodimio varia da 0,4 g Nd/unità a 0,8 g Nd/unità. Una penetrazione di mercato del 100% è stata assunta per le autovetture, i VCM e i trasduttori acustici.

Per i veicoli elettrici a due ruote (e-bikes, monopattini elettrici), il contenuto è stimato essere di 38-108 g Nd/unità, mentre la penetrazione di mercato è aumentata tra il 5% (1990) e il 15% (2016), dato che l'impiego di magneti NdFeB è probabilmente limitato ai modelli ad alte prestazioni. Nel magnete contenuto nel compressore del condizionatore d'aria la quantità stimata è di 21,6-52,0 g Nd/unità. Attualmente i modelli con magneti NdFeB sono predominanti solo nel sud-est asiatico e in India. Perciò per l'Europa è stata assunta una quota di mercato dal 1% nel 2003 al 10% nel 2016 (Constantinides, 2016). Il neodimio stimato nei compressori dei frigoriferi e freezer è di 13,5-142,1 g Nd/unità, con una penetrazione di mercato dall'1% nel 2000 al 10% nel 2016. Per le lavatrici e asciugatrici la quantità di neodimio nel magnete del motore è compresa tra 35,1 g Nd/unità e 42,0 g Nd/unità e la penetrazione di mercato assunta è dall'1% (2000) al 25% (2016). Il contenuto di neodimio per unità di scanner è estremamente elevato (377-400 kg Nd/unità), ma secondo un'indagine condotta da Ciacci et al. (2019) con uno dei principali costruttori di scanner MRI, Siemens Healthcare, la configurazione con magneti NdFeB non è molto diffusa in Europa e perciò una penetrazione di mercato del 6-10% (1990-2016) è stata assunta.

Come descritto nel paragrafo 4.1, a differenza degli altri prodotti, per la penetrazione di mercato delle turbine con magneti permanenti non è stata usata la quota europea (7% per le turbine D-PM e 23% per le turbine E-PM; Telsnig, 2020), che sarebbe risultata in una sovrastima di neodimio. Nel 2021 la capacità installata dell'eolico in Europa ha raggiunto i 236 GW, di cui l'11% è *offshore*, mentre in Italia la capacità raggiunta è di 11 GW e solo di turbine eoliche *onshore*. Per determinare la percentuale di turbine con magneti permanenti dal database di Wind Power sono stati esaminati i modelli di turbine installati nei parchi eolici italiani. Sono stati classificati i modelli di 544 parchi, che rappresentano l'82,8% dei parchi operativi in Italia. Dei restanti non sono presenti informazioni sul numero di turbine o sui modelli installati. È stato stimato che l'1,8% delle turbine eoliche in Italia usa la configurazione *direct drive* D-PM e lo

0,8% usa la configurazione ibrida E-PM. Per quanto riguarda il contenuto di neodimio per unità di MW si è fatta distinzione tra le due configurazioni, essendo la quantità impiegata nelle turbine D-PM (167-224 g Nd/unità) maggiore di quella nelle E-PM (36,0-60,9 g Nd/unità).

Categoria di fine uso	Tipo di distribuzione	Parametro di scala (β)¹	Parametro di forma (α)²	Fonte
Autovetture convenzionali	Weibull	12,9	3,1	Morimoto et al, 2021
Autovetture elettriche	Weibull	12,9	3,1	Morimoto et al, 2021
Condizionatori d'aria	Weibull	11,28	1,61	Forti et al., 2018
Lavatrici	Weibull	14,69	2,39	Forti et al., 2018
Frigoriferi	Weibull	18,53	1,82	Forti et al., 2018
Trasduttori acustici	Weibull	11,21	1,22	Forti et al., 2018
VCM	Weibull	7,36	1,51	Forti et al., 2018
Scanner MRI	Weibull	13,52	2,41	Forti et al., 2018
Turbine eoliche	Weibull	19,48	4,07	Cao et al., 2019
E-bikes	Gauss	5	1,25	Schulze e Buchert, 2016

¹ Per la distribuzione normale è il valore medio (μ)

² Per la distribuzione normale è la deviazione standard (σ)

Tabella 4.2 Parametri per le distribuzioni dei tempi di vita, per categoria di fine uso.

4.4 Analisi di incertezza e sensibilità

Il modello di MFA per il neodimio in Italia è stato costruito attraverso l'uso di fonti attendibili ma, come per tutti i modelli di caratterizzazione quantitativa, i risultati sono influenzati dalla presenza di incertezza nelle variabili usate. L'incertezza ostacola la modellazione, rendendo la valutazione delle riserve e dei flussi a livello nazionale un compito ambizioso. I dati sulle concentrazioni di neodimio nei prodotti finali sono stati ritenuti la principale fonte d'incertezza. Ciò è dovuto a informazioni limitate sugli usi specialistici del neodimio e sugli ampi intervalli di concentrazioni in alcuni dei prodotti considerati, in cui il contenuto di neodimio è variato negli anni a causa del progresso tecnologico e di innovazione del design. Perciò, un'analisi di sensibilità è stata condotta per verificare la robustezza del modello, tramite l'uso dei valori di limite inferiore e superiore del contenuto di neodimio per unità di prodotto. I valori di limite inferiore e superiore sono stati usati per calcolare l'intervallo di incertezza della domanda e della riserva in uso di neodimio, assumendo che le distribuzioni di concentrazione seguano delle curve gaussiane e che il 99,7% dei valori ricada tra il limite inferiore e superiore ($\pm 3 \sigma$). I risultati dell'analisi di incertezza sono riportati nel paragrafo 4.5.3. I valori di limite inferiore e

superiore del contenuto di neodimio per ogni prodotto sono riportati in Appendice (**Tabella A.2**).

4.5 Risultati e discussione MFA

4.5.1 Analisi dei flussi

La **Figura 4.3** rappresenta il ciclo italiano del neodimio, dalla fase di manifattura dei prodotti alla fase di gestione dei rifiuti. I flussi e le riserve riportati fanno riferimento all'anno 2020 e sono espressi in tonnellate di Nd equivalente (t Nd). Ad eccezione della categoria delle e-bikes, l'Italia risulta essere un'importatrice netta degli altri prodotti. Complessivamente, rispetto alle tendenze degli anni precedenti, non ci sono differenze eccessive causate dalla pandemia globale: è presente un calo del consumo e delle importazioni nette. Per quanto riguarda le categorie specifiche, c'è stato un rilevante incremento della produzione e del consumo di neodimio per il settore delle autovetture elettriche, a discapito di quelle convenzionali. Si può osservare come la quantità di neodimio contenuta nei rifiuti (336 t Nd) sia maggiore di quella richiesta del mercato (286 t Nd), ma la chiusura del ciclo è completamente ostacolata dall'inesistenza del riciclo.

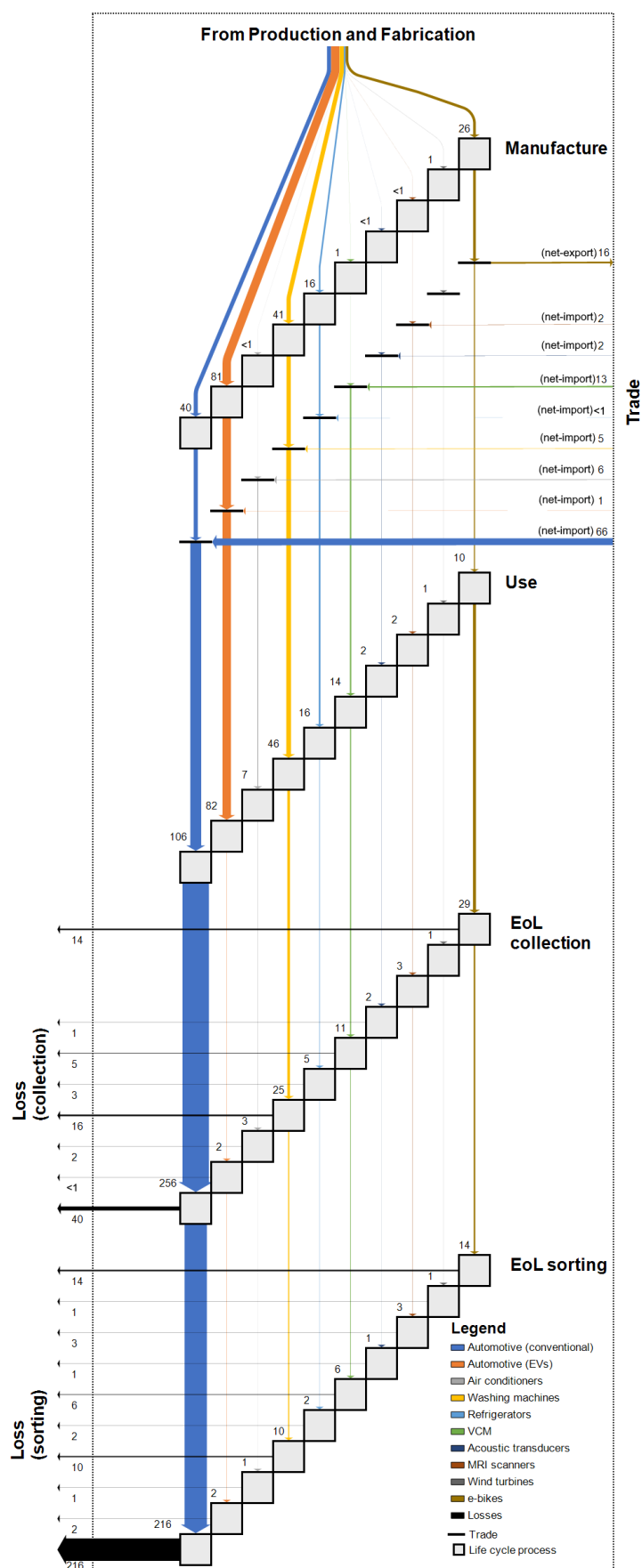


Figura 4.3 Ciclo antropogenico del neodimio in Italia (2020), dalla manifattura alla gestione a fine vita. Tutti i valori sono espressi in t Nd.

La **Figura 4.4 (a)** riporta le distribuzioni percentuali per categorie di fine uso dell'input alla manifattura domestica nel 2020, che in quell'anno ha raggiunto le 182 t di neodimio. La domanda per il neodimio dal settore automobilistico, includendo sia gli autoveicoli a combustione sia gli autoveicoli elettrici, rappresenta circa il 58% dell'input totale di neodimio alla manifattura. Il 19% è attribuito alle auto convenzionali e il 39% alle auto elettriche. A seguire gli elettrodomestici con un totale del 28%, principalmente dalle lavatrici (~20%) e dai frigoriferi (~8%), e la categoria delle e-bikes con un 12,5%. La restante domanda di neodimio per la manifattura degli altri prodotti risulta meno rilevante, con la maggior parte di questi che viene principalmente importata dall'Asia (Q. Liu et al., 2022).

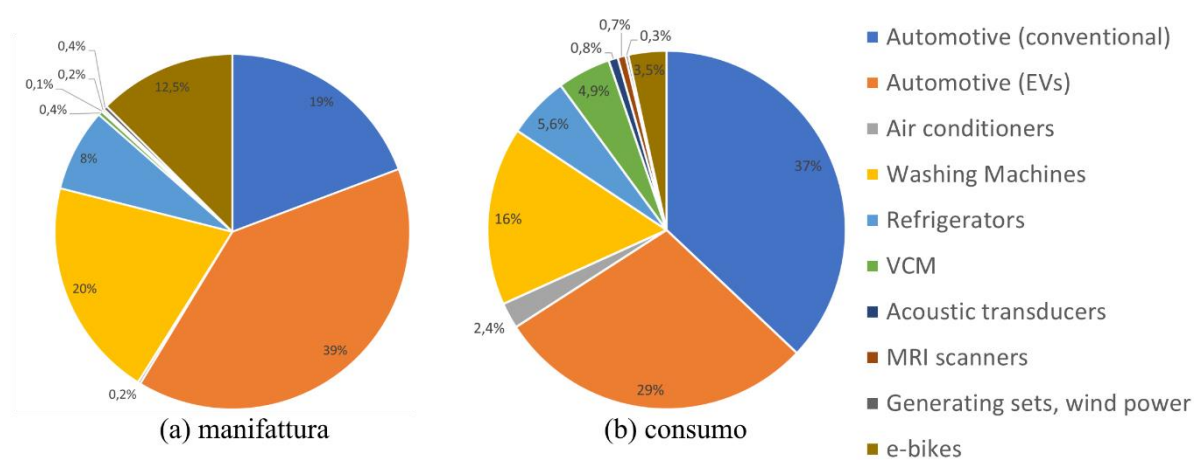


Figura 4.4 Domanda nazionale del neodimio per le categorie di fine uso nel 2020. A sinistra (a) per la manifattura, a destra (b) per il consumo.

La **Figura 4.5** mostra il flusso storico di neodimio in entrata nella fase d'uso, per categoria, ossia il consumo apparente del mercato. Nel 2020 il consumo nazionale di neodimio ha raggiunto le 286 t e negli anni la domanda è tendenzialmente incrementata, raggiungendo il suo picco nel 2007 (410 t Nd) con un incremento percentuale del 46% rispetto all'anno precedente (280 t Nd). Il calo negli anni successivi, 2008-2009, è correlabile alla crisi finanziaria mondiale di quegli anni. Nel 2017 si è registrato il calo più elevato, del 23% (221 t Nd) rispetto all'anno precedente, riconducibile a un elevato incremento delle esportazioni di autovetture convenzionali. Inoltre, dal 2017 c'è stato un incremento del prezzo del neodimio, causato da tre fattori: i produttori cinesi si stavano rifiutando di accettare prezzi più bassi per le terre rare; alcuni impianti cinesi sono stati chiusi, a seguito di normative ambientali più restrittive; e l'incremento di speculazione, che ha portato a un calo dell'offerta di neodimio (European Commission, 2020a). Il calo del consumo nell'ultimo anno è attribuibile alla pandemia globale di Covid-19, che ha messo in crisi il commercio internazionale e causato un calo del PIL italiano del 8,9% (ISTAT, 2021). In questi due decenni il consumo italiano di neodimio è stato dominato

dalle autovetture convenzionali, ma è importante constatare l'incremento del consumo negli ultimi anni degli altri prodotti, in particolare di tecnologie verdi come i veicoli elettrici, a due e a quattro ruote.

