

UNIVERSITÀ DEGLI STUDI DI PADOVA
FACOLTÀ DI INGEGNERIA

CORSO DI LAUREA IN
INGEGNERIA ELETTRONICA

**LE TERRE RARE: EFFETTI ECONOMICI DEL
MONOPOLIO CINESE
E RICERCA DI ALTERNATIVE**

RELATORE: *Prof. Gabriele Marchesi*

LAUREANDO: *Gobbo Luca*

ANNO ACCADEMICO 2010-2011

Sommario

Le terre rare, o lantanidi, costituiscono una serie di elementi che in questi ultimi anni stanno assumendo grande importanza commerciale e industriale per la produzione di magneti permanenti, di componenti dei televisori, di telefoni cellulari, ecc...

Le sorti attuali dell'approvvigionamento mondiale di terre rare, sono in buona misura legate al monopolio cinese dell'estrazione e della produzione di questi minerali.

In questo lavoro di tesi, vengono brevemente trattate le questioni riguardanti il monopolio e analizzati i campi d'applicazione più soggetti alla crisi.

Successivamente si tenta di gettare le basi per un'eventuale risposta alla forte dipendenza economica cinese con un occhio di riguardo al panorama dei magneti permanenti, il quale risulta fortemente penalizzato.

Si fa riferimento a tecnologie che possano creare dei validi compromessi di sostituzione delle terre rare, senza trascurare la riproposizione di altri tipi di materiali magnetici meno strategici ma dei quali è già stato fatto grande uso in precedenza, il cui utilizzo è comunque divenuto superfluo nel corso degli ultimi anni.

Indice

Sommario	3
Introduzione	7
Capitolo 1: Il mercato delle terre rare	9
1.1 Terre rare: definizione	9
1.2 Andamento della produzione e dei consumi mondiali di terre rare	10
1.3 Riserve, giacimenti e problematiche ambientali	11
1.4 Importazioni, esportazioni ed evoluzione dei prezzi	12
1.5 Cenni conclusivi	14
Capitolo 2: Campi d'utilizzo delle terre rare	17
2.1 Magneti	18
2.1.1 <i>Veicoli elettrici ed ibridi</i>	18
2.1.2 <i>Turbine eoliche</i>	19
2.1.3 <i>Hard Disk e componenti elettronici contenenti magneti al Nd</i>	20
2.2 Fosfori ed illuminotecnica	20
2.3 Leghe metalliche e batterie	22
2.4 Catalizzatori	22
2.5 Vetri, lucidatura e ceramiche	23
2.6 Altre applicazioni	24
Capitolo 3: Sostituzione ed utilizzo efficiente delle terre rare	27
3.1 Magneti per motori e generatori	27
3.1.1 <i>Sostituzione di terre rare nei veicoli elettrici ed ibridi</i>	27
3.1.2 <i>Sostituzione di terre rare nei generatori per turbine eoliche</i>	29
3.1.3 <i>Sostituzione di Disprosio e Terbio nei magneti permanenti</i>	31
3.1.4 <i>Sostituzione di magneti al Neodimio con quelli a SmCo</i>	32
3.1.5 <i>Riduzione della domanda di terre rare tramite miglioramenti dell'efficienza dei processi</i>	33
3.2 Magneti nell'industria elettronica	33
3.3 Batterie	34
3.4 Illuminotecnica	36
3.5 Catalizzatori	36
Capitolo 4: Possibile ritorno alle ferriti	37
4.1 Motore a magneti permanenti in ferrite	37
4.1.1 <i>Struttura del motore a magneti permanenti in ferrite</i>	37
4.1.2 <i>Risultati dell'analisi ad elementi finiti</i>	41
4.1.3 <i>Conclusioni</i>	44
4.2 Generatore a riluttanza e magneti permanenti in ferrite	45
4.2.1 <i>Struttura ed analisi del generatore a riluttanza</i>	45
4.2.2 <i>Riduzione del ripple di coppia</i>	48
4.2.3 <i>Verifiche sperimentali</i>	50

4.2.4 Conclusioni	52
Capitolo 5: Il riciclaggio delle terre rare	53
5.1 Stato attuale delle attività di riciclaggio	53
5.2 Riciclaggio di terre rare da magneti	54
5.3 Riciclaggio di terre rare da batterie	55
5.4 Riciclaggio di terre rare da dispositivi di illuminazione	55
5.5 Riciclaggio di terre rare provenienti dai catalizzatori	55
5.6 Riciclaggio di terre rare provenienti da altre applicazioni	56
5.7 Sfide per un efficiente riciclaggio delle terre rare	56
5.8 Sviluppo di uno schema di riciclaggio	57
5.9 Esempio di una tecnologia di riciclaggio	61
Conclusioni	65
Bibliografia	67

Introduzione

Vengono classificati col nome di “terre rare” un gruppo di minerali di importanza fondamentale nel panorama dell’industria ad alta tecnologia, con particolare interesse nel campo dei magneti permanenti, nella produzione di energia ecologica (eolica, solare, ecc...) e in altre rilevanti applicazioni.

La loro nomenclatura non deve in ogni caso trarre in inganno, in quanto le terre rare non sono poi così introvabili sulla superficie terrestre. Il problema è il loro grado di concentrazione, che deve essere sufficientemente alto per giustificare i costi di estrazione.

In genere questi minerali, sono difficili da estrarre sia perché necessitano di procedure inquinanti per la loro raffinazione, sia perché sono mischiati ad elementi radioattivi.

Per questo motivo nei Paesi occidentali è stata sospesa la loro estrazione, mentre la Cina (solo quest’ultima è disposta ad affrontare i costi e i vincoli di inquinamento ambientale che comporta l’estrazione) ha aumentato la propria produzione divenendo un Paese monopolista a livello globale.

Questa situazione, nell’arco di un decennio, sta diventando insostenibile in quanto la Cina utilizza il monopolio acquisito come arma economica nei confronti degli altri concorrenti.

Inoltre, innalzando i prezzi delle terre rare, il Paese asiatico intende preservare le sue riserve.

Vi sono quindi ragioni di tipo politico ed economico che spingono diversi Paesi tra cui Stati Uniti, Giappone, Corea del Sud ed Unione Europea, alla ricerca di fonti alternative a questi materiali.

Oltre che negli stessi Stati Uniti (dove una miniera californiana chiusa qualche anno fa, dovrebbe essere riattivata nel 2012), le ricerche di fonti alternative di terre rare si stanno concentrando in Brasile, in alcuni Paesi asiatici come il Vietnam, e in Australia.

Il monopolio cinese dell’estrazione e della produzione delle terre rare durerà ancora per qualche anno. Nel frattempo se i progetti che sono stati brevemente presentati (ed altri come quelli in Groenlandia), dovessero diventare operativi, si creerebbero alternative alla produzione cinese, ed anche un abbassamento dei prezzi.

A fronte di questa problematica, l’obiettivo è ora quello della ricerca, lo studio e la possibile implementazione di nuovi materiali magnetici in grado di sostituire a pieno o parzialmente le terre rare nel maggior numero delle applicazioni, in modo tale da evitare il più possibile la dipendenza economica cinese.

Ovviamente la sostituzione da parte di altri materiali, non dovrà costituire un calo delle prestazioni magnetiche dei dispositivi e delle macchine a magneti permanenti e allo stesso tempo dovrà costituire un vantaggio economico apprezzabile.

La tesi è quindi strutturata nei seguenti cinque capitoli:

Il primo capitolo vuole analizzare il mercato delle terre rare e la sua evoluzione negli ultimi decenni in modo tale da chiarire inoltre quali siano le cifre in gioco.

Il secondo capitolo prende in esame i numerosi campi d’applicazione in cui trovano utilizzo questi materiali al fine di chiarire i settori in cui si andranno ad operare possibili sostituzioni.

Il terzo capitolo tratta la sostituzione e l’utilizzo efficiente delle terre rare.

Il quarto capitolo esamina un possibile ritorno a materiali magnetici già noti quali le ferriti, valutandone la convenienza di sostituzione (parziale o totale).

Il quinto capitolo prende invece in considerazione la possibilità di riciclaggio di materiali magnetici a base di terre rare.

Capitolo 1

Il mercato delle terre rare

1.1 Terre rare: definizione

Con la denominazione di “terre rare” si designa un gruppo di 17 elementi chimici della tavola periodica degli elementi, comprendente la serie dei lantanidi, oltre allo Scandio ed Ittrio, recentemente designati Green Elements.