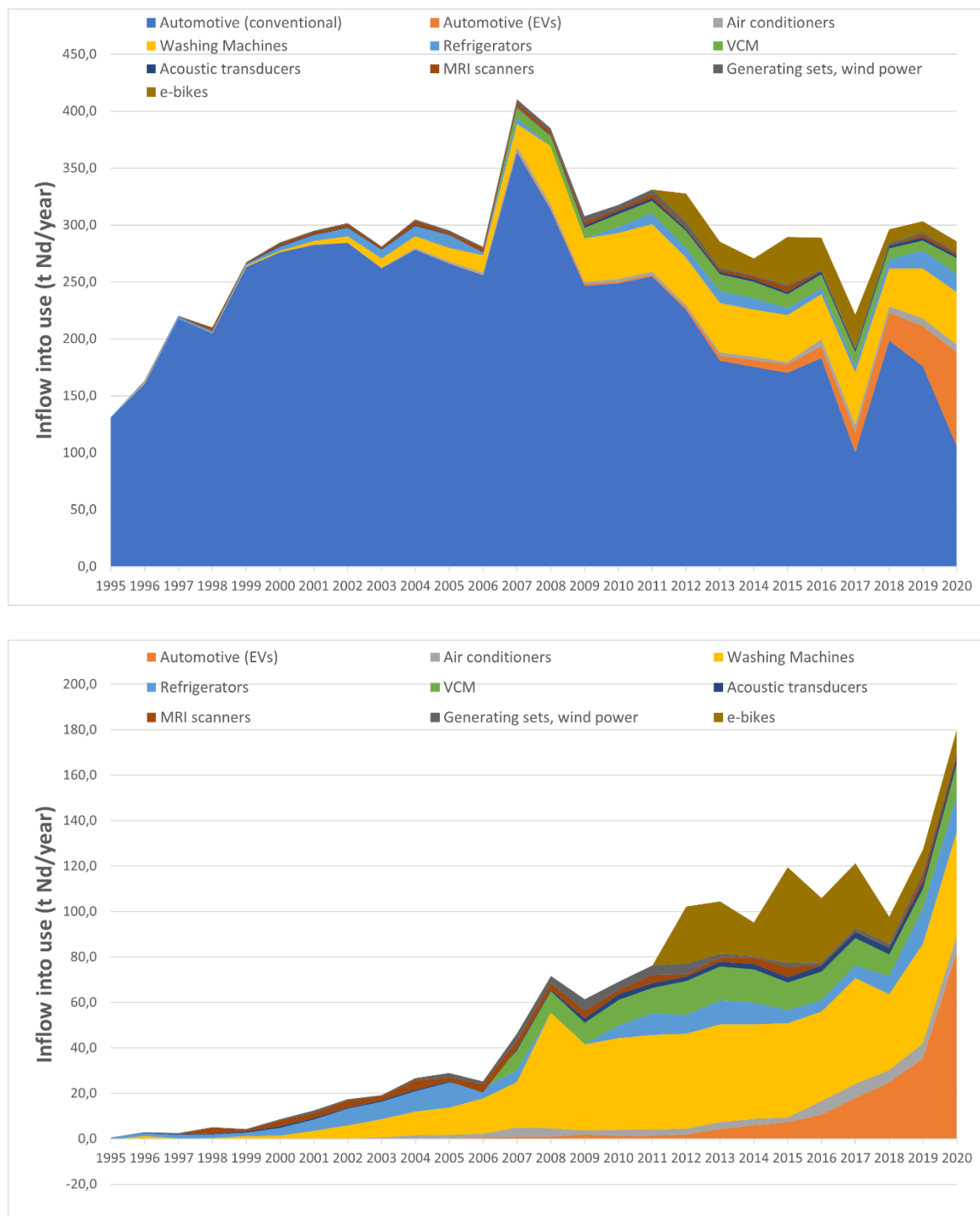


Figura 4.5 Flusso in entrata annuale nella fase d'uso (consumo), per categoria di prodotto. In basso è presente lo stesso grafico senza la categoria delle autovetture convenzionali, per agevolare la comprensione dei risultati.

Tramite il modello di distribuzione dei tempi di vita è stato stimato il neodimio uscente dalla fase d'uso, cioè contenuto nei prodotti obsoleti. Dal 1995 al 2020 la quantità assoluta di

neodimio generato a fine vita ammonta a 4,0 kt Nd, di cui circa l'89% (~3,6 kt Nd) proviene dalle auto convenzionali. L'alto contributo dal settore automobilistico è dovuto all'impiego elevato di neodimio nel settore sin dal 1995, a differenza di altre applicazioni che sono state introdotte in quantità notevoli sul mercato solo più recentemente e, perciò, ancora lontane dal proprio fine vita. Ad esempio, le auto elettriche contribuiscono soltanto allo 0,2% del neodimio obsoleto generato. A seguire le auto convenzionali, ci sono lavatrici (3,8%), e-bikes (2,5%), VCM (2,1%) e frigoriferi (1,1%). Le restanti categorie di fine uso contribuiscono con una percentuale inferiore all'1%. Nonostante l'influsso di neodimio da e-bikes e VCM sia più recente rispetto a quello contenuto da altri prodotti, le loro percentuali relativamente influenti sul flusso in uscita sono dovute ai loro tempi di vita più brevi, di circa 5 e 7 anni rispettivamente. Queste applicazioni con tempi di vita relativamente inferiori risulteranno in una potenziale fonte di neodimio secondario nei prossimi anni, garantendo un flusso consistente per i processi di riciclo. Oltre a ciò, la pratica di raccogliere e smantellare gli HDD è già attuata dalle aziende, per ragioni di sicurezza dei dati, e le e-bikes presentano procedure di smontaggio più semplici rispetto alle automobili o agli elettrodomestici (Y. Yang et al., 2017).

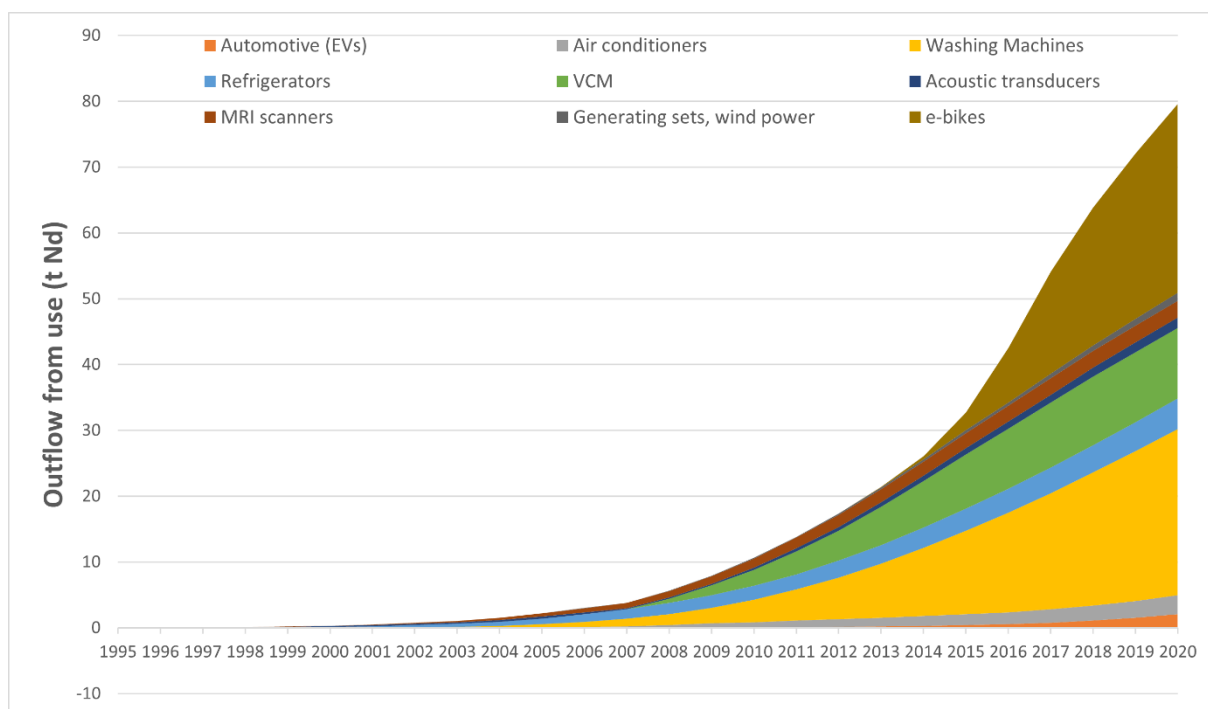
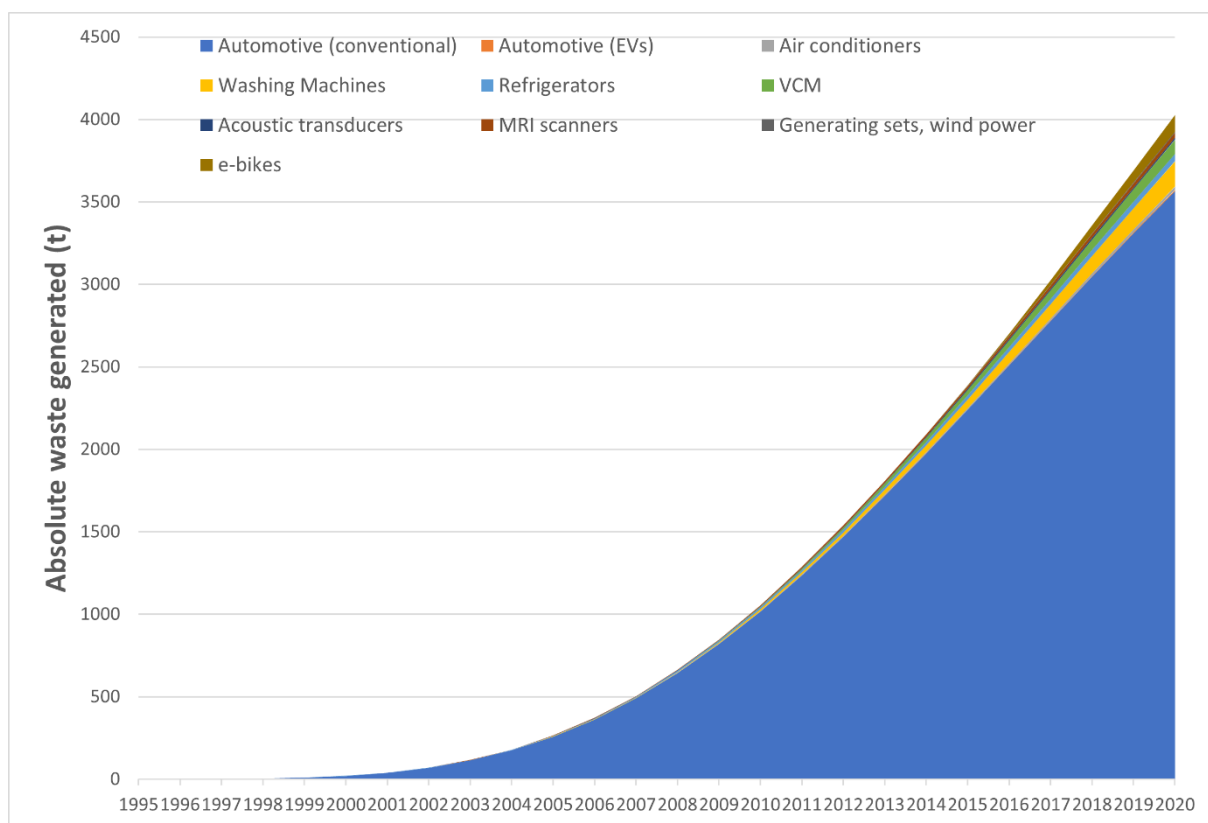


Figura 4.6 Quantità cumulativa di rifiuti generati dal 1995 al 2020. In basso è presente lo stesso grafico senza la categoria delle autovetture convenzionali, per agevolare la comprensione dei risultati.

Applicando le percentuali di raccolta al flusso in uscita dalla fase d'uso, è stata calcolata la quantità raccolta dal sistema di gestione dei rifiuti di neodimio contenuto nei prodotti scartati (**Figura 4.7**). Complessivamente negli anni la percentuale di raccolta del neodimio è

incrementata, raggiungendo un massimo del 85% nel 2008 e una percentuale del 76% nell'ultimo anno. La quantità raccolta di neodimio in termini assoluti è di 3,2 kt. Le percentuali di raccolta per certi prodotti sono elevate, come nel caso delle autovetture (84% nel 2020), che, come affermato in precedenza, incorporano la maggior parte del neodimio obsoleto. Auto convenzionali, lavatrici, e-bikes, VCM e scanner MRI sono le applicazioni in cui è stata raccolta la maggior quantità di neodimio dal 1995 al 2020. Malgrado la maggior parte dei prodotti a fine vita contenenti neodimio siano raccolti, il neodimio non viene recuperato ed è completamente perso o dissipato nel riciclo non funzionale di altri materiali, durante i trattamenti successivi alla raccolta, di separazione e trattamento. Perciò, il flusso perso durante la completa gestione dei rifiuti corrisponde al flusso uscente dalla fase d'uso dei prodotti a fine vita (**Figura 4.8**).

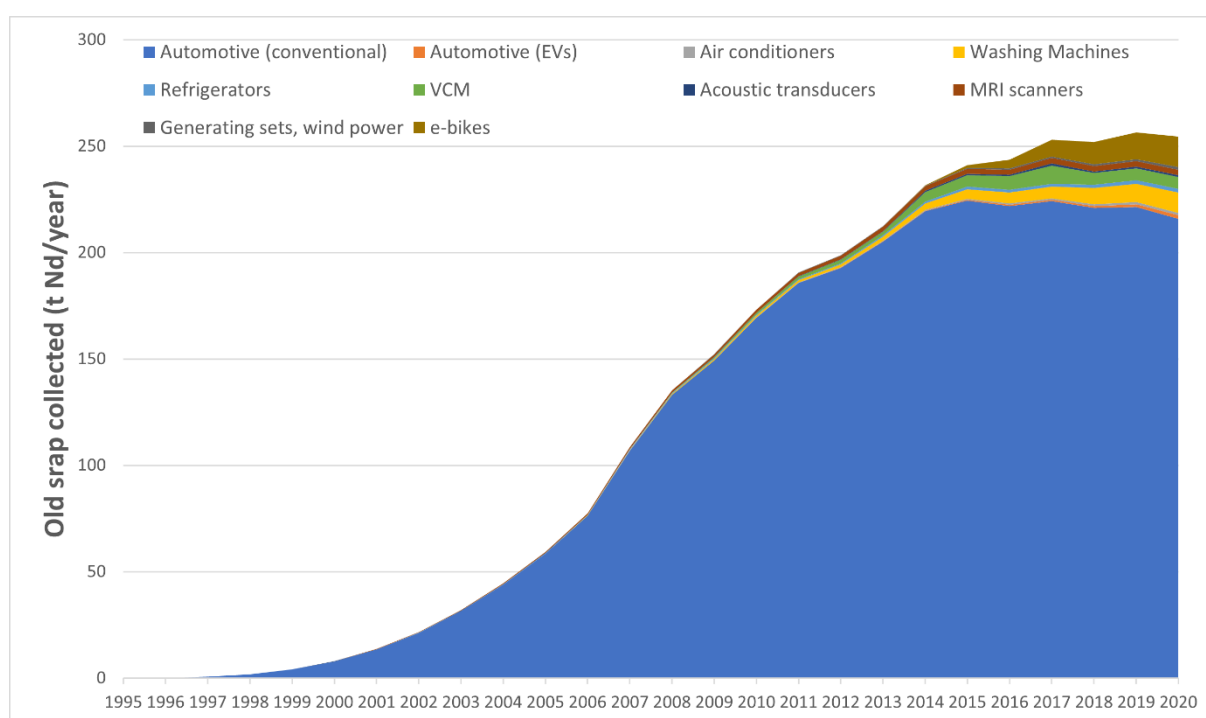


Figura 4.7 Flusso annuale di prodotti a fine vita raccolti dal sistema di gestione dei rifiuti.