In Tab. 1.1 vengono riportati, oltre ai metalli costituenti il pacchetto delle terre rare, anche altri metalli rari quali Litio, Berillio, Gallio, Germanio, etc di crescente impiego, con lo sviluppo di tecnologie avanzate e che sono richiesti per la realizzazione di processi e prodotti industriali innovativi e High Tech, con applicazioni sia in numerosi settori industriali di punta che nella fabbricazione di beni di consumo di massa.

Numero atomico Z	Simbolo	Nome
21	Sc	Scandio
39	Y	Ittrio
57	La	Lantanio
58	Ce	Cerio
59	Pr	Praseodimio
60	Nd	Neodimio
61	Pm	Promezio
62	Sm	Samario
63	Eu	Europio
64	Gd	Gadolinio
65	Tb	Terbio
66	Dy	Disprosio
67	Ho	Olmio
68	Er	Erbio
69	Tm	Tulio
70	Yb	Itterbio
71	Lu	Lutezio

Legend: □ Other Rare Metals □ Light Rare Earths □ Heavy Rare Earths

Tab. 1.1 Terre rare ed altri metalli rari.

Le terre rare sono relativamente abbondanti nella crosta terrestre. Dopo estrazione, separazione e purificazione del minerale esse vengono trattate e commercializzate sotto forma di ossidi, carbonati, cloruri, fluoruri, boruri, nitrati, idrossidi, o sotto forma metallica, allo stato puro o in lega.

I semilavorati vengono quindi utilizzati nelle più svariate applicazioni e concorrono alla fabbricazione di prodotti sia di larghissimo consumo sia specialistici, incidendo anche fino al 5-12% sul valore del prodotto.

1.2 Andamento della produzione e dei consumi mondiali di terre rare

L'andamento della produzione internazionale di terre è rappresentato nella Fig. 1.1.

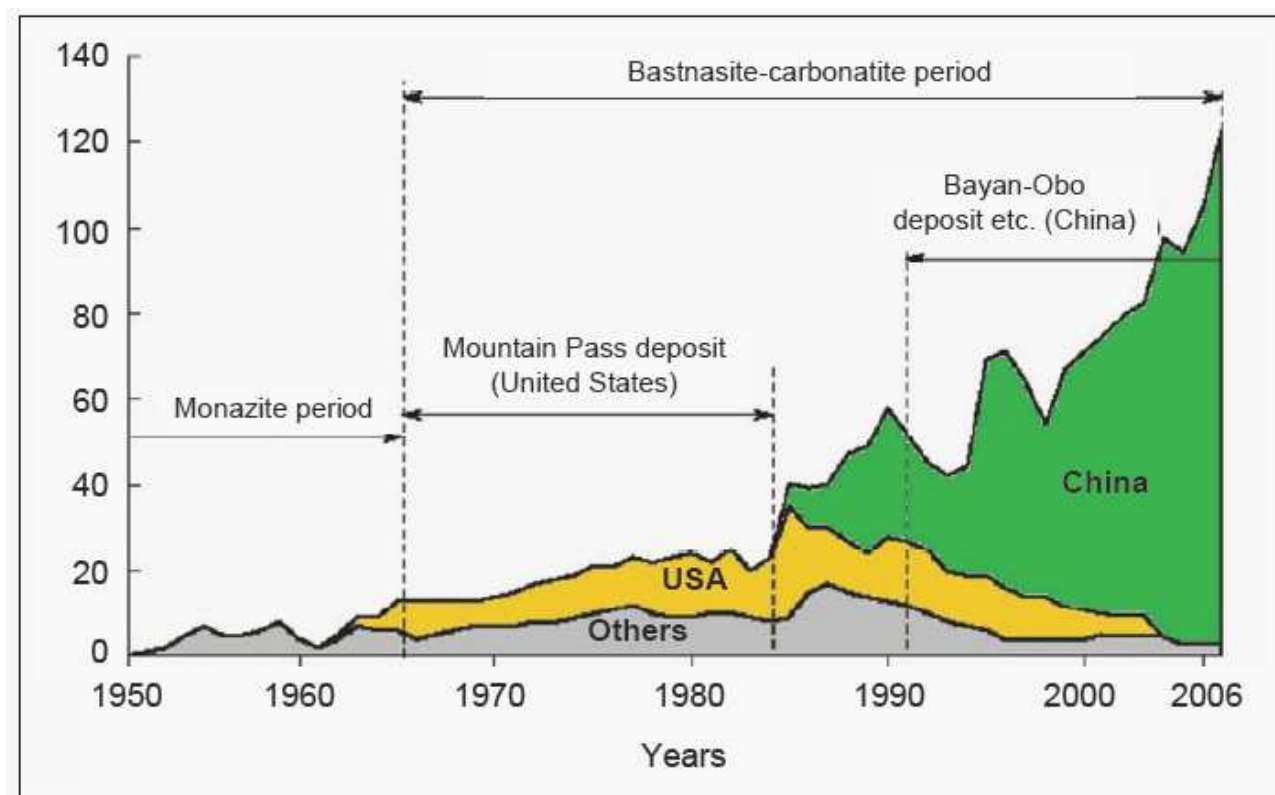


Fig. 1.1 Produzione di terre rare (in migliaia di tonnellate).

Con la chiusura delle attività di separazione e raffinazione USA del minerale in Mountain Pass in California (in conseguenza della crisi economica resta attiva solo una fase di prospezione e di valutazione economica), la produzione di terre rare dal 2009 a livello mondiale è quasi esclusivamente concentrata in Cina.

Essa, al 2009 ha prodotto 120.000 tonnellate di ossidi di terre rare, pari al 97% della produzione mondiale come si può constatare dalla Tab. 1.2.

Si può constatare dunque come la Cina abbia attualmente il monopolio mondiale assoluto delle terre rare e consistenti riserve minerarie, condizionando in modo significativo lo sviluppo dei settori Hi tech e della Green Economy¹.

¹ Con il termine Green Economy (economia verde) si indica un'economia il cui impatto ambientale sia contenuto entro dei limiti accettabili. Nella green economy svolgono un ruolo di primaria importanza la tecnologia e la conoscenza scientifica.

Country	t REO per year	Share
China	120 000	97.0%
Brazil	650	0.5%
India	2 700	2.1%
Malaysia	380	0.3%
Other countries	n.d.	
Total	124 000	100 %

Tab. 1.2 Produzione mondiale di terre rare al 2009.

Nel 2010 la Cina ha ridotto la produzione, per migliorare gli standard di protezione ambientale e per razionalizzare il sistema produttivo nazionale. Si è registrato nel contempo un notevole aumento dei consumi interni di terre rare.

Il paese ha pertanto dovuto contingentare le esportazioni, creando in particolare in Giappone e negli Stati Uniti forti tensioni commerciali e politiche che si sono anche riflesse nelle relazioni internazionali.

A parte il settore dei magneti al Neodimio, la Cina si era limitata fino a qualche anno fa alla produzione delle polveri o dei semilavorati. Da circa 10 anni, invece, è entrata massicciamente nella realizzazione di tutte le catene produttive (vedi ad esempio lampade fluorescenti e a LED, motori al Neodimio, dispositivi elettronici, pannelli fotovoltaici, impianti eolici e turbine idrauliche), in particolare nelle produzioni ad alto valore aggiunto.

Questo spiega la crescita dei consumi interni in materia a scapito di una minore capacità di esportare le materie prime e i semilavorati.

1.3 Riserve, giacimenti e problematiche ambientali

Le stime indicano che le riserve globali di ossidi di terre rare ammontano a 99.000.000 di tonnellate, stima molto alta rispetto ai dati sulla produzione [7].

Ci si aspetta comunque che le riserve possano subire un aumento nei prossimi anni in quanto l'aumento vertiginoso dei prezzi, conduce all'esplorazione di nuovi giacimenti.

La suddivisione globale di riserve per paese, è espressa nella Fig.1.2.

Si può notare come nonostante la quota di produzione cinese sia del 97%, le riserve si attestino attorno al 38% e come vasti depositi si possano trovare negli Stati Uniti, in Australia ed altri paesi dell'ex Unione Sovietica.

L'estrazione delle terre rare, implica inoltre seri rischi d'impatto ambientale dovuti principalmente a tutta una serie di particelle di piccolissime dimensioni, acque di scarico e prodotti chimici che derivano dall'estrazione del minerale. In primo luogo tutti questi componenti, sono stoccati in apposite aree di sequestro.

La mancanza di alcuni tipi specifici di precauzioni, potrebbe portare nelle zone vicine al sito, ad emissioni di Torio, Uranio, metalli pesanti e fluoruri.

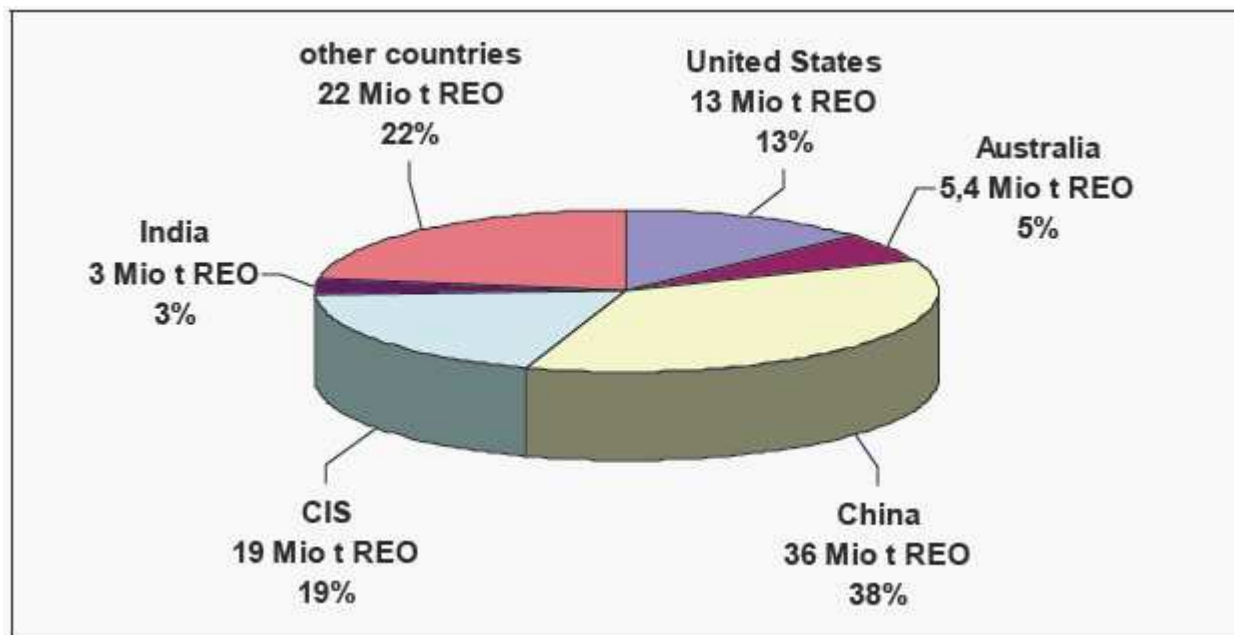


Fig. 1.2 Riserve globali di terre rare (CIS=CSI: comunità stati indipendenti).

Generalmente molti dei depositi di terre rare, contengono materiale radioattivo che impone la massima cautela per quanto riguarda il pericolo di polveri e di inquinamento delle acque oltre a una serie di danni potenziali dovuti alle emissioni in aria e contaminazioni del suolo e del territorio.

Il governo cinese intende quindi diminuire il danno ambientale promuovendo l'utilizzo di nuove tecnologie a minore inquinamento nei siti di grandi dimensioni, e diminuendo il numero dei piccoli siti d'estrazione che non superano determinati standard d'impatto ambientale.

Tuttavia la grossa pressione mondiale per l'approvvigionamento, potrebbe portare all'apertura di nuovi giacimenti fuori dalla Cina con inaccettabili standard ambientali; un esempio è costituito dalla possibilità di estrazione nel territorio della Groenlandia.

1.4 Importazioni, esportazioni ed evoluzione dei prezzi.

I maggiori importatori di composti di terre rare nel 2008 sono stati Europa, Stati Uniti e Giappone. Secondo gli uffici nazionali di statistica, sempre al 2008, sono state importate 78.006 tonnellate di ossidi di terre rare da parte di Stati Uniti, Giappone ed EU 27 (Fig. 1.3), di cui 71.000 tonnellate provenienti dalla Cina, cioè più del 90%.

La Fig. 1.4 indica invece lo sviluppo delle esportazioni cinesi dal 1979 al 2008. In generale possiamo parlare di un aumento graduale nel corso di questo periodo con un picco importante fissato al 2006 di 57.400 tonnellate e un declino a partire dal 2007.

Dal 2009 al 2015, si preannunciano invece restrizioni alle esportazioni a 35.000 tonnellate in accordo col piano di sviluppo dell'industria delle terre rare. Gli obiettivi sono quelli di controllare e regolare le situazioni di non trasparenza per proteggere risorse e ambiente oltre a garantire ovviamente l'approvvigionamento.

Lo scenario delle esportazioni da parte di altri paesi, è gestito ancora dagli appena citati Giappone, Stati Uniti ed Europa in quanto essi importano grandi quantità di prodotti primari dalla Cina ed esportano semilavorati. Il Giappone ad esempio, ha come destinazioni principali Sud Corea, Cina, Taiwan, Thailandia e USA.

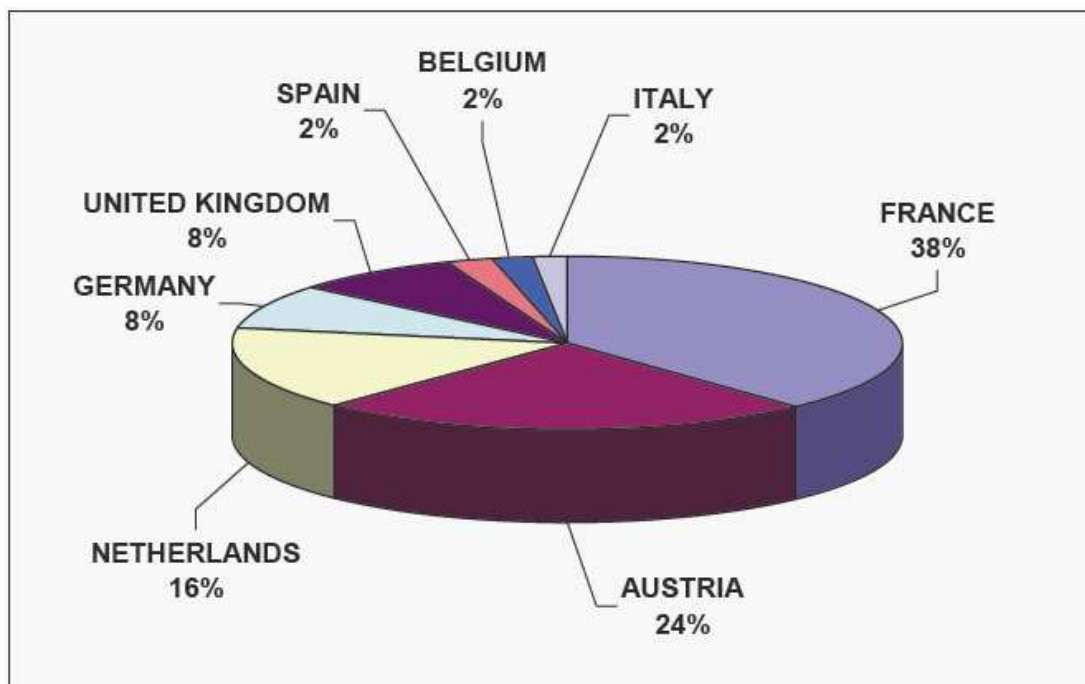


Fig. 1.3 Quote d'importazione di alcuni dei più importanti paesi europei della EU 27.