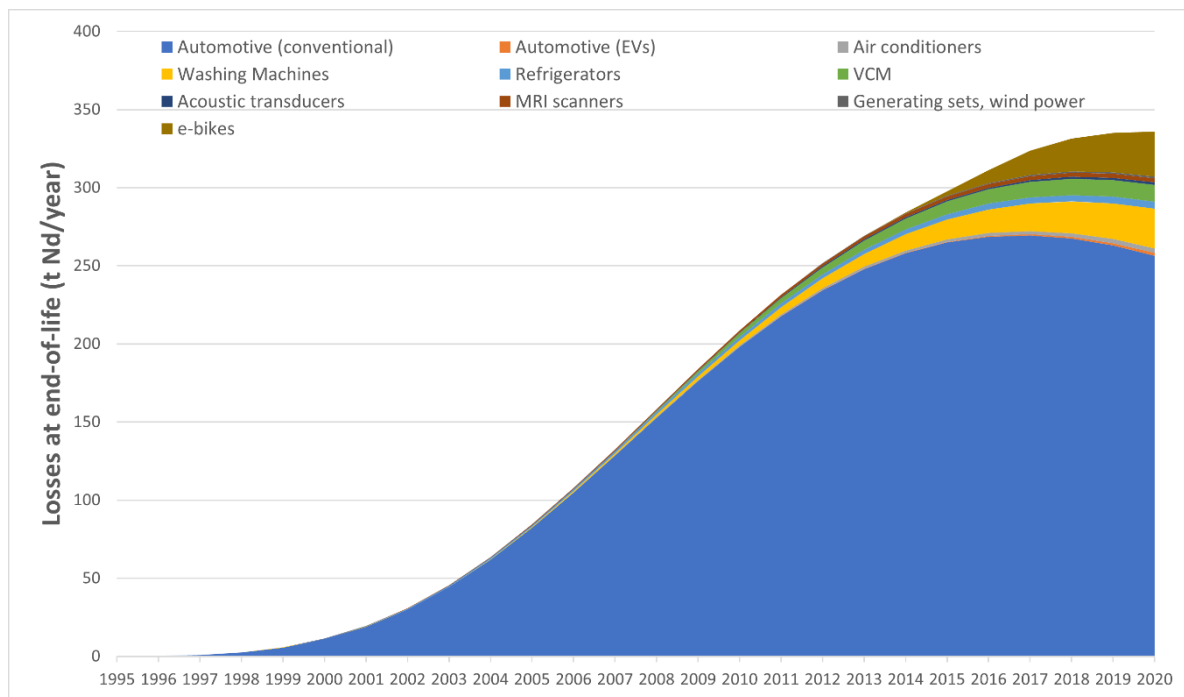


Figura 4.8 Flusso annuale di rifiuti generati in uscita dalla fase d'uso e corrispondete al flusso annuale perso dalla gestione dei rifiuti.

4.5.2 Analisi della riserva in uso

La **Figura 4.9** riporta le aggiunte nette annuali alla riserva in uso, calcolate dalla differenza, anno per anno, tra il consumo apparente e il flusso di rifiuti generati a fine vita. Fino al 2013 si ha un continuo incremento della riserva nella fase d'uso, ma dal 2014 si ha un'inversione di tendenza. La diminuzione di neodimio nella riserva è principalmente causata dal calo di consumo delle autovetture convenzionali nell'ultimo decennio, attribuibile alla crescita esponenziale delle autovetture elettriche e alla saturazione del parco auto italiano. Secondo la pubblicazione statistica del 2022 dell'Associazione europea dei costruttori di automobili (ACEA, dal francese *Association des constructeurs européens d'automobiles*), nel 2020 in Italia erano presenti 755 veicoli ogni 1000 abitanti, che classifica gli italiani al secondo posto in Europa. Contributi negativi negli ultimi anni alla riserva in uso sono dati anche dalle e-bikes negli ultimi anni. Un calo di produzione e un aumento degli export negli ultimi tre anni, unito ai tempi di vita relativamente brevi, ha portato a un flusso di e-bikes a fine vita superiore al flusso in entrata. Pure gli scanner MRI contribuiscono negativamente, anche se in misura minore. Il consumo di scanner con magneti permanenti è complessivamente calato dal 2015, dato che la configurazione con magneti superconduttori è più diffusa. La domanda globale di neodimio per gli scanner MRI è prevista continuare a calare nei prossimi anni (T. Yao et al., 2021).

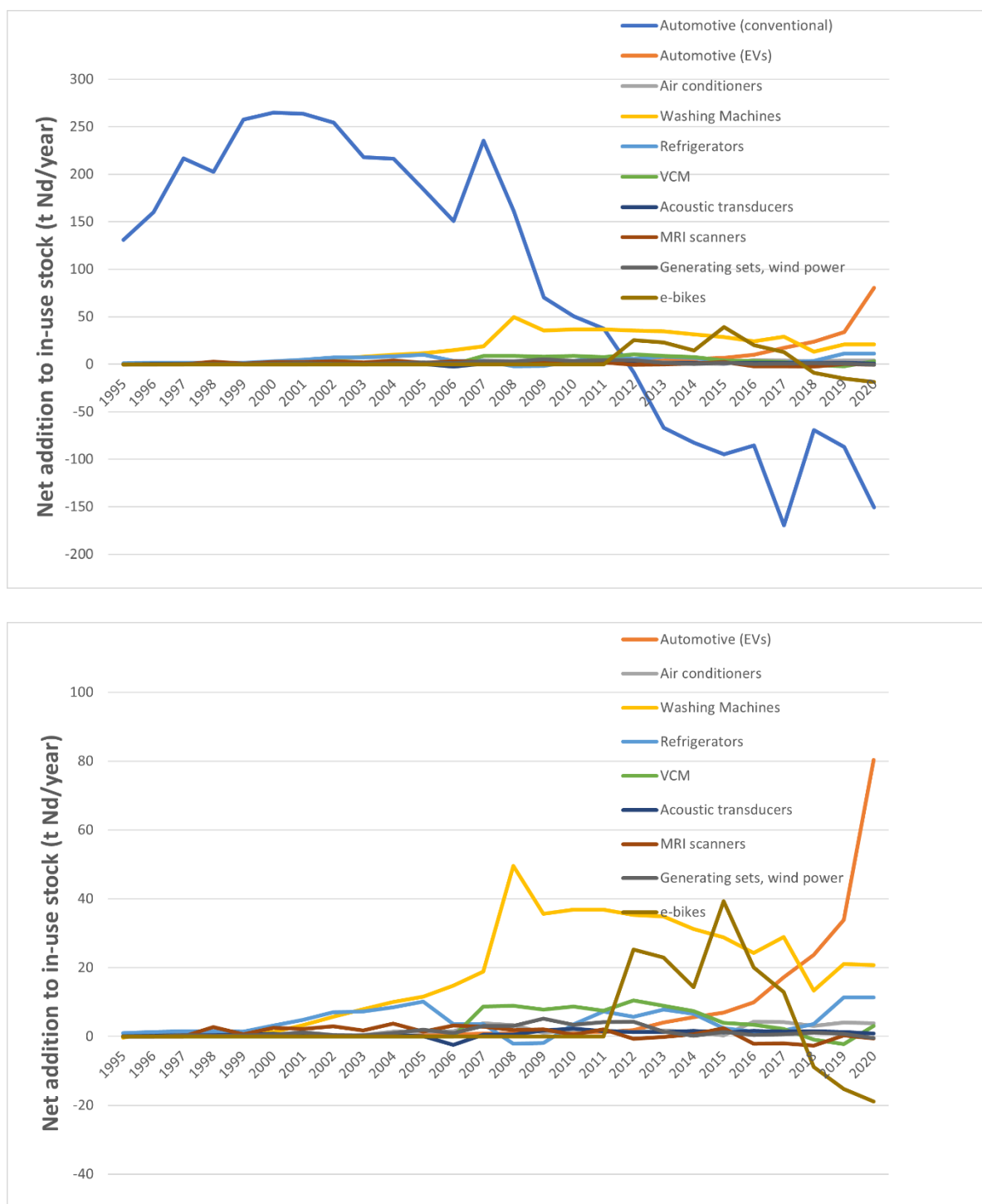


Figura 4.9 Addizioni annuali nette alla riserva in uso. In basso è presente lo stesso grafico senza la categoria delle autovetture convenzionali, per agevolare la comprensione dei risultati.

La riserva nazionale in uso di neodimio, ottenuta dalla somma delle addizioni nette, è rappresentata nella **Figura 4.10**. La quantità totale accumulata di neodimio nella società italiana, dal 1995 al 2020, corrisponde a 3,3 kt Nd o 56 g Nd pro capite. Le autovetture convenzionali costituiscono la più grande riserva del metallo (2,2 kt Nd), seguite dalle lavatrici (473 t Nd), autovetture elettriche (191 t Nd) e frigoriferi (113 t Nd). La riserva in uso risulta

essere approssimativamente 18 volte la domanda richiesta dall'industria manifatturiera italiana nel 2020. Considerando la media del consumo apparente negli ultimi 5 anni (279 t Nd), la riserva in uso, se venisse completamente riciclata, sarebbe in grado di soddisfare la domanda del mercato italiano per almeno i prossimi 11 anni ai valori attuali.

Il valore pro capite è in linea con la riserva in uso del 2020 globale, di 44 g Nd pro capite, e con la riserva cinese, di 52 g Nd pro capite (Q. Liu et al., 2022). In confronto all'UE, la riserva in uso pro capite italiana risulta essere più basso: la riserva europea riportata da Liu et al. si aggira sui 140 g pro capite. Ciò è attribuibile alle differenze del modello di MFA di Liu et al., che tiene in considerazione anche dei motori e robot industriali, alla maggiore capacità eolica installata in UE, in particolare *offshore*, e alla maggiore penetrazione di mercato delle configurazioni *direct drive* e ibrida. La percentuale di consumo di neodimio nel 2020 dovuta alle turbine eoliche nell'UE è del 18% (Rizos et al., 2022), contro lo 0,3% in Italia, e dal momento che le turbine presentano tempi di vita elevati (~18 anni), contribuiscono lungo un periodo di tempo maggiore alla riserva in uso.

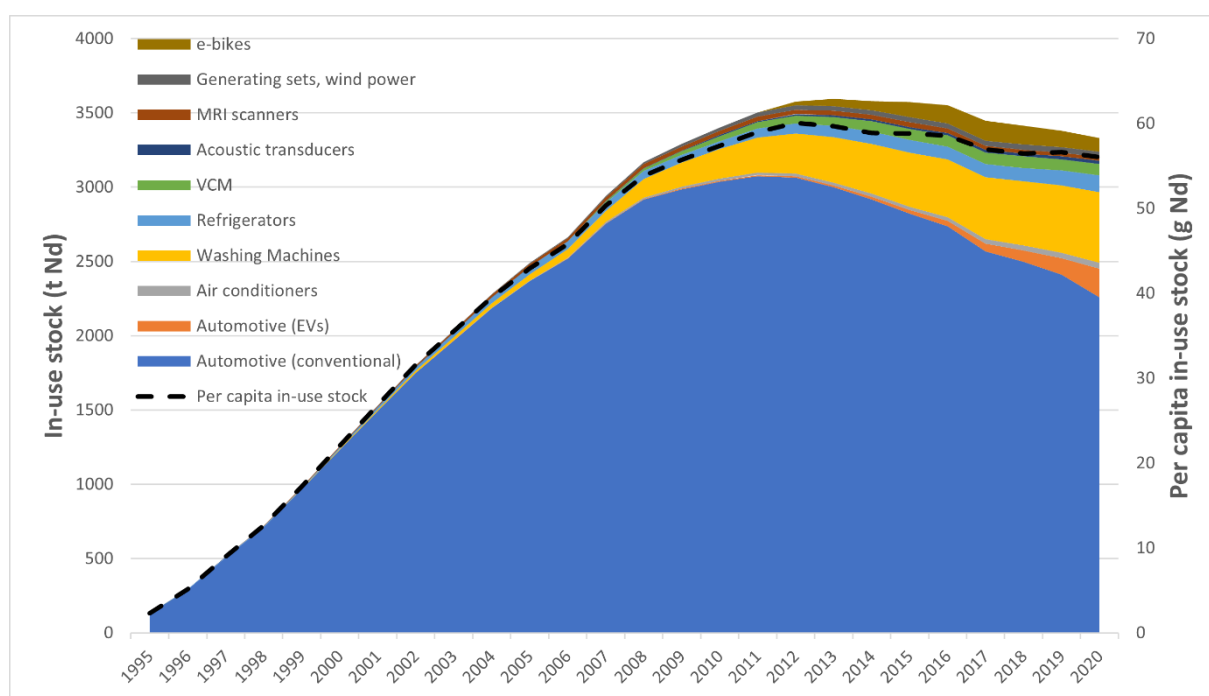


Figura 4.10 Riserva totale in uso del neodimio in Italia e pro capite.

4.5.3 Analisi di incertezza e sensibilità

L'analisi di sensibilità è stata eseguita utilizzando nel modello i valori di limite inferiore e superiore delle concentrazioni di neodimio nei prodotti analizzati, alternativamente alla media aritmetica. Nella **Figura 4.11** e **Figura 4.12** sono riportate la domanda di neodimio per la fase d'uso e la riserva in uso totale, con gli intervalli di incertezza stimati. Nel 2020, la deviazione

standard per la domanda risulta essere di ± 37 t Nd (249-323 t Nd), mentre per la riserva in uso di ± 541 t Nd (2790-3872 t Nd). Il contributo principale all'incertezza della domanda è dato dalle categorie delle autovetture convenzionali, elettriche e dei frigoriferi. Per la riserva in uso dalle auto convenzionali, dai frigoriferi e dalle e-bikes. Il modello appare sufficientemente robusto, con delle deviazioni standard per il consumo e la riserva in uso del 13% e 16% rispettivamente, nonostante l'alta variabilità delle concentrazioni di certi prodotti, come autovetture convenzionali e frigoriferi, che si riflette sull'incertezza dei risultati.

Un affinamento dell'analisi di incertezza e sensibilità sarebbe attuabile tramite l'uso di metodi statistici più sofisticati, come la legge di Gauss o la simulazione di Monte Carlo, per poter valutare l'incertezza di altre variabili.

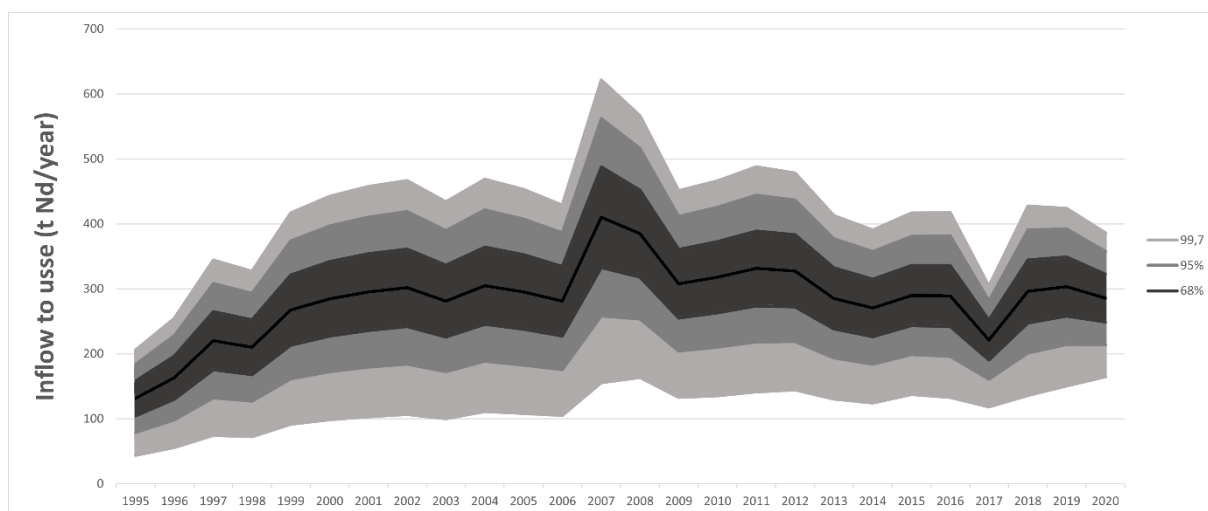


Figura 4.11 Risultato dell'analisi di sensibilità sul consumo. La linea nera è il valore medio e le aree grigie comprendono i risultati tra $\pm 1\sigma$, $\pm 2\sigma$ e $\pm 3\sigma$.