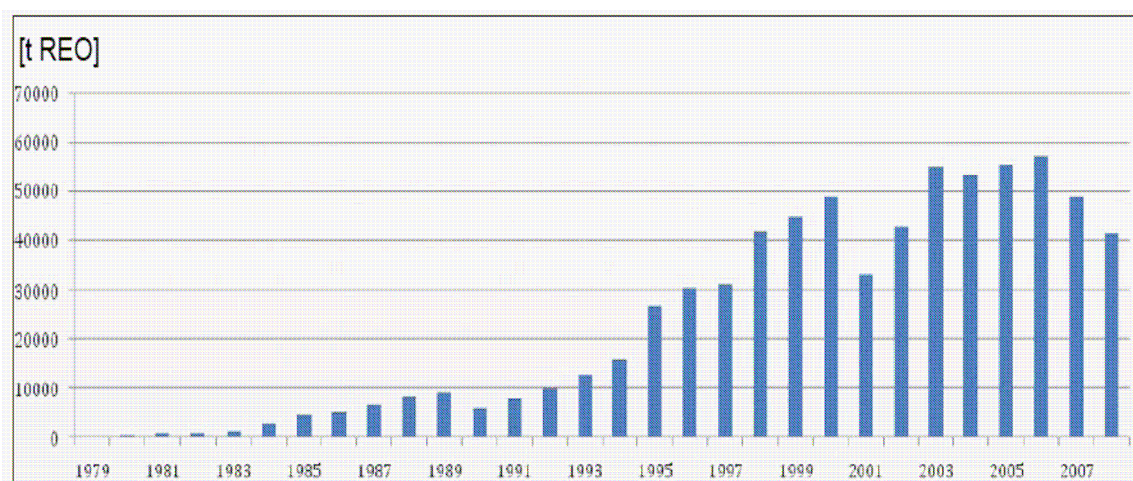


Fig. 1.4 Trend delle esportazioni cinesi di terre rare dal 1979.

Per quanto riguarda invece lo sviluppo dei prezzi di alcuni ossidi di terre rare, facciamo riferimento al periodo 2001-2010 (Fig. 1.5).

Possiamo registrare un moderato andamento dei prezzi fino a circa metà decennio, e un rapido aumento coincidente con l'incremento della domanda mondiale e la riduzione delle esportazioni cinesi.

Il forte aumento dei prezzi, non affligge solo gli elementi nel campo delle terre rare per i quali sono previste carenze di approvvigionamento, ma anche elementi meno scarsi quali il Cerio.

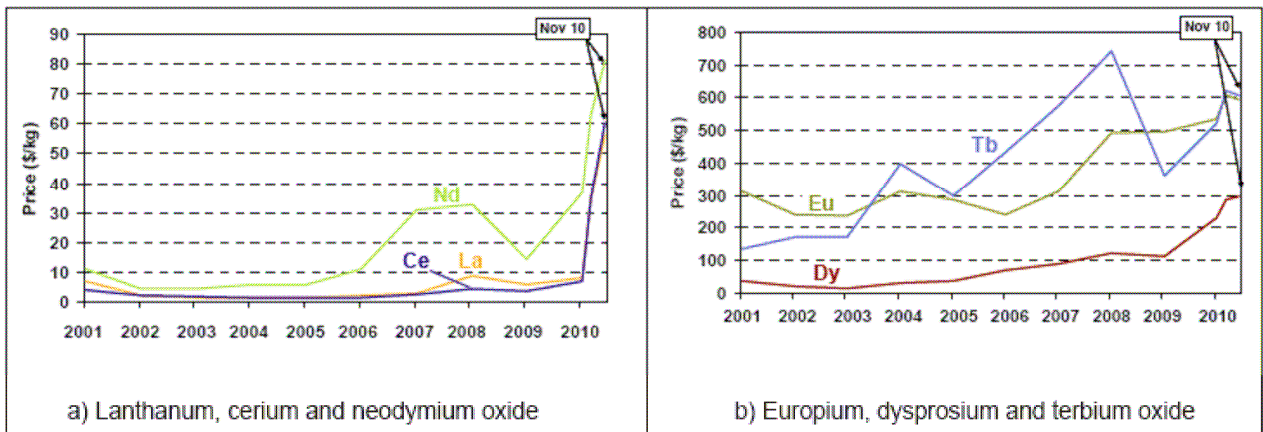


Fig. 1.5 Prezzi per Lantanio, Cerio, Neodimio, Europio, Disprosio e ossidi di Terbio 2001-2010

1.5 Cenni conclusivi

Come detto precedentemente, le terre rare e i loro derivati sono da considerarsi materiali strategici in quanto consentono la fabbricazione di dispositivi essenziali per applicazioni High tech in moltissimi comparti industriali e per applicazioni di massa nel settore civile.

Gli squilibri esistenti a livello di produzione mondiale e l'orientamento della Cina verso l'ingresso nella totale filiera di elaborazione nel prossimo decennio, fanno presagire che produzione e commercio delle terre rare assumeranno una valenza geopolitica.

Gli indirizzi che ha varato recentemente il governo cinese in merito alla politica sulle terre rare meritano riflessione e si riassumono nei sette punti elencati di seguito [6]:

- i. **Licenze minerarie.** Tutte le imprese devono avere una licenza di estrazione conferita dal governo. Il livello di produzione deve seguire un piano concordato da adeguare alle esigenze del mercato. Si incoraggiano le imprese cinesi ad investire nel settore delle terre rare all'estero.
- ii. **Condizioni di accesso.** Prima del 2015 non potrà essere approvato alcun (nuovo) progetto, né aumentata la capacità produttiva. Sono richiesti maggiori requisiti sulla scala produttiva, sulle dotazioni, sulle misure di protezione ambientale sugli indicatori tecnici ed economici delle risorse e dell'energia. Le attuali imprese devono aumentare gli investimenti in ricerca e sviluppo per migliorare la qualità del prodotto e conseguire una produzione più pulita. Si incoraggiano le applicazioni delle terre rare in prodotti High tech e lo sviluppo del riciclo delle terre rare.
- iii. **Esportazione.** L'esportazione di terre rare è regolata da quote specifiche, in particolare per il Terbio e il Disprosio. E' invece vietata l'esportazione di composti misti.
- iv. **Importazione.** Le terre rare rispondenti a precise specifiche possono essere importate. E' invece stata vietata l'importazione di minerali di terre rare radioattivi o inquinanti o residui di lavorazione di terre rare.
- v. **Tasse sull'export di terre rare.** Il primo novembre 2006 è stata emanata una tassa sulle esportazioni di prodotti di terre rare, pari al 10%, ed entrata in vigore il primo maggio 2007.
- vi. **Investimenti esteri.** Sono proibiti gli investimenti esteri nelle imprese minerarie di terre rare. Sono consentite joint ventures, cooperazioni e investimenti nei progetti di processamento e raffinazione e sono incoraggiati investimenti stranieri in progetti di processamento, di sviluppo di nuovi materiali e di applicazioni delle terre rare.

- vii. **Protezione ambientale.** Le esigenze di una necessaria protezione ambientale si traducono in una normativa più stringente che richiederà un adeguamento tecnologico, comporterà un possibile aumento dei costi e che potrebbe portare alla chiusura di imprese di piccola e media dimensione.

Oltre al contingentamento delle esportazioni di cui abbiamo già parlato, significativo sarà anche l'accento posto sulla qualità del prodotto e sullo sforzo di ricerca e sviluppo verso nuove e migliori applicazioni.

Gli operatori prospettano comunque uno sviluppo consistente del settore delle terre rare, sia in termini di produzione che di impiego. La Cina continuerà ad essere la principale fornitrice di prodotti di terre rare, ma aumenterà nel contempo i propri consumi interni per la trasformazione dei prodotti di base in prodotti e sistemi a maggior valore aggiunto.

Capitolo 2

Campi d'utilizzo delle terre rare

Dalla Fig. 2.1 si può intuire quali siano i campi d'applicazione in cui vengono impiegate terre rare e cioè [5,7]: magneti, fosfori², leghe metalliche, ceramiche, catalizzatori ed altri impieghi tipo depurazione acque, barre di controllo per reattori nucleari, fertilizzanti e alcuni tipi di rivestimenti. Come si può notare, i settori in cui vi è una maggiore richiesta sono senza dubbio quello dei magneti e quello dei fosfori.