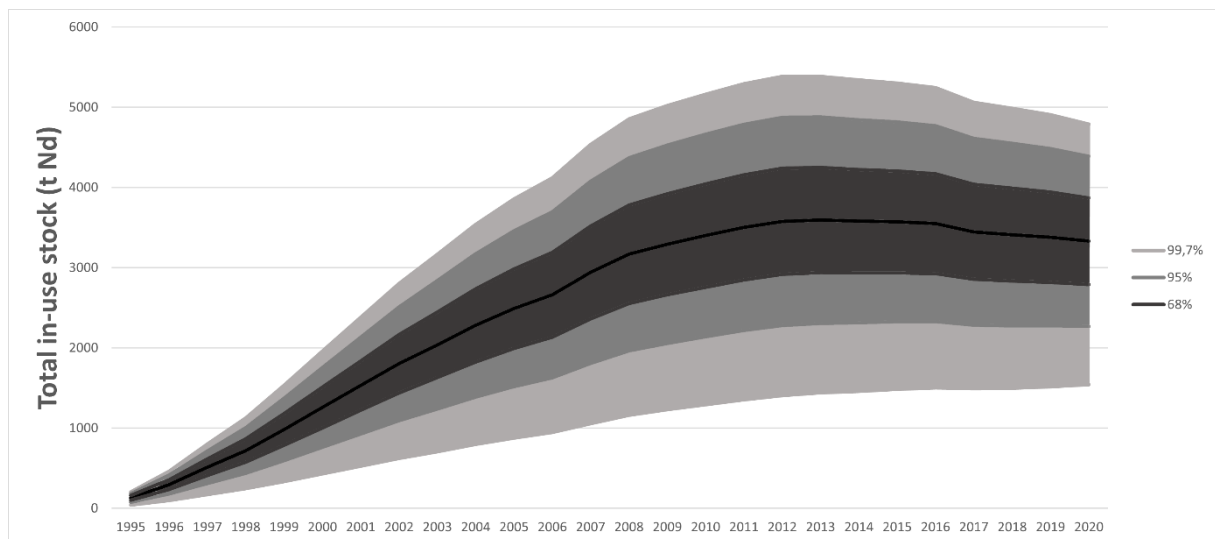


Figura 4.12 Risultato dell'analisi di sensibilità sulla riserva in uso totale. La linea nera è il valore medio e le aree grigie comprendono i risultati tra $\pm 1\sigma$, $\pm 2\sigma$ e $\pm 3\sigma$.

5 LCA: VALUTAZIONE DEGLI IMPATTI AMBIENTALI

5.1 Categorie di impatto ambientale

I risultati dell'MFA sono stati combinati con i metodi di valutazione di impatto della LCA, per valutare i potenziali benefici ambientali per l'Italia, ottenibili con il riciclo di neodimio. Esiste un'ampia scelta di metodologie standard per la valutazione degli impatti ambientali, ognuna con le proprie categorie di impatto e fattori di caratterizzazione. Per la portata e i fini dello studio, si è deciso di utilizzare le singole categorie di “cambiamento climatico” e “domanda cumulativa di energia” (*cumulative energy demand*, CED), per confrontare le quantità di gas climalteranti emesse e di energia richiesta da processi di riciclo, ipoteticamente localizzati in Italia, rispetto alla produzione primaria cinese. L'applicazione di queste due categorie potrebbe nascondere altri importanti impatti dei processi, ma è un approccio comunemente usato in letteratura per fornire una prima indicazione di impatto ambientale per processi di interesse industriale (Ciacci et al., 2019; Heidari & Anctil, 2022; Zhao et al., 2021). Inoltre, queste due categorie di impatto risultano di facile comprensione anche per chi non ha familiarità con l'LCA.

La mitigazione del cambiamento climatico è stata riconosciuta come una delle più grandi sfide che il mondo sta affrontando e che nei prossimi decenni continuerà a influenzare le vite di cittadini e imprese (ISO, 2018). In risposta al cambiamento climatico, iniziative internazionali, nazionali, regionali e locali vengono sviluppate e implementate dai settori pubblico e privato, per ridurre le concentrazioni di GHG in atmosfera. Queste iniziative fanno affidamento sulle quantificazioni e dichiarazioni delle emissioni di GHG, perciò diverse metodologie standard, in conformità ai principi di LCA, sono state sviluppate per la valutazione della *carbon footprint*. I principali standard sono il protocollo GHG, creato dalla collaborazione tra il World Business Council for Sustainable Development e il World Resources Institute, e l'ISO 14067. La quantificazione della *carbon footprint* è stata eseguita attraverso l'indicatore del potenziale di riscaldamento globale (*global warming potential*, GWP) con un orizzonte temporale di 100 anni (GWP100), come indicato dal gruppo di studio intergovernativo sui cambiamenti climatici (Intergovernmental Panel on Climate Change, IPCC). Il GWP di una sostanza è il rapporto tra il contributo all'effetto serra dovuto all'emissione in atmosfera di 1 kg di tale sostanza e quello fornito dall'emissione di 1 kg di CO₂, valutato su un determinato periodo di tempo di permanenza dei gas in atmosfera. Perciò, i quantitativi di GHG emessi sono espressi in termini di chilogrammi di CO₂ equivalenti. La considerazione dell'orizzonte temporale è fondamentale dato che l'assorbimento della radiazione dipende dal tempo di vita e dalla concentrazione dei

GHG in atmosfera. I GHG considerati sono i gas elencati e regolati dal protocollo di Kyoto (1997) e dall'accordo di Parigi (2015): anidride carbonica, metano (CH_4), protossido d'azoto (N_2O), idrofluorocarburi (HFC), perfluorocarburi (PFC), esafluoruro di zolfo (SF_6) e trifluoruro d'azoto (NF_3).

L'analisi del CED valuta i consumi, diretti e indiretti, di energia lungo il ciclo di vita, fornendo una base importante per individuare opportunità e priorità nella riduzione del consumo energetico. Il risparmio energetico è un importante prerequisito per uno sviluppo sostenibile, in quanto diversi problemi ambientali, tra cui il cambiamento climatico, sono fortemente legati al consumo di energia. La quantificazione del CED è stata eseguita in base al metodo pubblicato da Ecoinvent, che impiega le seguenti categorie di risorse non rinnovabili per la produzione di energia:

- Fossile, che include carbone, lignite, petrolio, gas naturale, gas di scarico dall'estrazione di carbonio e torba.
- Nucleare, che include solo l'uranio.
- Biomassa, che comprende legno e biomassa da foreste primarie.

E le seguenti categorie di risorse rinnovabili:

- Biomassa, che comprende legno, alimenti e biomassa da agricoltura.
- Vento (energia eolica), sole (energia solare) e calore nel sottosuolo (energia geotermica).
- Acqua, che include centrali idroelettriche ad acqua fluente e bacini idroelettrici.

I valori di CED sono espressi in MJ e la somma delle diverse categorie fornisce il CED totale.

5.2 Processi di produzione e riciclo

Il modello di LCA è stato creato calcolando le emissioni di CO_2eq per kg di neodimio e i MJ per kg di neodimio per il processo di produzione dal sito di Bayan Obo, descritto nel paragrafo 2.3.1, e quattro differenti processi di riciclo. I processi di riciclo considerati sono il processo *magnet-to-magnet*, due processi idrometallurgici, il primo con HCl e il secondo di clorurazione a stato solido con NH_4Cl , e un processo pirometallurgico. Le quattro tecnologie sono state selezionate in quanto promettenti dal punto di vista economico e con inventari di energia e di massa disponibili in letteratura. L'inventario della produzione primaria è stato adattato dall'inventario della LCA di Marx et al. (2018). L'unità funzionale per la produzione primaria è l'output di 1 kg di neodimio. L'inventario del riciclo *magnet-to-magnet* è stato preso dal

lavoro di Zakotnik et al. (2016), che si basa sul processo a scala industriale della Noveon Magnetics. L'inventario di Zakotnik et al. si basa sul riciclo di magneti NdFeB provenienti da HDD e tiene in considerazione solo gli input di energia del processo, ritenendo completamente trascurabili gli input materiali. Questa assunzione è stata dimostrata valida anche da altri studi: Jin et al. (2018) riporta che il contributo dell'elettricità al GWP del processo *magnet-to-magnet* è del 98%. Gli inventari dei processi metallurgici sono stati adattati dallo studio di LCA di Becci et al. (2021), nel quale i processi valutati sono ancora in scala di laboratorio e presentano delle approssimazioni per considerare lo *scale-up*. A differenza dell'inventario *magnet-to-magnet*, i tre inventari dei processi metallurgici considerano una separazione manuale del magnete dal rifiuto, che corrisponde a un impatto ambientale nullo. Gli inventari di Becci et al. sono stati modificati per aggiungere lo stadio di elettrolisi necessario all'ottenimento del metallo dall'ossido o fosfato. L'unità funzionale per i quattro processi di riciclo è l'input di 1 kg di magneti permanenti a fine vita. Un metodo di allocazione economica, basato sul prezzo di mercato degli elementi costituenti il magnete, è stato applicato per poter distribuire i carichi ambientali al neodimio riciclato e compararli con il neodimio vergine. I confini dello studio sono "*from cradle to gate*", ma il prodotto del riciclo *magnet-to-magnet* non è neodimio metallico, come per tutti gli altri processi, bensì il magnete riciclato. Inoltre, nei processi metallurgici l'output finale degli inventari sono tutte le terre rare contenute nel magnete. Nonostante ciò, grazie all'allocazione economica è possibile comparare gli impatti ambientali dovuti al solo neodimio. Il software utilizzato per la costruzione del modello di LCA è SimaPro, versione 9.4, insieme al database di Ecoinvent 3 per tutti gli input e gli output degli inventari, ad eccezione del mix di energia elettrica italiano per i processi di riciclo, che è stato modellato sulla base dei dati aggiornati al 2020 dell'Agenzia internazionale dell'energia (International Energy Agency, IEA, 2022). I risultati ottenuti sono stati integrati con i risultati del modello dinamico di MFA su Microsoft Excel®, per ottenere stime conservative sulla riduzione delle emissioni di GHG e di energia consumata.

5.2.1 Produzione primaria

Le operazioni considerate per il processo di produzione di Bayan Obo comprendono: l'estrazione mineraria di monazite e bastnäsite, la frantumazione e macinazione, la flottazione, il *roasting*, la lisciviazione e la pre-separazione inorganica, l'estrazione con solvente e precipitazione, la calcinazione, la produzione dell'elettrolita (NdF_3) e l'elettrolisi in sali fusi del Nd_2O_3 . Per una descrizione dettagliata del processo si rimanda ai paragrafi 2.3.1 e 2.3.2.

L'inventario per l'elettrolisi in sali fusi di Marx et al. (2018) è stato applicato ai processi metallurgici.

5.2.2 Riciclo magnet-to-magnet

Stadio	Input di energia
Estrazione REE	0,887 kWh
Raccolta magneti	1,016 kWh
Demagnetizzazione	0,075 kWh
Pulizia superficiale	0,014 kWh
Decrepitazione con idrogeno	0,240 kWh
Fresatura intermedia	0,015 kWh
Fresatura finale	0,530 kWh
Pressatura isostatica	0,029 kWh
Sinterizzazione	0,460 kWh
Ricottura	0,084 kWh

Tabella 5.1 Bilancio di energia del processo magnet-to-magnet, modificato da Zakotnik et al. (2016).

Il processo comincia con la rimozione dei magneti dai prodotti a fine vita, tramite l'uso di un impianto semi-automatico. La rimozione è realizzata eseguendo un taglio su un angolo del HDD oppure per macinazione. Il magnete separato viene posto per 30 minuti in una muffola e scaldato fino a 400°C, temperatura superiore alla temperatura di Curie dei magneti NdFeB (325 °C), per ottenere la demagnetizzazione e l'indebolimento di eventuali adesivi presenti. Il riscaldamento può essere eseguito con aria o in atmosfera inerte e, dato il possibile rischio di emissioni tossiche dovute al riscaldamento, i rifiuti gassosi vengono bruciati con un ossidatore termico rigenerativo. I magneti vengono separati e puliti con un getto abrasivo per 15 minuti, in modo da rimuovere lo strato metallico protettivo di anticorrosione. La pulizia procede con una macinazione meccanica della superficie dei magneti e un'immersione di 3 minuti in un bagno acido di HNO₃ diluito. La perdita in massa di NdFeB stimata per la pulizia è del 1-2%. Successivamente si ha la decrepitazione con idrogeno, nel quale i magneti vengono esposti a un'atmosfera di idrogeno di 1 bar a 80 °C. All'interno del reattore di decrepitazione vengono aggiunti gli additivi (Nd, Pr) necessari al ripristino delle proprietà magnetiche. In seguito, la polvere di NdFeB viene scaldata alla temperatura di 550 °C per la parziale degassificazione del materiale. La distribuzione granulometrica ottenuta da questo stadio è tipicamente di 10-2000 µm. Per ottenere la granulometria desiderata, viene eseguita una fresatura a getto in due stadi. Dopo una prima fresatura, la polvere viene trasferita in un mulino a cilindri per aggiungere il lubrificante (1% in massa rispetto alla polvere) per lo stadio di allineamento magnetico. La polvere subisce la seconda fresatura a getto, ottenendo una granulometria di 4 µm, a una

velocità di 28,6 kg/h. La perdita di materiale osservata in questo stadio è del 1% in massa. Gli stadi successivi, di allineamento e pressatura nel campo magnetico, di sinterizzazione e di ricottura sono pressoché identici agli stadi di manifattura di un magnete nuovo (paragrafo 2.4.1.1). I magneti permanenti prodotti presentano prestazioni paragonabili, se non superiori, a quelle dei magneti iniziali.

5.2.3 Processo idrometallurgico

Stadio	Input di energia	Input di materia
Demagnetizzazione	0,058 kWh	
Frantumazione e macinazione	0,010 kWh	
Ossidazione	0,369 kWh	
Lisciviazione	0,164 kWh	13,6 kg acqua 0,250 kg HCl
Precipitazione	0,041 kWh	0,257 kg acido ossalico
Roasting	0,094 kWh	
Elettrolisi	2,65 kWh	9,59 g NdF ₃ 0,94 g LiF

Tabella 5.2 Bilancio di energia e di materia del processo idrometallurgico, modificato da Becci et al. (2021)

I magneti NdFeB vengono preliminarmente demagnetizzati a 310°C per 1 ora, poi macinati fino a ottenere una granulometria inferiore a 150 µm. Le particelle subiscono l'operazione di roasting a 810°C per 6 ore, per convertire il ferro in Fe₂O₃, che è meno propenso alla dissoluzione nella successiva lisciviazione con HCl (0,5 M). La lisciviazione delle terre rare (Nd, Pr e Dy) è condotta secondo le seguenti condizioni: concentrazione della polvere magnetica di 10% m/v, temperatura di 95°C e tempo di 5 ore. La purezza delle terre rare risulta essere del 98%, con una concentrazione di ioni ferro di 0,014 g/L. Dopodiché, la soluzione di lisciviazione viene filtrata e il residuo di Fe₂O₃ è recuperato con una purezza del 93%. La soluzione filtrata viene trattata con acido ossalico per la precipitazione delle terre rare. Gli ossalati subiscono un ulteriore roasting a 800°C per 2 ore, per convertire gli ossalati in ossidi. L'efficienza del recupero e la purezza risultano superiori al 98%. Il liquido residuo viene riciclato per la preparazione di una nuova soluzione di lisciviazione. Infine, si ha il processo di elettrolisi in sali fusi, come nella produzione primaria (paragrafo 2.3.2), per ottenere i metalli di terre rare.

5.2.4 Processo pirometallurgico

Stadio	Input di energia	Input di materia
Demagnetizzazione	0,058 kWh	

Frantumazione e macinazione	0,010 kWh	
Ossidazione	0,434 kWh	
Riduzione	6,688 kWh	0,15 g argon
Separazione magnetica	0,001 kWh	
Elettrolisi	2,65 kWh	9,59 g NdF ₃ 0,94 g LiF

Tabella 5.3 Bilancio di energia e di materia del processo pirometallurgico, modificato da Becci et al. (2021)

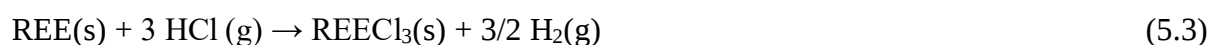
Come per il processo idrometallurgico, sono presenti uno stadio preliminare di demagnetizzazione a 310°C per 1 ora e uno stadio di macinazione per ottenere una granulometria inferiore a 150 µm. La polvere risultante viene ossidata a 1000 °C per 2 ore per convertire i metalli in una miscela di ossidi: Nd₂O₃, Pr₂O₃, La₂O₃, Fe₂O₃, Al₂O₃ e B₂O₃. Dopodiché, gli ossidi vengono scaldati a 1400-1500°C per 7 ore, sotto atmosfera inerte di Ar (200 mL/min), ottenendo la riduzione dell'Fe₂O₃ a Fe, che viene rimosso per separazione magnetica. Gli ossidi di terre rare risultanti presentano una purezza maggiore di 95%, con tracce di Al₂O₃ e B₂O₃. Gli ossidi vengono ridotti con il processo di elettrolisi in sali fusi.

5.2.5 Clorurazione a stato solido

Stadio	Input di energia	Input di materia
Demagnetizzazione	0,066 kWh	
Frantumazione e macinazione	0,010 kWh	
Miscelazione		1,5 kg NH ₄ Cl
Clorurazione	1,740 kWh	0,116 kg N ₂
Produzione di NH ₃		1,91 kg acqua
Lisciviazione		21 kg acqua 0,63 kg acido acetico 0,30 kg acetato di sodio
Estrazione e precipitazione		2,26 kg DEPHA 1,58 kg n-eptano 2,03 kg H ₃ PO ₄ 5,65 kg acqua
Elettrolisi	2,65 kWh	9,59 g NdF ₃ 0,94 g LiF

Tabella 5.4 Bilancio di energia e di materia della clorurazione a stato solido, modificato da Becci et al. (2021)

I magneti permanenti sono demagnetizzati a 350 °C per 2 ore e poi macinati fino a ottenere particelle con una granulometria inferiore a 100 µm. Dopo questi pretrattamenti, la polvere viene miscelata con NH₄Cl, con un rapporto 1:3 m/m. La clorurazione a stato solido è condotta alla temperatura di 285 °C per 2,5 ore. A questa temperatura l'NH₄Cl decompone in NH₃ e HCl (Eq. 5.1), e l'HCl gassoso reagisce con i metalli per formare i cloruri (Eq. 5.2 ed Eq. 5.3)



L'NH₄Cl non reagito viene recuperato e riusato per ulteriori clorurazioni a stato solido. Successivamente, i cloruri sono trattati con una soluzione tampone (21,02 g di soluzione tampone per 1 g di magnete). La soluzione tampone è composta da acido acetico 0,5 M e NaCH₃COO · 3H₂O 0,01 M (pH 3). La lisciviazione è condotta a temperatura ambiente per 2,5 h. Il processo consente di ottenere un'efficienza di lisciviazione per il ferro e le terre rare, rispettivamente del 93% e del 84%. Il rimanente 16% delle terre rare nel residuo solido può essere recuperato con una seconda clorurazione a stato solido. Lo stadio di recupero è condotto con il solvente DEHPA, diluito in eptano, a una concentrazione del 50% v/v. La soluzione viene trattata con H₃PO₄ per la precipitazione selettiva delle terre rare, con un'efficienza di recupero del 98%. Il 95% del solvente e della soluzione acquosa possono essere riciclati. Segue l'elettrolisi in sali fusi.

5.3 Allocazione economica

Dal momento che gli inventari di riciclo fanno riferimento all'input di magneti NdFeB da riciclare, tramite l'uso di un fattore di allocazione economico, gli impatti ambientali sono stati assegnati appropriatamente al neodimio del magnete da riciclare. La composizione del magnete utilizzata per l'allocazione fa riferimento all'analisi elementale con ICP effettuata da Zakotnik et al. (2016), sui magneti dei RAEE (**Tabella 5.5**). I prezzi dei metalli, ad eccezione del boro, sono stati presi dal database di Shanghai Metal Market il 14 ottobre 2022 e rappresentano una media dei prezzi dei precedenti 30 giorni. In quanto non disponibile su Shanghai Metal Market, la fonte del prezzo medio del boro è il "Mineral Commodity Summaries 2022" dell'USGS. L'impiego dell'allocazione economica è frequente negli studi di LCA dedicati alle terre rare, sia per i processi di produzione (Arshi et al., 2018; Vahidi & Zhao, 2018) che per i processi di riciclo (Becci et al., 2021; Chowdhury et al., 2021), dato che vengono generati più co-prodotti con valori economici molto differenti. Ad esempio, il prezzo attuale del disprosio è di 413 €/kg, mentre il prezzo del neodimio è di circa 129 €/kg.

Elemento	Campione 1 (% m/m)	Campione 2 (% m/m)	Composizione media (% m/m)	Prezzo (€/kg)	Fattore di allocazione
Nd	19,86	19,87	19,87	128,80	2,60

Fe	67,61	67,58	67,6	0,91	0,02
B	1,03	1,02	1,03	0,40	0,01
Dy	3,45	3,45	3,45	413,00	8,30
Al	0,52	0,53	0,53	2,90	0,06
Cu	0,14	0,14	0,14	9,12	0,18
Co	0,98	0,99	0,99	52,50	1,05
Pr	6,12	6,12	6,12	142,70	2,87
C	0,08	0,08	0,08	0	0
O	0,11	0,12	0,12	0	0

Tabella 5.5 Fattori di allocazione economica per i processi di riciclo del neodimio

Assumendo che il prezzo di un elemento di concentrazione C_i sia P_i , il fattore di allocazione (FA_i) è calcolato con la seguente equazione (**Eq. 5.4**):

$$FA_i = \frac{P_i \cdot C_i}{\sum P_i \cdot C_i} \cdot \frac{1}{M_i} \quad (5.4)$$

Dove M_i è la massa dell'elemento i in riferimento all'unità funzionale.

Moltiplicando il fattore di allocazione per il GWP e CED del processo è possibile calcolare il GWP e CED dell'elemento i (**Eq. 5.5** ed **Eq. 5.6**):

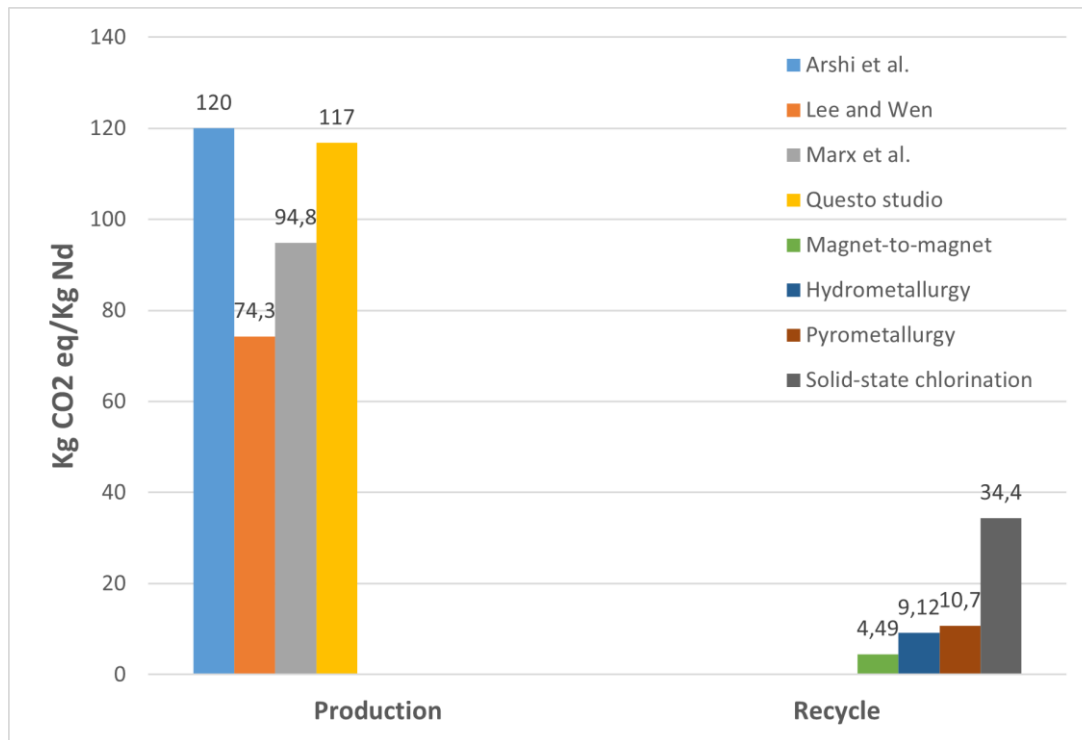
$$GWP_i = FA_i \cdot GWP_{processo} \quad (5.5)$$

$$CED_i = FA_i \cdot CED_{processo} \quad (5.6)$$

5.4 Risultati e discussione LCA

La **Tabella 5.6** riporta i risultati della valutazione delle emissioni di GHG e dell'energia richiesta dalla produzione primaria di neodimio e dai quattro processi di riciclo. I risultati ottenuti per la produzione primaria si discostano dai valori presenti nel database di Ecoinvent per la produzione di neodimio (49,5 kgCO₂eq/kg Nd). La ragione è nell'inventario di Ecoinvent, che possiede dati obsoleti e assunzioni non rappresentative per il processo reale di Bayan Obo. I risultati sono più in linea con quelli riportati in letteratura da Arshi et al., (2018), che hanno stimato un GWP di 120 kgCO₂eq/kg Nd, e da Lee & Wen (2017), che hanno stimato un GWP di 74,3 kgCO₂eq/kg Nd. Non sono stati trovati dati recenti sul CED della produzione di neodimio.

Processo	GWP (kgCO ₂ eq/kg Nd)	CED (MJ/kg Nd)
Produzione primaria	117	1620
Magnet-to-magnet	4,49	73,9
Idrometallurgico	9,12	155
Pirometallurgico	10,7	217

Tabella 5.6 Valori di impatto per le categorie di GWP e CED dei processi analizzati in questo studio.**Figura 5.1** GWP dei processi di produzione primaria, stimato da diverse LCA, e dei processi di riciclo.

I quattro processi di riciclo mostrano chiaramente degli impatti inferiori nelle due categorie considerate, con il processo *magnet-to-magnet* che risulta essere il più sostenibile in entrambe le categorie di impatto, data l'assenza di sostanze chimiche e del processo energivoro di elettrolisi in sali fusi. Il vantaggio dei processi metallurgici è nella possibilità di riciclare rifiuti differenti da magneti, come batterie e ceramiche, e di ottenere il neodimio metallico come prodotto. Nella **Figura 5.2** è rappresentato il diagramma di flusso del processo di produzione primaria, con le percentuali di contributo dei sotto-processi per il GWP. Nelle **Figura 5.3**, **Figura 5.4**, **Figura 5.5** e **Figura 5.6** sono presenti i contributi percentuale di ogni stadio dei processi di riciclo al GWP. Gli stadi più impattanti risultano essere l'estrazione dei REE additivi per il *magnet-to-magnet*, l'elettrolisi per l'idrometallurgico, la riduzione con Ar per il pirometallurgico e l'estrazione e precipitazione per la clorurazione a stato solido. Tutti questi stadi, ad eccezione dell'estrazione e precipitazione, richiedono input di energia elettrica relativamente alti. La crescita dell'energia rinnovabile nei prossimi anni garantirà un calo drastico degli impatti per i primi tre processi di riciclo. È importante ricordare che sono state valutate solo due categorie di impatto perciò il processo di clorurazione potrebbe non essere quello più ambientalmente sfavorevole: Becci et al. (2021) riportano impatti inferiori in diverse categorie, tra cui acidificazione ed eutrofizzazione.

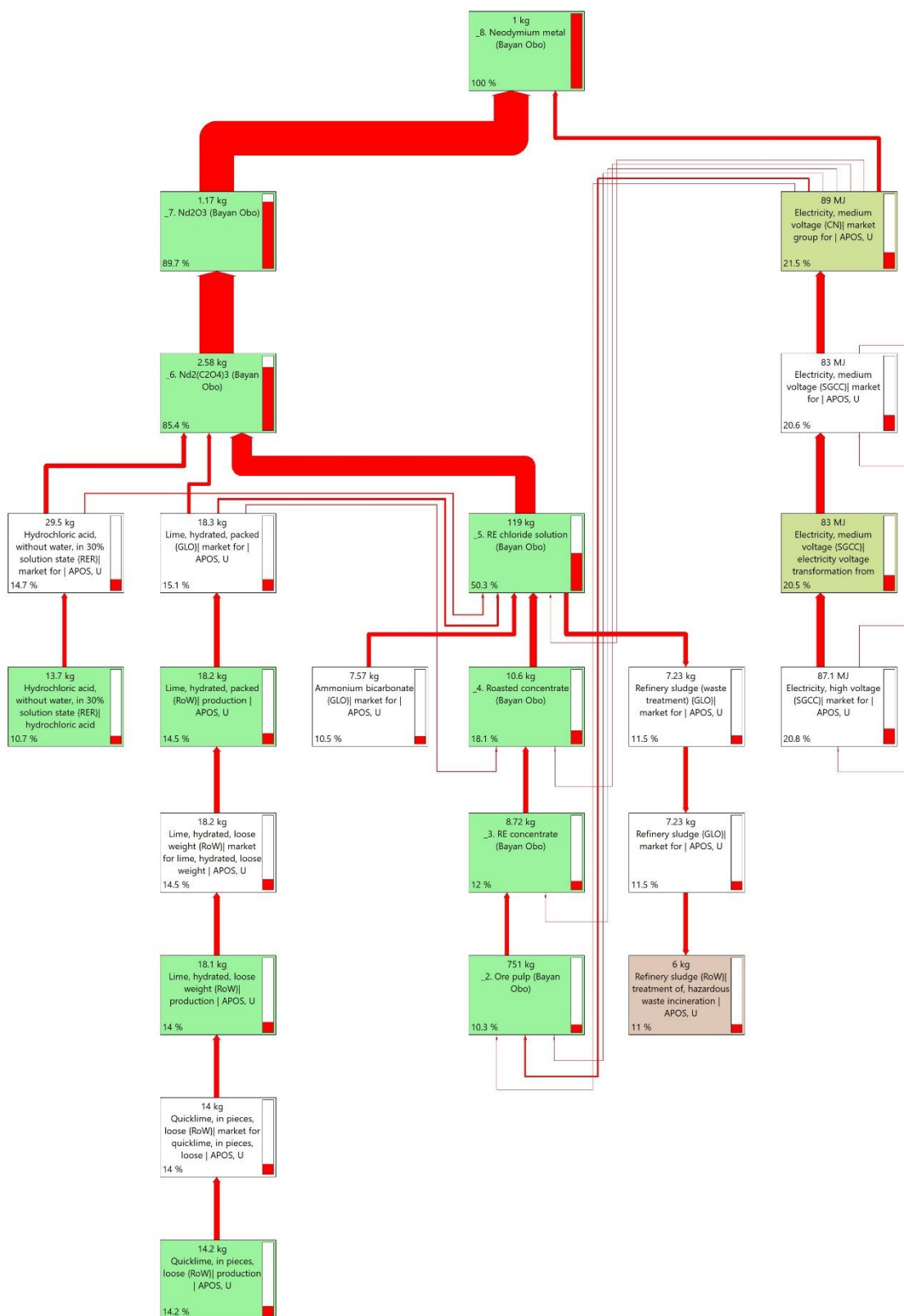


Figura 5.2 Diagramma di flusso del processo di produzione di Nd a Bayan Obo, ottenuto con il software SimaPro, con percentuali di contributo al GWP.