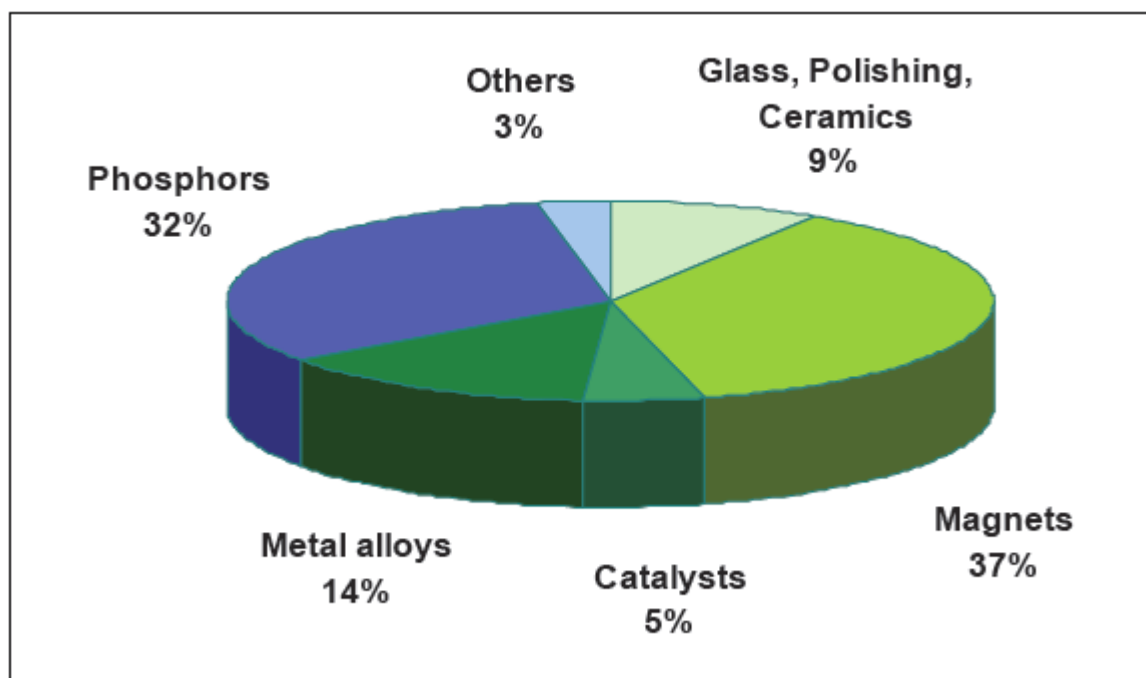


Fig. 2.1 Domanda globale di terre rare in termini economici nel 2008.

Per i fosfori vengono in particolar modo utilizzati Europio e Terbio mentre per i magneti, principalmente Neodimio e Prasedimio (prezzi medi) e Disprosio e Terbio (alti prezzi).

Le applicazioni riguardanti ceramurgia (conferire alla ceramica particolari proprietà funzionali chimiche, elettrochimiche, elettriche e magnetiche), fibre ottiche e catalizzatori sono molto rilevanti in termini di volume ma poco in termini di valore economico. Il motivo di ciò è che per quest'ultime applicazioni, vengono utilizzate terre rare più economiche quali Cerio e Lantanio.

Sicuramente il campo d'applicazione più importante dal nostro punto di vista e quello maggiormente interessato dalla crisi delle terre rare, è quello riguardante i magneti permanenti con tutte le sue ramificazioni.

Ci proponiamo ora di analizzare in maniera più approfondita tutti questi campi e di fornire dati significativi riguardanti lo sviluppo della domanda di materiale a base di terre rare in essi presenti.

² I fosfori vengono principalmente utilizzati nelle lampade a fluorescenza, display al plasma e LCD e tecnologie LED riuscendo a garantire alta efficienza energetica ed alta qualità di colori.

2.1 Magneti

Le terre rare sono parte integrante di magneti permanenti al Neodimio-Ferro-Boro (NdFeB) e al Samario-Cobalto (SmCo).

I magneti al SmCo, ricoprono un ruolo di minore importanza in quanto, nella maggior parte dei casi, vengono preferiti i magneti al Nd per le migliori caratteristiche magnetiche, superiori quindi anche a quelle dei magneti a base di Ferro e Alluminio.

Nei magneti in Ferrite, vengono incluse invece delle piccole parti in Lantanio. Essi risultano avere basse proprietà magnetiche, ma sono economici, leggeri, e ampiamente diffusi.

La progettazione quindi di applicazioni elettriche miniaturizzate quali piccoli altoparlanti (auricolari) e Hard Disk Drive, è stata resa possibile grazie alle forti potenzialità dei magneti al Nd.

Ulteriori campi applicativi di questi magneti permanenti, sono quelli riguardanti le grandi dimensioni e cioè quelli utilizzati in veicoli ibridi elettrici (HEV) e nei generatori per turbine eoliche.

In aggiunta, li potremo vedere utilizzati in attrezzature industriali quali sollevatori o separatori magnetici³. Nel 2015 invece, è prevista l'implementazione su larga scala di una nuova tecnologia di refrigerazione nella quale la variazione reversibile della temperatura, si verifica tramite processi di smagnetizzazione e magnetizzazione.

La formula chimica di base dei magneti al Nd è Nd₂Fe₁₄B, che comprende un mix di Neodimio e Praseodimio (~ 30%) mentre, additivi come Disprosio (~ 3%) e Terbio, hanno contenuti minori.

Neodimio e Praseodimio appartengono alle terre rare che hanno un prezzo medio, mentre Disprosio e Terbio sono elementi molto costosi.

La domanda futura di magneti permanenti, è significativamente determinata dallo sviluppo di motori per veicoli ibridi, turbine eoliche e Hard Disk Drive.

I sottoparagrafi seguenti, analizzano lo sviluppo delle principali applicazioni dei magneti permanenti a base di terre rare.

2.1.1 Veicoli elettrici e veicoli ibridi

La prospettata riduzione dei consumi di combustibili fossili nel settore dei trasporti richiede lo sviluppo di auto ibride ed elettriche, dotate di batterie elettriche ad alta capacità al Nichel, Idruri metallici, di motori elettrici e di un sistema di recupero dell'energia di frenata.

Gli Idruri metallici, i motori elettrici e i magneti sono fabbricati con terre rare. Si valuta che ogni auto richieda circa 15-16 Kg di terre rare, di cui 12 Kg per le sole batterie.

Al 2010 ad esempio, con un parco di auto ibride di 2.000.000 di unità, la domanda USA (Tab.2.1) dovrebbe attestarsi sulle 25.000 tonnellare per i soli idruri metallici per batterie [6].

Il controllo delle emissioni con marmitta catalitica richiede anch'esso terre rare per la fabbricazione dello strato catalitico che consente l'abbattimento delle emissioni inquinanti.

Lo sviluppo della domanda dei magneti al Nd nel settore del trasporto elettrico è perciò influenzata da tre fattori:

- La futura produzione del veicolo elettrico ibrido (HEV).
- La futura produzione della bicicletta elettrica.
- La specifica richiesta di Nd da parte dei motori elettrici.

³ I separatori magnetici sono sistemi utilizzati per eliminare materiale ferroso da altri materiali.

Consumi OTR (T/a)	2005	2010	Var. % annua	Terre rare	Ossidi di Terre rare
Batterie Ni-MH	7.200	27.300	30,6 %	Lantanio	La ₂ O ₃
				Cerio	CeO ₂
				Praseodimio	Pr ₆ O ₁₁
				Neodimio	Nd ₂ O ₃
Magneti al neodimio Freni per auto ibride Motori elettrici	17.150	31.100	12,6 %	Neodimio	Nd ₂ O ₃
				Praseodimio	Pr ₆ O ₁₁
				Terbio	Tb ₆ O ₇
				Disprosio	Dy ₂ O ₃
Marmitte catalitiche	4.830	5.960	5,96 %	Cerio	CeO ₂
				Lantanio	La ₂ O ₃
				Neodimio	Nd ₂ O ₃

Tab. 2.1 Domanda USA di ossidi di terre rare nel settore auto.

Quello che possiamo dire è che la stima della domanda di terre rare nel settore dei veicoli ibridi, deve essere analizzata con cautela in quanto vi è un'incertezza molto elevata che riguarda lo sviluppo economico e il mercato dei veicoli elettrici.

Tutti gli scenari presentati riguardanti la domanda di Nd dei futuri veicoli elettrici ed ibridi, presumono che i motori utilizzino tutti magneti permanenti. Non si ritiene che vi siano quindi diverse opzioni oltre a quelle a base di terre rare che sono quelle preferite dai costruttori.

Dunque, in conclusione, il settore della mobilità elettrica, costituirà una forza trainante in termini di crescita della domanda di magneti permanenti a base di terre rare come quelli al Nd.

2.1.2 Turbine eoliche

Le turbine eoliche, sono un canale importante nella domanda di magneti al Nd e quindi il tasso di crescita globale delle installazioni eoliche è un fattore cruciale (Fig. 2.2).