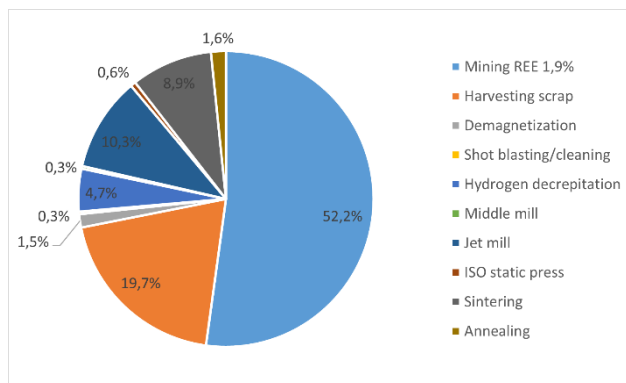


Figura 5.3 Processo magnet-to-magnet. contributi percentuali al GWP. I risultati per il CED sono analoghi.

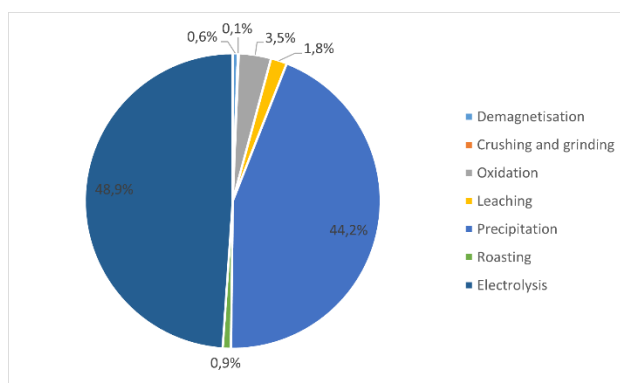


Figura 5.4 Processo idrometallurgico, contributi percentuali al GWP. I risultati per il CED sono analoghi.

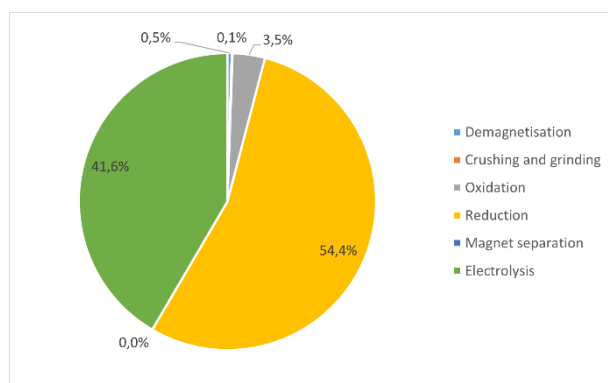


Figura 5.5 Processo pirometallurgico, contributi percentuali al GWP. I risultati per il CED sono analoghi.

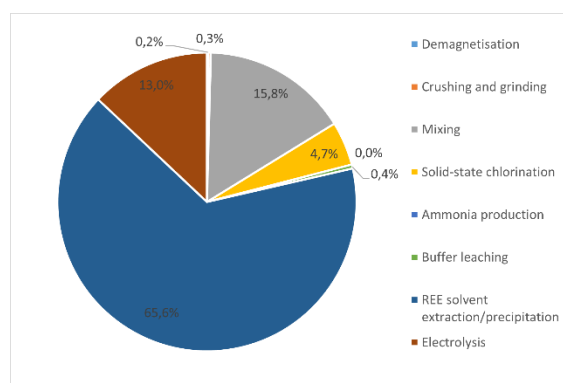


Figura 5.6 Processo di clorurazione a stato solido, contributi percentuali al GWP. I risultati per il CED sono analoghi.

I risultati di MFA hanno dimostrato che le fonti secondarie di neodimio se venissero completamente riciclate, potrebbero soddisfare da sole la domanda italiana del metallo nei prossimi 11 anni. Applicando la media dei valori di GWP e CED dei processi di riciclo al flusso di rifiuti generato mediamente negli ultimi 5 anni, si stima che circa 28 ktCO₂eq potrebbero essere evitate e 424 TJ potrebbero essere risparmiati annualmente. Più dell'80% delle emissioni GHG e della energia richiesta dalla produzione primaria sarebbero ridotti. Tenendo in considerazione soltanto il neodimio contenuto nei prodotti che vengono effettivamente raccolti a fine vita e le percentuali di resa dei processi di riciclo, la riduzione annuale ammonterebbe a 18 ktCO₂eq e 271 TJ. Estendendo la proiezione alla riserva totale in uso, i valori massimi di emissioni GHG evitate e di energia risparmiata sono stimati in 289 ktCO₂eq e 4320 TJ (**Figura 5.7**). Questi valori di riduzione sono stime conservative e possono essere viste come un credito nei confronti dell'ambiente, da poter "investire" per migliorare il processo di gestione dei rifiuti. Ad esempio, questo credito potrebbe essere speso nell'automazione del recupero di neodimio, rendendo il processo più efficiente ed economicamente sostenibile: gli inventari dei tre processi metallurgici considerano un'estrazione manuale del magnete dal rifiuto. Inoltre, gli inventari di riciclo analizzati non tengono in considerazione del trasporto necessario alla raccolta dei rifiuti, che in funzione del peso trasportato e della distanza percorsa va a ridurre il credito ambientale.

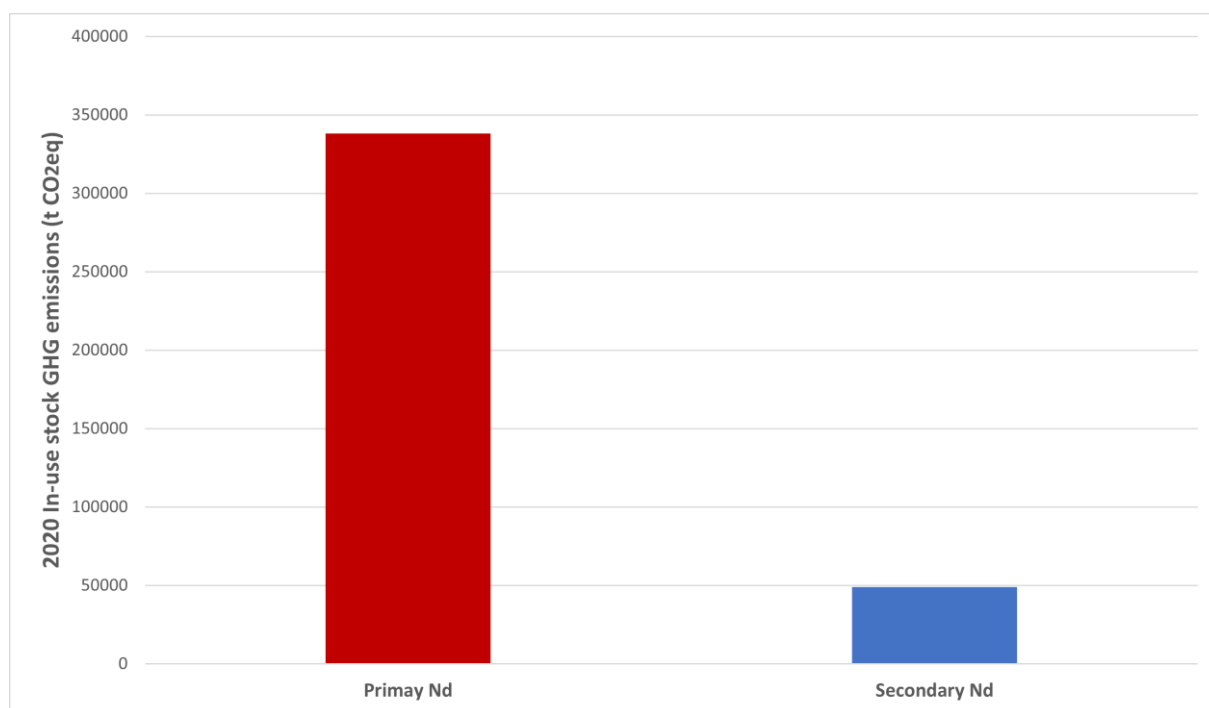


Figura 5.7 Stima conservativa sull'emissioni di GHG dalla produzione primaria e dai processi di riciclo per ricreare la riserva in uso.

6 CONCLUSIONI

Tramite il modello dinamico di MFA, integrato alla metodologia di valutazione di impatti della LCA, questo studio fornisce, una prima valutazione del ciclo antropogenico del neodimio in Italia e delle potenzialità derivanti da un suo riciclo. L'analisi ha permesso di identificare e quantificare i flussi storici e le riserve del metallo e di stimare i potenziali benefici ambientali associati al recupero e riciclo della riserva in uso. Negli ultimi decenni il neodimio è diventato un elemento chiave della nostra società moderna: la domanda del mercato è più che raddoppiata, passando da 131 t Nd nel 1995 a 286 t Nd nel 2020, e la riserva accumulata all'interno dei beni che impieghiamo quotidianamente ha raggiunto le 3,3 kt Nd. Le miniere urbane accumulate nelle nostre città possiedono un'elevata potenzialità di soddisfare la domanda nazionale di neodimio nei prossimi anni se iniziative di recupero e riciclo sono implementate con successo. La produzione secondaria di neodimio potrebbe coprire l'attuale richiesta del mercato per i prossimi 11 anni, riducendo la dipendenza italiana dalle importazioni dalla Cina. Inoltre, questa fonte secondaria garantirebbe un approvvigionamento più sostenibile dal punto di vista ambientale, come dimostrato dai risultati della valutazione degli impatti. Una riduzione di 289 ktCO₂eq (86%) e di 4320 TJ (80%) sono potenzialmente ottenibili dal riciclo della riserva in uso. Fondamentale sarà concentrare gli sforzi sul recupero e il riciclo del neodimio contenuto all'interno di autovetture convenzionali ed elettriche, che attualmente costituiscono il ~73% della riserva in uso e che già presentano un'alta percentuale di raccolta a fine vita (84%). Il settore degli elettrodomestici, che comprende lavatrici, asciugatrici, frigoriferi, freezer e condizionatori d'aria, sarà un'altrettanta importante risorsa secondaria di neodimio, ma maggiore attenzione va posta alla raccolta di questi prodotti a fine vita, che attualmente è inferiore al 40%. Oltre alla raccolta dei rifiuti, sono molte le barriere, di natura economica, tecnologica e politica, che ostacolano il recupero e il riciclo di neodimio dai prodotti a fine vita. È importante tenere in considerazione che i tempi di vita utile di queste applicazioni limitano la disponibilità di neodimio secondario. Perciò, anche le categorie dei VCM e delle e-bikes, che contribuiscono in misura minore alla riserva in uso, saranno un'importante risorsa secondaria, dato che generano una quantità consistente di rifiuti su base annuale. I prodotti studiati sono spesso assemblati in architetture complesse e avverse al riciclo, che rendono difficile l'identificazione e il recupero dei componenti contenenti il neodimio, come magneti e ceramiche. Sarà importante stabilire requisiti di eco-design nei prodotti, per facilitarne il disassemblaggio ed evitare un riciclo non funzionale del metallo. Ma la sfida più grande rimarrà essere il costo economico associato al riciclo su grande scala. Nonostante il continuo aumento dei prezzi del neodimio, attualmente il riciclo non risulta essere economicamente competitivo,

a causa della diluizione del neodimio nei RAEE e dei costi del disassemblaggio manuale (Rizos et al., 2022). L'integrazione del riciclo di neodimio con i processi di riciclo degli altri materiali che costituiscono il rifiuto e la dotazione di incentivi finanziari saranno fondamentali per rendere il riciclo economicamente sostenibile.

Questa prima valutazione del ciclo italiano del neodimio è stato un lavoro ambizioso, che ha richiesto certe approssimazioni e scelte che potrebbero aver influenzato i risultati. Per il modello di MFA, soltanto un sottoinsieme di tutti i prodotti contenenti neodimio è stato analizzato e l'assenza di informazioni sulle penetrazioni di mercato in Italia ha comportato l'uso di dati proxy europei. Un grado di dettaglio maggiore sulle penetrazioni di mercato dei prodotti a base di neodimio in Italia sarebbe necessario, in particolare sui motori e robot industriali impiegati nell'automazione di fabbrica. Come descritto nell'analisi di incertezza, il modello risulta sufficientemente robusto, malgrado l'alta variabilità delle concentrazioni di certi prodotti. Un affinamento dell'analisi di incertezza e sensibilità sarebbe necessario, in quanto le incertezze delle altre variabili che caratterizzano il modello dinamico non state analizzate. Per il modello di LCA, considerazioni future andrebbero svolte su un maggior numero di categorie di impatto e i confini del sistema potrebbero essere estesi, per tenere in considerazione la logistica necessaria alla raccolta dei prodotti a fine vita. In ogni caso, il modello sviluppato per questa tesi fornisce una prima base per future ricerche e iniziative politiche. Lo studio potrebbe stimolare un coinvolgimento più diretto degli *stakeholders* della catena del valore del neodimio, che risulterebbe fondamentale per incrementare la disponibilità di informazioni e ridurre le incertezze. La natura aperta e iterativa del modello garantisce la possibilità di migliorare, in futuro, la qualità dei dati e di espandere il numero di prodotti analizzati.

BIBLIOGRAFIA

- Akil, N., Loutatidou, S., Arslan, D., Festa, E., Circelli, P., & Colella, S. (2019). *REE4EU: Market analyses, exploitation and dissemination*.
- Alves Dias, P., Bobba, S., Carrara, S., & Plazzotta, B. (2020). *The role of rare earth elements in wind energy and electric mobility: An analysis of future supply/demand balances*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2760/303258>
- Arshi, P. S., Vahidi, E., & Zhao, F. (2018). Behind the Scenes of Clean Energy: The Environmental Footprint of Rare Earth Products. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(3), 3311–3320. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03484>
- Associazione europea dei costruttori di automobili (ACEA). (2022). <https://www.acea.auto/>
- Associazione Nazionale Energia del Vento (ANEV). (s.d.). *L'EOLICO OFFSHORE IN ITALIA Il primo convegno ANEV della giornata di KeyEnergy dedicata all'eolico—ANEV*. Recuperato 16 dicembre 2022, da <https://www.anev.org/2022/11/09/leolico-offshore-in-italia-il-primo-convegno-anev-della-giornata-di-keyenergy-dedicata-alleolico/>
- Ayres, R. U., & Peiró, L. T. (2013). Material efficiency: Rare and critical metals. *Philosophical Transactions of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences*, 371(1986), 20110563. <https://doi.org/10.1098/rsta.2011.0563>
- Bandara, H. M. D., Mantell, M. A., Darcy, J. W., & Emmert, M. H. (2015). Closing the Lifecycle of Rare Earth Magnets: Discovery of Neodymium in Slag from Steel Mills. *Energy Technology*, 3(2), 118–120. <https://doi.org/10.1002/ente.201402162>
- Becci, A., Beolchini, F., & Amato, A. (2021). Sustainable Strategies for the Exploitation of End-of-Life Permanent Magnets. *Processes*, 9(5), 857. <https://doi.org/10.3390/pr9050857>
- Binnemans, K., Jones, P. T., Müller, T., & Yurramendi, L. (2018). Rare Earths and the Balance Problem: How to Deal with Changing Markets? *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4(1), 126–146. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0162-8>

- Brunner, P. H., & Rechberger, H. (2004). *Practical handbook of material flow analysis*. CRC/Lewis.
- Brunori, C. (2022). Urban mining e materie prime critiche. *ENERGIA AMBIENTE E INNOVAZIONE*, 2, 56–59. <https://doi.org/10.12910/EAI2022-057>
- Cao, Z., O’Sullivan, C., Tan, J., Kalvig, P., Ciacchi, L., Chen, W., Kim, J., & Liu, G. (2019). Resourcing the Fairytale Country with Wind Power: A Dynamic Material Flow Analysis. *Environmental Science & Technology*, 53(19), 11313–11322. <https://doi.org/10.1021/acs.est.9b03765>
- Chowdhury, N. A., Deng, S., Jin, H., Prodius, D., Sutherland, J. W., & Nlebedim, I. C. (2021). Sustainable Recycling of Rare-Earth Elements from NdFeB Magnet Swarf: Techno-Economic and Environmental Perspectives. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 9(47), 15915–15924. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.1c05965>
- Ciacchi, L., Vassura, I., Cao, Z., Liu, G., & Passarini, F. (2019). Recovering the “new twin”: Analysis of secondary neodymium sources and recycling potentials in Europe. *Resources, Conservation and Recycling*, 142, 143–152. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.11.024>
- Constantinides, S. (2016). *Market outlook for Ferrite, Rare Earth and other Permanent Magnets*.
- Crock, W. D. (2016). *Mapping stocks and flows of neodymium*.
- Cui, J., Kramer, M., Zhou, L., Liu, F., Gabay, A., Hadjipanayis, G., Balasubramanian, B., & Sellmyer, D. (2018). Current progress and future challenges in rare-earth-free permanent magnets. *Acta Materialia*, 158, 118–137. <https://doi.org/10.1016/j.actamat.2018.07.049>
- Dev, S., Sachan, A., Dehghani, F., Ghosh, T., Briggs, B. R., & Aggarwal, S. (2020). Mechanisms of biological recovery of rare-earth elements from industrial and electronic

- wastes: A review. *Chemical Engineering Journal*, 397, 124596.
<https://doi.org/10.1016/j.cej.2020.124596>
- Enel Green Power. (s.d.). *Pala eolica* | *Enel Green Power*. Recuperato 16 dicembre 2022, da <https://www.enelgreenpower.com/it/learning-hub/energie-rinnovabili/energia-eolica/pala-eolica>
- European Commission. (2020a). *Study on the EU's list of critical raw materials (2020): Critical raw materials factsheets*. Publications Office. <https://data.europa.eu/doi/10.2873/92480>
- European Commission. (2020b). *Study on the EU's list of Critical Raw Materials, Final Report*. Publications Office.
- Forti, V., Baldè, C. P., & Kuehr, R. (2018). *E-Waste statistics Guidelines on classification, reporting and indicators*. United Nations University.
- Geng, J., Hao, H., Sun, X., Xun, D., Liu, Z., & Zhao, F. (2021). Static material flow analysis of neodymium in China. *Journal of Industrial Ecology*, 25(1), 114–124.
<https://doi.org/10.1111/jiec.13058>
- Goedkoop, M., Oele, M., Vieira, M., Leijting, J., Ponsioen, T., & Meijer, E. (2016). *SimaPro Tutorial*.
- Habib, K., Schibye, P. K., Vestbø, A. P., Dall, O., & Wenzel, H. (2014). Material Flow Analysis of NdFeB Magnets for Denmark: A Comprehensive Waste Flow Sampling and Analysis Approach. *Environmental Science & Technology*, 48(20), 12229–12237.
<https://doi.org/10.1021/es501975y>
- Health Images. (s.d.). *Open MRI vs. Closed MRI - Health Images*. Recuperato 16 dicembre 2022, da <https://www.healthimages.com/open-mri-vs-closed-mri/>
- Heidari, S. M., & Anctil, A. (2022). Country-specific carbon footprint and cumulative energy demand of metallurgical grade silicon production for silicon photovoltaics. *Resources*,

- Conservation and Recycling*, 180, 106171.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2022.106171>
- Hoshino, M., Sanematsu, K., & Watanabe, Y. (2016). REE Mineralogy and Resources. In *Handbook on the Physics and Chemistry of Rare Earths* (Vol. 49, pp. 129–291). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/bs.hpcr.2016.03.006>
- International Energy Agency (IEA). (s.d.). Recuperato 22 dicembre 2022, da <https://www.iea.org/countries/italy>
- International Standard Organisation (ISO) serie 14040. (2006). *Environmental management—Life cycle assessment—Principles and framework*.
- International Standard Organisation (ISO) serie 14067. (2018). *Greenhouse gases: Carbon footprint of products: requirements and guidelines for quantification* (First edition). International Organization for Standardization.
- Islam, M. T., & Huda, N. (2020). Assessing the recycling potential of “unregulated” e-waste in Australia. *Resources, Conservation and Recycling*, 152, 104526.
<https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2019.104526>
- Istituto Nazionale di Statistica (ISTAT). (s.d.). Recuperato 18 dicembre 2022, da <https://www.istat.it/>
- Istituto Superiore per la Protezione e la Ricerca Ambientale (ISPRA). (s.d.). *Portale del Servizio Geologico d'Italia*. Recuperato 22 dicembre 2022, da <http://portalesgi.isprambiente.it/it>
- Jin, H., Afiuny, P., Dove, S., Furlan, G., Zakotnik, M., Yih, Y., & Sutherland, J. W. (2018). Life Cycle Assessment of Neodymium-Iron-Boron Magnet-to-Magnet Recycling for Electric Vehicle Motors. *Environmental Science & Technology*, 52(6), 3796–3802.
<https://doi.org/10.1021/acs.est.7b05442>

- Karal, E., Kucuker, M. A., Demirel, B., Coptu, N. K., & Kuchta, K. (2021). Hydrometallurgical recovery of neodymium from spent hard disk magnets: A life cycle perspective. *Journal of Cleaner Production*, 288, 125087. <https://doi.org/10.1016/j.jclepro.2020.125087>
- Kooroshy, J., Tiess, G., & Walton, A. (2015). *Strengthening the European rare earths supply chain: Challenges and policy options*. ERECON 2015.
- Kumari, A., Sinha, M. K., Pramanik, S., & Sahu, S. K. (2018). Recovery of rare earths from spent NdFeB magnets of wind turbine: Leaching and kinetic aspects. *Waste Management*, 75, 486–498. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2018.01.033>
- Kursun, I., Terzi, M., & Tombal, T. D. (2016). HCl leaching behaviour of a bastnasite ore in terms of thorium and rare earth elements. *Russian Journal of Non-Ferrous Metals*, 57(3), 187–194. <https://doi.org/10.3103/S106782121603010X>
- Lee, J. C. K., & Wen, Z. (2017). Rare Earths from Mines to Metals: Comparing Environmental Impacts from China's Main Production Pathways: Environmental Impacts of Rare Earths in China. *Journal of Industrial Ecology*, 21(5), 1277–1290. <https://doi.org/10.1111/jiec.12491>
- Liu, H. (2016). *RARE EARTHS: SHADES OF GREY Can China Continue To Fuel Our Global Clean & Smart Future*. China Water Risk.
- Liu, Q., Sun, K., Ouyang, X., Sen, B., Liu, L., Dai, T., & Liu, G. (2022). Tracking Three Decades of Global Neodymium Stocks and Flows with a Trade-Linked Multiregional Material Flow Analysis. *Environmental Science & Technology*, 56(16), 11807–11817. <https://doi.org/10.1021/acs.est.2c02247>
- Lucas, J., Lucas, P., Le Mercier, T., Rollat, A., & Davenport, W. G. (2015). *Rare earths: Science, technology, production and use*. Elsevier.
- Machacek, E., & Kalvig, P. (2017). *Road map for REE material supply autonomy in Europe*.

- Marx, J., Schreiber, A., Zapp, P., & Walachowicz, F. (2018). Comparative Life Cycle Assessment of NdFeB Permanent Magnet Production from Different Rare Earth Deposits. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(5), 5858–5867. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b04165>
- Meyers, R. A. (A c. Di). (2002). *Encyclopedia of physical science and technology* (3rd ed). Academic Press.
- Ministero delle Imprese e del Made in Italy. (s.d.). *Materie prime critiche*. Recuperato 16 dicembre 2022, da <https://www.mise.gov.it/index.php/it/impresa/competitivita-e-nuove-imprese/materie-prime-critiche/materie-prime-critiche>
- Morimoto, S., Kuroki, H., Narita, H., & Ishigaki, A. (2021). Scenario assessment of neodymium recycling in Japan based on substance flow analysis and future demand forecast. *Journal of Material Cycles and Waste Management*, 23(6), 2120–2132. <https://doi.org/10.1007/s10163-021-01277-6>
- Morimoto, S., Sanematsu, K., Ozaki, K., Ozawa, A., & Seo, Y. (2019). Methodological study of evaluating the traceability of neodymium based on the global substance flow analysis and Monte Carlo simulation. *Resources Policy*, 63, 101448. <https://doi.org/10.1016/j.resourpol.2019.101448>
- Müller, E., Hilty, L. M., Widmer, R., Schluep, M., & Faulstich, M. (2014). Modeling Metal Stocks and Flows: A Review of Dynamic Material Flow Analysis Methods. *Environmental Science & Technology*, 48(4), 2102–2113. <https://doi.org/10.1021/es403506a>
- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (s.d.). *OECD database*. Recuperato 2 gennaio 2023, da <https://data.oecd.org/>

- Organization for Economic Co-operation and Development (OECD). (2019). *Global Material Resources Outlook to 2060: Economic Drivers and Environmental Consequences*. OECD. <https://doi.org/10.1787/9789264307452-en>
- Rizos, V., Righetti, E., & Kassab, A. (2022). *Developing a supply chain for recycled rare earth permanent magnets in the EU*. CEPS.
- Schmitz, A. M., Pian, B., Medin, S., Reid, M. C., Wu, M., Gazel, E., & Barstow, B. (2021). Generation of a *Gluconobacter oxydans* knockout collection for improved extraction of rare earth elements. *Nature Communications*, 12(1), 6693. <https://doi.org/10.1038/s41467-021-27047-4>
- Schulze, R., Abbasalizadeh, A., Bulach, W., Schebek, L., & Buchert, M. (2018). An Ex-ante LCA Study of Rare Earth Extraction from NdFeB Magnet Scrap Using Molten Salt Electrolysis. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 4(4), 493–505. <https://doi.org/10.1007/s40831-018-0198-9>
- Schulze, R., & Buchert, M. (2016). Estimates of global REE recycling potentials from NdFeB magnet material. *Resources, Conservation and Recycling*, 113, 12–27. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2016.05.004>
- Sekine, N., Daigo, I., & Goto, Y. (2017). Dynamic Substance Flow Analysis of Neodymium and Dysprosium Associated with Neodymium Magnets in Japan. *Journal of Industrial Ecology*, 21(2), 356–367. <https://doi.org/10.1111/jiec.12458>
- Sousa-Aguiar, E. F., Trigueiro, F. E., & Zotin, F. M. Z. (2013). The role of rare earth elements in zeolites and cracking catalysts. *Catalysis Today*, 218–219, 115–122. <https://doi.org/10.1016/j.cattod.2013.06.021>
- Stopic, S., Polat, B., Chung, H., Emil-Kaya, E., Smiljanić, S., Gürmen, S., & Friedrich, B. (2022). Recovery of Rare Earth Elements through Spent NdFeB Magnet Oxidation (First Part). *Metals*, 12(9), 1464. <https://doi.org/10.3390/met12091464>

- Swain, B., Kang, L., Mishra, C., Ahn, J., & Hong, H. S. (2015). Materials flow analysis of neodymium, status of rare earth metal in the Republic of Korea. *Waste Management*, 45, 351–360. <https://doi.org/10.1016/j.wasman.2015.07.020>
- Takeda, O., Uda, T., & Okabe, T. H. (2014). Rare Earth, Titanium Group Metals, and Reactive Metals Production. In *Treatise on Process Metallurgy* (pp. 995–1069). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-096988-6.00019-5>
- Telsnig, T. (2020). *Wind energy: Technology development report 2020*. Publications Office of the European Union.
- Terna Spa. (s.d.). *Pubblicazioni Statistiche*. Recuperato 18 dicembre 2022, da <https://www.terna.it/it/sistema-elettrico/statistiche/pubblicazioni-statistiche>
- Unione Europea. (s.d.). *Eurostat*. Recuperato 18 dicembre 2022, da <https://ec.europa.eu/eurostat/>
- Unione Nazionale Rappresentanti Autoveicoli Esteri (UNRAE). (s.d.-a). *Analisi del mercato autoveicoli in Italia. XXII edizione*.
- Unione Nazionale Rappresentanti Autoveicoli Esteri (UNRAE). (s.d.-b). *Book Statistiche annuali 2012-2021*. Recuperato 22 dicembre 2022, da <https://unrae.it/pubblicazioni/book-statistiche-annuali>
- U.S. Geological Survey (USGS). (1996). *Mineral Commodity Summaries 1996*. <https://doi.org/10.3133/mineral1996>
- U.S. Geological Survey (USGS). (2022). *Mineral commodity summaries 2022*. <https://doi.org/10.3133/mcs2022>
- Vahidi, E., & Zhao, F. (2018). Assessing the environmental footprint of the production of rare earth metals and alloys via molten salt electrolysis. *Resources, Conservation and Recycling*, 139, 178–187. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2018.08.010>

- Xia, D., Charpentier, N. M., Maurice, A. A., Brambilla, A., Yan, Q., & Gabriel, J.-C. P. (2022). Sustainable route for Nd recycling from waste electronic components featured with unique element-specific sorting enabling simplified hydrometallurgy. *Chemical Engineering Journal*, 441, 135886. <https://doi.org/10.1016/j.cej.2022.135886>
- Yadav, K. K., Anitha, M., Singh, D. K., & Kain, V. (2018). NdFeB magnet recycling: Dysprosium recovery by non-dispersive solvent extraction employing hollow fibre membrane contactor. *Separation and Purification Technology*, 194, 265–271. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2017.11.025>
- Yang, X., Zhang, J., & Fang, X. (2014). Rare earth element recycling from waste nickel-metal hydride batteries. *Journal of Hazardous Materials*, 279, 384–388. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2014.07.027>
- 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. (2017). REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review. *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(1), 122–149. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4>
- Yao, T., Geng, Y., Sarkis, J., Xiao, S., & Gao, Z. (2021). Dynamic neodymium stocks and flows analysis in China. *Resources, Conservation and Recycling*, 174, 105752. <https://doi.org/10.1016/j.resconrec.2021.105752>
- Yao, Y., Farac, N. F., & Azimi, G. (2018). Supercritical Fluid Extraction of Rare Earth Elements from Nickel Metal Hydride Battery. *ACS Sustainable Chemistry & Engineering*, 6(1), 1417–1426. <https://doi.org/10.1021/acssuschemeng.7b03803>
- Zakotnik, M., Tudor, C. O., Peiró, L. T., Afiuny, P., Skomski, R., & Hatch, G. P. (2016). Analysis of energy usage in Nd–Fe–B magnet to magnet recycling. *Environmental Technology & Innovation*, 5, 117–126. <https://doi.org/10.1016/j.eti.2016.01.002>

- Zhang, K., Kleit, A. N., & Nieto, A. (2017). An economics strategy for criticality – Application to rare earth element Yttrium in new lighting technology and its sustainable availability. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 77, 899–915. <https://doi.org/10.1016/j.rser.2016.12.127>
- Zhao, E., Walker, P. D., Surawski, N. C., & Bennett, N. S. (2021). Assessing the life cycle cumulative energy demand and greenhouse gas emissions of lithium-ion batteries. *Journal of Energy Storage*, 43, 103193. <https://doi.org/10.1016/j.est.2021.103193>

APPENDICE

Nella presente Appendice sono riportati i materiali supplementari del modello dinamico di MFA, descritto nel capitolo 4.