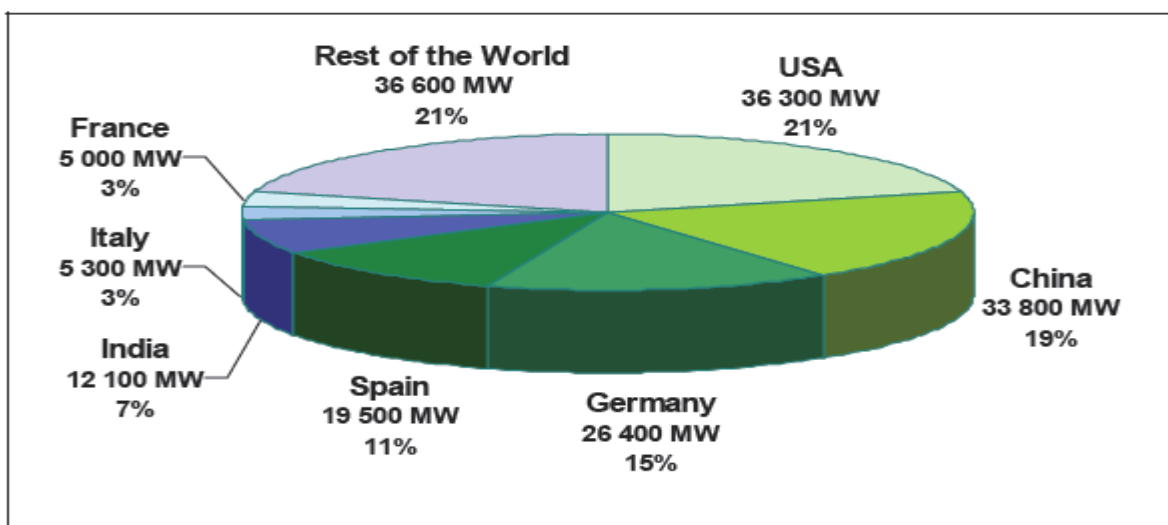


Fig. 2.2 Installazioni eoliche globali al 2010.

Il calcolo della domanda di terre rare varia quindi in base ad alcuni fattori:

- Il tasso di crescita delle installazioni eoliche.
- La quota effettiva delle turbine che utilizzano magneti al Nd.
- Richiesta (in Kg) di Neodimio, Praseodimio, Disprosio e Terbio per potenza installata.

Assumendo uno share del 14% per le turbine contenenti magneti al Nd e un consumo medio di 400Kg di materiale magnetico per MW installato, la totale domanda di magneti al Nd nel 2008 sarebbe stata di circa 450 tonnellate di magneti e circa 570 tonnellate di ossidi di Nd rispettivamente.

In base alle previsioni, la domanda di Nd per turbine eoliche si attesta attorno alle 1.200 tonnellate per anno fino al 2014, e 4.200 tonnellate per anno circa a partire dal 2015.

E' importante però sottolineare che al momento non è chiaro quale sviluppo la tecnologia stia proponendo in questo settore. Pertanto, per le turbine eoliche come per i veicoli elettrici ibridi, le previsioni dovrebbero essere prese in considerazione con molta attenzione data l'incertezza delle implementazioni future.

2.1.3 Hard Disk e componenti elettronici contenenti magneti al Nd

Magnetit al Nd sono utilizzati nelle unità di memoria dei computers (CD-ROM, DVD, Hard Disk Drive), dove il movimento del braccio per la lettura/scrittura delle informazioni sul disco deve essere estremamente preciso.

Secondo alcune società giapponesi, circa un terzo dei magneti al Nd vengono utilizzati negli Hard Disk. Si stima infatti che la quota di Nd che è stata usata nei dischi per PC e nei laptops, ammonti a circa 1.700 tonnellate al 2008.

Lo sviluppo della domanda futura di questi tipi di magneti nei dischi rigidi, sarà grosso modo lineare alla vendita di computers, ma la crescita della domanda annuale di quest'ultimi (soprattutto dei laptops) è particolarmente alta e si attesta attorno al 16% al 2011.

La richiesta futura nel campo dei dispositivi ottici ed acustici, è probabilmente assimilabile alla vendita di beni elettronici in generale.

La crescita media nel settore elettronico è stimata attorno al 5% nel periodo 2010-2013 dalle industrie di ricerca.

Questi dati implicano però che la domanda di Hard Disk ed altri dispositivi elettronici non deve essere sottostimata pur essendo superiori i tassi di crescita che interessano turbine eoliche e veicoli ibridi elettrici.

2.2 Fosfori ed illuminotecnica

E' stata riconosciuta a livello mondiale l'esigenza di realizzare consistenti riduzioni dei consumi di energia, migliorando l'efficienza dei processi e dei sistemi. Il settore dell'illuminazione rappresenta ad esempio circa il 20% dei consumi energetici USA.

La sostituzione delle lampadine ad incandescenza, con filamento, con lampadine ad elevata efficienza di conversione dell'energia elettrica in energia luminosa, senza o a bassa emissione di calore è la misura adottata recentemente in ambito internazionale e raccolta dalle Direttive Europee.

Avremo quindi a che fare con una serie di prodotti quali lampade a fluorescenza, LED e lampade LED che richiedono l'uso di terre rare in grado di garantire alte efficienze e grande qualità dei colori (Tab. 2.2).

Consumi OTR (T/a)	2005	2010	Var. % annua	Terre rare	Ossidi di Terre rare
Lampade Fluorescenti	1.846	3.779	15 %	Ittrio	Y ₂ O ₃
				Europio	Eu ₂ O ₃
				Lantanio	La ₂ O ₃
				Disprosio	Dy ₂ O ₃
				Cerio	CeO ₂
				Praseodimio	Pr ₆ O ₁₁
				Gadolinio	Gd ₂ O ₃

Tab. 2.2 Domanda USA di ossidi di terre rare nel settore delle lampade fluorescenti.

In particolare per le lampade a fluorescenza, avremo un utilizzo di terre rare quali Ittrio ed Europio in grado di migliorare del 25-40% la resa energetica del dispositivo di illuminazione.

Le lampade LED invece, caratterizzate da bassissimi consumi, hanno una vita lunghissima (oltre 100.000 ore). Esse convertono oltre il 90% dell'energia elettrica in energia luminosa praticamente senza emissione di calore.

Sembra quindi molto improbabile che certi tipi di prestazione possano essere raggiunti senza l'ausilio di terre rare.

La quota in termini di volume coperta da applicazioni di fosfori ed illuminotecnica nel totale pacchetto d'utilizzo delle terre rare, è di circa il 7 % in tutto il mondo e del 9 % in Cina, ma la quota in termini di valuta economica è molto più alta e si attesta attorno al 32% (Fig. 2.1).

Una ragione di questo è l'elevato prezzo di Europio e Terbio che al novembre 2010, era valutato circa 700 \$/Kg.

La crescita del consumo di terre rare in questo settore, è determinata da alcuni parametri che potremo sintetizzare in:

- La crescita totale dell'utilizzo dei dispositivi d'illuminazione fissata al 7% annuo nel periodo 2004-2011.
- Le lampade ad incandescenza stanno per essere tolte dal mercato a causa della loro bassa efficienza energetica, e sostituite con i dispositivi di cui abbiamo parlato.
- Le recenti applicazioni basate sui LED contenenti terre rare, giocano un ruolo di minore importanza nel settore dell'illuminotecnica con un utilizzo che mira soprattutto su effetti decorativi, segnali e pannelli luminosi. Esse stanno però cominciando a sostituire altre lampade di minore efficienza con uno sviluppo abbastanza veloce. Ci si aspetta quindi un più ampio impiego ad alte efficienze.
- Televisori a tubo catodico ampiamente utilizzati in passato, sono attualmente sempre più sostituiti da televisori LCD e plasma. Entrambe le tecnologie prevedono l'utilizzo di una buona quantità di terre rare.

Questi diversi aspetti quindi, mettono in evidenza un possibile tasso di crescita notevole nel settore dei fosfori e dell'illuminazione quindi indirettamente anche una crescita nel consumo delle terre rare da non sottovalutare.

2.3 Leghe metalliche e batterie

Questo campo d'applicazione, comprende vari usi. I più importanti sono elencati di seguito:

- Una delle più vecchie applicazioni è quella dell'uso del Cerio e del Lantanio in leghe che vengono utilizzate per la creazione di dispositivi di accensione a pietra focaia per accendini e torce.
- Mischmetal⁴ e Cerio, sono utilizzati come leghe minori per stabilizzare il prodotto fuso nelle colate di acciaio e ferro.
- Terre rare quali Lantanio, Cerio e Ittrio vengono aggiunte a superleghe resistenti al calore migliorandone notevolmente le prestazioni.
- Leghe Scandio-Alluminio, sono adatte alla costruzione di strutture a basso peso. A causa della disponibilità limitata esse trovano utilizzo solo in ambito militare e nell'aviazione.
- Una nuova tecnologia ancora in fase di sviluppo, è la pila a combustibile ad ossido solido (SOFC), considerata la migliore tecnologia a pila combustibile. L'elettrolita conterrà Ittrio e Mischmetal a base di terre rare che potrebbero migliorarne le prestazioni. Vi è inoltre la ricerca nel campo delle celle a combustibile per i veicoli elettrici che implica anch'essa l'utilizzo di terre rare.

La quota della domanda globale di leghe metalliche e di batterie in terre rare in termini di volume è attorno al 18% circa e del 14% in termini economici.

2.4 Catalizzatori

Terre rare quali Cerio e Lantanio vengono ampiamente utilizzate nei catalizzatori (Tab. 2.3).

Consumi OTR (T/a)	2005	2010	Var. % annua	Terre rare	Ossidi di Terre rare
Catalizzatori	15.400	18.400	3,5 %	Lantanio	La ₂ O ₃
				Cerio	CeO ₂
				Praseodimio	Pr ₆ O ₁₁
				Neodimio	Nd ₂ O ₃

Tab. 2.3 Domanda USA di ossidi di terre rare nel settore petrolchimico

Nel diesel vengono utilizzati composti di Cerio come catalizzatori in modo da migliorare la combustione e renderla più pulita.

Lantanio e Cerio ricoprono poi un ruolo fondamentale nella raffinazione del petrolio.

Ulteriori applicazioni si riscontrano in vari processi chimici.

⁴ Lega metallica costituita da elementi appartenenti al gruppo delle terre rare in percentuali varie.

In termini volumetrici, la domanda di terre rare nel settore dei catalizzatori costituisce un 20% della totale domanda di terre rare mentre i prezzi relativamente bassi di Lantanio e Cerio, consentono di creare una quota di domanda in termini economici di circa il 5%.

Tuttavia in tutta questa serie di applicazioni sono molto rilevanti in termini di riduzione delle emissioni, aumento dell'efficienza energetica e riduzione della dipendenza da alcuni metalli preziosi quali Platino, Palladio e Rodio.

Per il futuro potrebbe essere rilevato un ulteriore aumento della domanda di catalizzatori per auto, così come ci si aspetta per il petrolio, con un tasso annuale del 3-5% per tutti i catalizzatori contenenti terre rare che porterebbe ad un aumento in termini di peso da 25.000 tonnellate circa del 2008 a circa 30.000-33.000 nel 2014.

2.5 Vetri, lucidatura e ceramiche

Questo gruppo comprende numerose applicazioni (Tab. 2.4). Esso costituisce il 30% della totale domanda di terre rare in termini di volume ma solo il 9% dal punto di vista economico.

Application	Major REE
Polishing	
Polishing of high-quality glass surfaces (mirrors, television and monitors, cathode ray tubes, panel display, glass platters in hard disks)	Ce
Glass additives	
Colouring of glass (Ce – yellow and brown, Nd – red, Er pink)	Ce, Nd, Er
Ceramics	
Ceramic capacitors, semiconductors and other components for LCD and electronics	La, Ce, Pr, Nd
Stabiliser for ceramic material	Y, Ce
High-temperature superconductors	Y
Pigments in ceramics	Pr, Y, Nd
Refractory material	Y, Ce
Laser	Y
Dental ceramics	Ce

Tab. 2.4 Principali applicazioni del settore vetri, lucidatura e ceramiche.

Si possono inoltre fornire ulteriori dettagli riguardo ai consumi del 2008:

- Lucidatura vetri 15.000 tonnellate di ossidi di terre rare (44%)
- Additivi del vetro 12.000 tonnellate di ossidi di terre rare (35%)
- Ceramiche 7.000 tonnellate di ossidi di terre rare (21%)

Comparato al consumo globale, il consumo cinese è relativamente basso e si attesta attorno alle 7.160 tonnellate.

E' stata inoltre analizzata una possibile futura applicazione che consiste nell'uso di ossido di Ittrio-Bario-Rame come superconduttore in grado di supportare alte temperature costituendo un'applicazione dall'indiscutibile rendimento e dal basso prezzo.

Si stima che la commercializzazione inizierà intorno al 2013/2014 e si presuppone che l'utilizzo possa trasformare l'industria elettrica in modo significativo a lungo termine e ad aumentare la domanda di Ittrio in questo campo.

Particolari coperture di celle di pannelli solari dotate di drogaggio al Cerio, riescono a prevenire l'oscuramento del pannello permettendone un utilizzo più lungo.

2.6 Altre applicazioni

Il gruppo "altre" comprende altri tipi significativi di applicazioni (Tab. 2.5) che non rientrano nelle categorie precedenti.

Application	Major REE
Pigments and paint (for better light resistant, higher durability, corrosion resistance)	Ce, Y
Defence (optics, surveillance, sonar transducer, microwave communication, laser, aircraft material)	Various REE
Fertilizer (mainly in China, added to phosphate fertilizer)	Ce, La
Nuclear energy (neutron absorber, reactor control)	Gd, Eu
Waste water treatment (new application)	Ce

Tab. 2.5 Principali applicazioni in "altri" settori.

La domanda di terre rare in questo caso è abbastanza bassa, costituendo circa il 5% della domanda totale in termini di volume e circa il 3% per quanto riguarda il discorso economico.

Molte delle applicazioni nel campo della difesa, fanno parte di una vasta categoria che comprende equipaggiamenti come dispositivi d'illuminazione, batterie, motori, elettronica, computers e display.

Sempre in questo settore, possiamo inoltre citare gli impieghi di terre rare in aerei supersonici, missili, satelliti, sistemi d'arma intelligenti, radar, sonar, sistemi di telecomunicazione, con particolare riferimento nella componentistica, nei materiali strutturali delle palette delle turbine a gas e nei rivestimenti protettivi, nei sistemi ottici.

Un'applicazione interessante sembra essere quella che riguarda la filtrazione di Arsenico ed altri contaminanti da acque di processo.

Viene stimata infine una crescita annuale della domanda in tutto questo vasto gruppo di impieghi del 3-7% che porterebbe dalle 7.500 tonnellate di ossidi di terre rare del 2008 alle 9.000-12.000 tonnellate nel 2014.

Capitolo 3

Sostituzione ed utilizzo efficiente delle terre rare

La sfida per la ricerca di valide alternative alle terre rare a fronte di possibili scarsità d'approvvigionamento, si basa su due principi [7]:

- i. Sostituzione delle terre rare con un altro materiale.
- ii. Approccio alternativo allo sviluppo dei prodotti e al progetto delle applicazioni.

L'analisi per la sostituzione ha dimostrato comunque che un semplice rimpiazzo con un altro composto risulta raramente apprezzabile. Nella maggior parte dei casi esso richiede anche una modifica sostanziale del design del prodotto.

Di seguito vengono descritte le principali opzioni di sostituzione applicabili ai campi d'utilizzo più importanti delle terre rare quali: motori/generatori, magneti nei dispositivi elettronici, batterie, catalizzatori ed illuminotecnica.

3.1 Magnet per motori e generatori

3.1.1 Sostituzione di terre rare nei veicoli elettrici ibridi

Per riuscire a comprendere le potenzialità di sostituzione è bene fare chiarezza sugli attuali motori e generatori che utilizzino terre rare nel loro funzionamento e descrivere alcune delle rilevanti caratteristiche che diano una risposta sul "perché" di un'eventuale scambio.

Stato dell'arte di motori per la trazione elettrica:

- **Motori elettrici sincroni per trazione elettrica:** Per quel che riguarda i motori sincroni con presenza di magneti al Neodimio, possiamo dire che essi attualmente riescono a garantire il miglior rendimento, tanto da poter essere utilizzati nella maggior parte dei veicoli commerciali elettrici.
Vi è inoltre un incremento nell'utilizzo nelle turbine per generazione eolica ad alte prestazioni. L'utilizzo in queste applicazioni garantisce compattezza nelle dimensioni ma allo stesso tempo risulta essere molto costoso.

- **Motori asincroni:** E' utile citare in questo caso anche questi tipi di motori in quanto sono i più utilizzati nelle applicazioni industriali e vengono prodotti in grandi quantità.
Trovano inoltre utilizzo in alcuni veicoli elettrici ad alta efficienza, bassi costi e senza richiedere la presenza di Neodimio. Sono quindi di semplice costruzione ma presentano comunque minore efficienza e problemi di dimensione (perciò di peso) rispetto ai motori con magneti al Neodimio.