Prodcom code	Description	End–use segment	Component
26201100	Laptop PCs and palm–top organisers	VCM	Magnets for voice coil accelerator, ring magnet from the HDD spindle motor in the optical drive, loudspeaker magnets
26201300	Desk top PCs	VCM	Magnets for voice coil accelerator, ring magnet from the HDD spindle motor in the optical drive, loudspeaker magnets
26302200	Telephones for cellular networks or for other wireless networks	VCM	Loudspeaker magnets
26302320	Machines for the reception, conversion and transmission or regeneration of voice, images or other data, including switching and routing apparatus	VCM	Loudspeaker magnets
26404100	Microphones and their stands (excluding cordless microphones with a transmitter)	Acoustic transducers	Magnets for voice coil accelerator
26404235	Single loudspeakers mounted in their enclosures (including frames or cabinets mainly designed for mounting loudspeakers)	Acoustic transducers	Loudspeaker magnets, magnets for voice accelerator
26404237	Multiple loudspeakers mounted in the same enclosure (including frames or cabinets mainly designed for mounting loudspeakers)	Acoustic transducers	Loudspeaker magnets, magnets for voice accelerator
26404270	Headphones and earphones, even with microphone, and sets consisting of microphone and one or more loudspeakers (excluding airmen’s headgear with headphones, telephone sets, cordless microphones with transmitter, hearing aids)	Acoustic transducers	Loudspeaker magnets, magnets for voice accelerator

26601280	Electro–diagnostic, apparatus (excluding electro–cardiographs), n.e.c.	MRI scanners	MRI equipment
27511110	Combined refrigerators–freezers, with separate external doors	Refrigerators	Rare earth magnets are used in the compressor motors for compressing the gas
27511133	Household–type refrigerators (including compression–type, electrical absorption–type) (excluding built–in)	Refrigerators	Rare earth magnets are used in the compressor motors for compressing the gas
27511135	Compression–type built–in refrigerators	Refrigerators	Rare earth magnets are used in the compressor motors for compressing the gas
27511150	Chest freezers of a capacity ≤ 800 litres	Refrigerators	Rare earth magnets are used in the compressor motors for compressing the gas
27511170	Upright freezers of a capacity ≤ 900 litres	Refrigerators	Rare earth magnets are used in the compressor motors for compressing the gas
27511200	Household dishwashing machines	Washing and drying machines	Rare earth magnets are used in the motors that turn drum type washers and dryers
27511300	Cloth washing and drying machines, of the household type	Washing and drying machines	Rare earth magnets are used in the motors that turn drum type washers and dryers
28251220	Window or wall air conditioning systems, self–contained or split–systems	Air conditioner	Rare earth magnets are used in the compressor motors that compress this gas
28251333	Refrigerated show–cases and counters incorporating a refrigerating unit or evaporator for frozen food storage	Refrigerators	Rare earth magnets are used in the compressor motors for compressing the gas
28251335	Refrigerated show–cases and counters incorporating a refrigerating unit or evaporator (excluding for frozen food storage)	Refrigerators	Rare earth magnets are used in the compressor motors for compressing the gas
28251390	Other refrigerating or freezing equipment	Refrigerators	Rare earth magnets are used in the compressor motors for compressing the gas

28294330	Automatic goods-vending machines incorporating heating or refrigerating devices	Refrigerators	Rare earth magnets are used in the compressor motors for compressing the gas
28295000	Non-domestic dish-washing machines	Washing and drying machines	Rare earth magnets are used in the motors that turn drum type washers and dryers
28942150	Washing, bleaching or dyeing machines (including wringers and mangles, shaker-tumblers; excluding household or laundry-type washing machines)	Washing and drying machines	Rare earth magnets are used in the motors that turn drum type washers and dryers
28942230	Household or laundry-type washing machines of a dry linen capacity > 10 kg (including machines that both wash and dry)	Washing and drying machines	Rare earth magnets are used in the motors that turn drum type washers and dryers
29101300	Vehicle compression-ignition internal combustion piston engines (diesel or semi-diesel) (excluding for railway or tramway rolling stock)	Automotive (conventional)	Transmission, steering & brake system; security, body and safety electronics; climate system; infotainment
29102100	Vehicles with spark-ignition engine of a cylinder capacity $\leq 1\,500\text{ cm}^3$, new	Automotive (conventional)	Transmission, steering & brake system; security, body and safety electronics; climate system; infotainment
29102230	Motor vehicles with a petrol engine > $1\,500\text{ cm}^3$ (including motor caravans of a capacity > $3\,000\text{ cm}^3$) (excluding vehicles for transporting ≥ 10 persons, snowmobiles, golf cars and similar vehicles)	Automotive (conventional)	Transmission, steering & brake system; security, body and safety electronics; climate system; infotainment
29102250	Motor caravans with a spark-ignition internal combustion reciprocating piston engine of a cylinder capacity > $1\,500\text{ cm}^3$ but $\leq 3\,000\text{ cm}^3$	Automotive (conventional)	Transmission, steering & brake system; security, body and safety electronics; climate system; infotainment
29102310	Motor vehicles with a diesel or semi-diesel engine $\leq 1\,500\text{ cm}^3$ (excluding vehicles for transporting ≥ 10 persons, snowmobiles, golf cars and similar vehicles)	Automotive (conventional)	Transmission, steering & brake system; security, body and safety electronics; climate system; infotainment
29102330	Motor vehicles with a diesel or semi-diesel engine > $1\,500\text{ cm}^3$ but $\leq 2\,500\text{ cm}^3$ (excluding	Automotive (conventional)	Transmission, steering & brake system; security, body and safety

	vehicles for transporting ≥ 10 persons, motor caravans, snowmobiles, golf cars and similar vehicles)		electronics; climate system; infotainment
29102340	Motor vehicles with a diesel or semi-diesel engine $> 2\,500\text{ cm}^3$ (excluding vehicles for transporting ≥ 10 persons, motor caravans, snowmobiles, golf cars and similar vehicles)	Automotive (conventional)	Transmission, steering & brake system; security, body and safety electronics; climate system; infotainment
29102353	Motor caravans with a compression-ignition internal combustion piston engine (diesel or semi-diesel) of a cylinder capacity $> 1\,500\text{ cm}^3$ but $\leq 2\,500\text{ cm}^3$	Automotive (conventional)	Transmission, steering & brake system; security, body and safety electronics; climate system; infotainment
29102355	Motor caravans with a compression-ignition internal combustion piston engine (diesel or semi-diesel) of a cylinder capacity $> 2\,500\text{ cm}^3$	Automotive (conventional)	Transmission, steering & brake system; security, body and safety electronics; climate system; infotainment
29102400	Other motor vehicles for the transport of persons (excluding vehicles for transporting ≥ 10 persons, snowmobiles, golf cars and similar vehicles)	Automotive (EVs)	Transmission, steering & brake system; security, body and safety electronics; high voltage power supply (electric motor); climate system; infotainment
29103000	Motor vehicles for the transport of ≥ 10 persons	Automotive (conventional)	Transmission, steering & brake system; security, body and safety electronics; climate system; infotainment
29105200	Motor vehicles specially designed for travelling on snow, golf cars and similar vehicles	Automotive (EVs)	Transmission, steering & brake system; security, body and safety electronics; high voltage power supply (electric motor); climate system; infotainment
30921000	Bicycles and other cycles (including delivery tricycles), non-motorised	E-bikes	Permanent magnets; NiMH battery
28112400	Generating sets, wind-powered	Wind turbines	Drive train configuration

Tabella A.1 Lista dei prodcod considerati, categorie di fine uso e componenti contenenti il neodimio.

Prodcom code	End-use segment	Unit	Lower	Upper	Average	Source
--------------	-----------------	------	-------	-------	---------	--------

26201100	VCM	g Nd/unit	0,58	2,16	1,41	a, b, c, d, e, i
26201300	VCM	g Nd/unit	1,54	6,00	3,86	a, b, c, d, i
26302200	VCM	g Nd/unit	0,05	0,13	0,10	a, b, c
26302320	VCM	g Nd/unit	0,12	0,13	0,12	a, b
26404100	Acoustic transducers	g Nd/unit	0,50	0,85	0,68	a, b
26404235	Acoustic transducers	g Nd/unit	0,40	0,85	0,68	a, b, c
26404237	Acoustic transducers	g Nd/unit	0,80	0,85	0,83	a, b
26404270	Acoustic transducers	g Nd/unit	0,80	0,85	0,83	a, b
26601280	MRI scanners	kg Nd/unit	377,2	400,0	385,7	a, b, c, f
27511110	Refrigerators	g Nd/unit	13,5	51,7	41,4	a, b, c, d
27511133	Refrigerators	g Nd/unit	13,5	51,7	41,4	a, b, c, d
27511135	Refrigerators	g Nd/unit	13,5	51,7	41,4	a, b, c, d
27511150	Refrigerators	g Nd/unit	13,5	142,1	64,0	a, b, c, d
27511170	Refrigerators	g Nd/unit	13,5	142,1	64,0	a, b, c, d
27511200	Washing and drying machines	g Nd/unit	35,1	42,0	40,3	a, b, c, d
27511300	Washing and drying machines	g Nd/unit	35,1	42,0	40,3	a, b, c, d
28251220	Air conditioner	g Nd/unit	21,6	52,0	43,4	a, b, c, d
28251333	Refrigerators	g Nd/unit	13,5	142,1	64,0	a, b, c, d
28251335	Refrigerators	g Nd/unit	13,5	142,1	64,0	a, b, c, d
28251390	Refrigerators	g Nd/unit	13,5	51,7	41,4	a, b, c, d
28294330	Refrigerators	g Nd/unit	13,5	51,7	41,4	a, b, c, d
28295000	Washing and drying machines	g Nd/unit	35,1	42,0	40,3	a, b, c, d
28942150	Washing and drying machines	g Nd/unit	35,1	42,0	40,3	a, b, c, d
28942230	Washing and drying machines	g Nd/unit	35,1	42,0	40,3	a, b, c, d
29101300	Automotive (conventional)	g Nd/unit	35,0	162,3	103,9	a, b, c, d, g
29102100	Automotive (conventional)	g Nd/unit	35,0	162,3	103,9	a, b, c, d, g
29102230	Automotive (conventional)	g Nd/unit	35,0	162,3	103,9	a, b, c, d, g
29102250	Automotive (conventional)	g Nd/unit	35,0	162,3	103,9	a, b, c, d, g
29102310	Automotive (conventional)	g Nd/unit	35,0	162,3	103,9	a, b, c, d, g
29102330	Automotive (conventional)	g Nd/unit	35,0	162,3	103,9	a, b, c, d, g
29102340	Automotive (conventional)	g Nd/unit	35,0	162,3	103,9	a, b, c, d, g
29102353	Automotive (conventional)	g Nd/unit	35,0	162,3	103,9	a, b, c, d, g

29102355	Automotive (conventional)	g Nd/unit	35,0	162,3	103,9	a, b, c, d, g
29102400	Automotive (EVs)	g Nd/unit	353,3	749,3	518,0	a, b, c, d, g, i
29103000	Automotive (conventional)	g Nd/unit	35,0	162,3	103,9	a, b, c, d, g
29105200	Automotive (EVs)	g Nd/unit	353,3	749,3	518,0	a, b, c, d, g, i
-	Automotive (EVs)	g Nd/unit	200,8	401,0	376,8	g
-	Automotive (EVs)	g Nd/unit	221,5	276,8	249,2	f
30921000	E-bikes	g Nd/unit	37,8	108,0	73,2	a, b, c, d, h
28112400	Wind turbines	kg Nd/unit	167,0	224,0	188,6	a, b, c, d, g
28112400	Wind turbines	kg Nd/unit	36,0	60,9	48,5	a, g

Tabella A.2 Concentrazioni di neodimio utilizzate per il modello di MFA e analisi di sensibilità.

Anno	Automotive	Home Appliances ¹	VCM, Acoustic transducers	MRI scanners, Wind turbines	e-bikes
1995	71%	24%	30%	100%	50%
1996	71%	24%	30%	100%	50%
1997	71%	24%	30%	100%	50%
1998	71%	24%	30%	100%	50%
1999	71%	24%	30%	100%	50%
2000	71%	24%	30%	100%	50%
2001	71%	24%	30%	100%	50%
2002	71%	24%	30%	100%	50%
2003	71%	24%	30%	100%	50%
2004	71%	24%	30%	100%	50%
2005	71%	24%	30%	100%	50%
2006	73%	24%	30%	100%	50%
2007	83%	24%	30%	100%	50%
2008	87%	24%	30%	100%	50%
2009	85%	24%	30%	100%	50%
2010	85%	24%	30%	100%	50%
2011	85%	22%	34%	100%	50%
2012	82%	20%	34%	100%	50%
2013	83%	22%	31%	100%	50%
2014	85%	28%	63%	100%	50%
2015	85%	35%	66%	100%	50%
2016	83%	35%	70%	100%	50%
2017	83%	31%	88%	100%	50%
2018	83%	38%	52%	100%	50%
2019	84%	38%	52%	100%	50%
2020	84%	38%	52%	100%	50%

¹ Washing Machines, Refrigerators, Air conditioners
--

Tabella A.3 Percentuali di raccolta dei prodotti a fine vita utilizzate per il modello di MFA.