Alternative:

- **Motori sincroni con elettromagneti:** Essi non richiedono la presenza di terre rare in quanto utilizzano una sorgente esterna di eccitazione. Hanno una maggiore prospettiva di realizzazione a medio o breve termine.

- **Motore sincro a magneti permanenti con magneti al SmCo:** I magneti al SmCo (Samario-Cobalto) costituiscono la prima generazione di magneti nella famiglia delle terre rare mentre i magneti NdFeB appartengono alla seconda. Questi motori venivano utilizzati per applicazioni ad alte performances prima della costruzione di motori con magneti al Neodimio. Dato il loro alto costo, la loro applicazione è divenuta molto ristretta ma essi, potrebbero ritornare competitivi con l'attuale aumento del prezzo del Neodimio. I magneti SmCo, hanno prestazioni molto migliori rispetto alle ferriti ma peggiori rispetto a quelli al Neodimio; possono comunque operare a temperature maggiori rispetto a quest'ultimi.

- **Motore sincro con magneti in ferrite:** Dalle minori proprietà magnetiche, obbliga ad un incremento del volume e quindi ad un aumento di peso. Hanno inoltre una minore efficienza anche se vi sono comunque attività di ricerca e sviluppo per riuscire a raggiungere un incremento. Il fattore positivo risiede però tutto nella competitività economica. Si cerca perciò di sviluppare (attività di ricerca in Giappone) un motore di questo tipo il cui volume può essere ridotto utilizzando geometrie diverse.

- **Motori a riluttanza:** Risultano essere robusti e di semplice costruzione oltre al fatto di essere molto competitivi in termini di prezzo. Hanno il difetto di presentare seri problemi di rumorosità e questo porta al difficile utilizzo in applicazioni quali motori per veicoli e turbine eoliche.

- **Motori ibridi (combinazione di motori a magneti permanenti e motori a riluttanza):** In questo caso vi sono sia vantaggi che svantaggi. Essi sono in grado di combinare i vantaggi delle due categorie con esigenze di Neodimio minori rispetto al motore a magneti permanenti, cercando comunque di superare le performance del motore puro a Neodimio. Data l'alta futura potenzialità sono in fase di ricerca e sviluppo.

L'analisi precedente sui differenti tipi di motori, mostra come vi siano alternative all'utilizzo di motori a magneti permanenti contenenti terre rare. Come detto, esistono anche motori asincroni utilizzati nei veicoli elettrici. Essi costituiscono la tipologia più utilizzata in campo industriale e, pur essendo meno compatti e meno efficienti in alcune condizioni di funzionamento rispetto ai motori a magneti permanenti, riescono a portare a vantaggi tipo il basso costo e la semplicità di costruzione. Si tratta dunque di una possibile alternativa, anche se in modesta parte, nell'utilizzo in veicoli ibridi tanto che ad esempio la Germania ha incluso attività di ricerca per quanto riguarda questa tipologia di motori nel piano nazionale di sviluppo della trazione elettrica. Sempre in Germania si segnalano iniziative per la ricerca nel campo dei motori a riluttanza.

3.1.2 Sostituzione di terre rare nei generatori per turbine eoliche

Allo stato attuale il mercato globale delle turbine eoliche, che basano il loro funzionamento sull'utilizzo di ingranaggi di trasmissione e generatori sincroni o asincroni, è pari all'86% di tutto il panorama eolico.

Esse lavorano con elettromagneti, senza la presenza dunque di magneti permanenti e terre rare.

Esiste comunque una tipologia di turbine eoliche senza ingranaggi (turbina a trasmissione diretta Fig.3.1) operativa dal 1991 che contiene normalmente magneti permanenti al Neodimio. Uno dei vantaggi del loro utilizzo è costituito dall'assenza di ingranaggi che si traduce in maggiore efficienza ed affidabilità e minori attriti.

Inoltre, data la compattezza del motore a magneti permanenti, queste turbine risultano essere più leggere rispetto a quelle dotate di trasmissione ad ingranaggio.

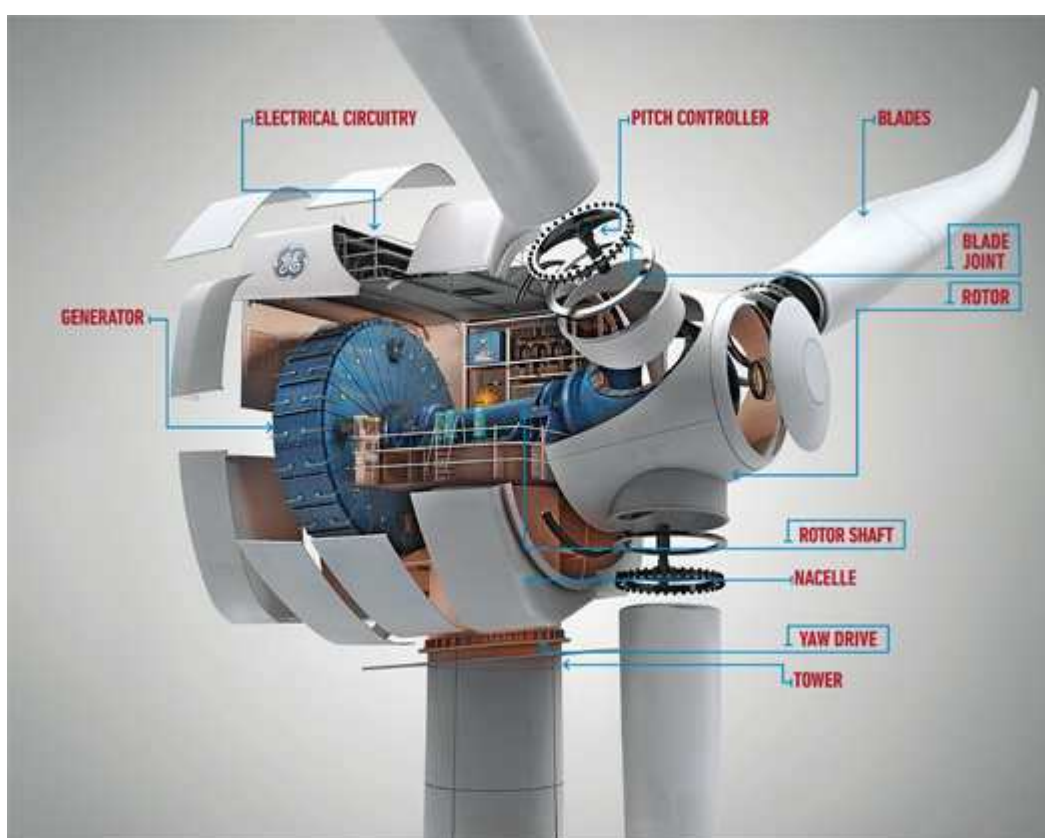


Fig. 3.1 Esempio di turbina eolica senza ingranaggi con generatore a magneti permanenti.

Pertanto l'opzione appena descritta è attraente sia per impianti onshore che offshore con un unico principale ostacolo di mercato: l'elevato costo dei magneti permanenti. Lo scenario internazionale di turbine a trasmissione diretta, costituisce il 14% del mercato globale, ma in alcuni paesi (come in Germania) lo share è molto più alto arrivando a circa il 50-60% con ulteriori sviluppi per applicazioni offshore.

Ci sono molteplici questioni riguardo agli sviluppi futuri in questo settore, che si possono riassumere in due parametri chiave:

- i. Quanto la tecnologia delle attuali turbine ad ingranaggi può essere migliorata al fine di conseguire una maggiore affidabilità rispetto alle attuali?
- ii. Come evolveranno il prezzo e la disponibilità dei magneti permanenti a base di terre rare e che impatto avranno sul mercato delle turbine a trasmissione diretta?

Nel momento in cui si riscontrasse una carenza di Neodimio, potrebbero essere messe a punto le seguenti alternative:

- Ritorno alla classica tecnologia con trasmissione a ingranaggio per applicazioni sia offshore che onshore. Un'indagine dei migliori prototipi in fase di costruzione all'anno 2006, ha attestato come quattro società siano riuscite a sviluppare dispositivi con ingranaggio e generatore asincrono per una potenza di 4-5 MW.
- Turbine a trasmissione diretta con magneti al Samario-Cobalto, comunque piuttosto costosi e a risorse limitate.

Oltre a queste, si segnala il progresso di una nuova tecnologia per rotori dotati di superconduttori per alte temperature (Fig. 3.2), anche se attualmente non è chiaro quanto essi possano influire nella sostituzione di magneti al Neodimio nelle turbine eoliche[9].

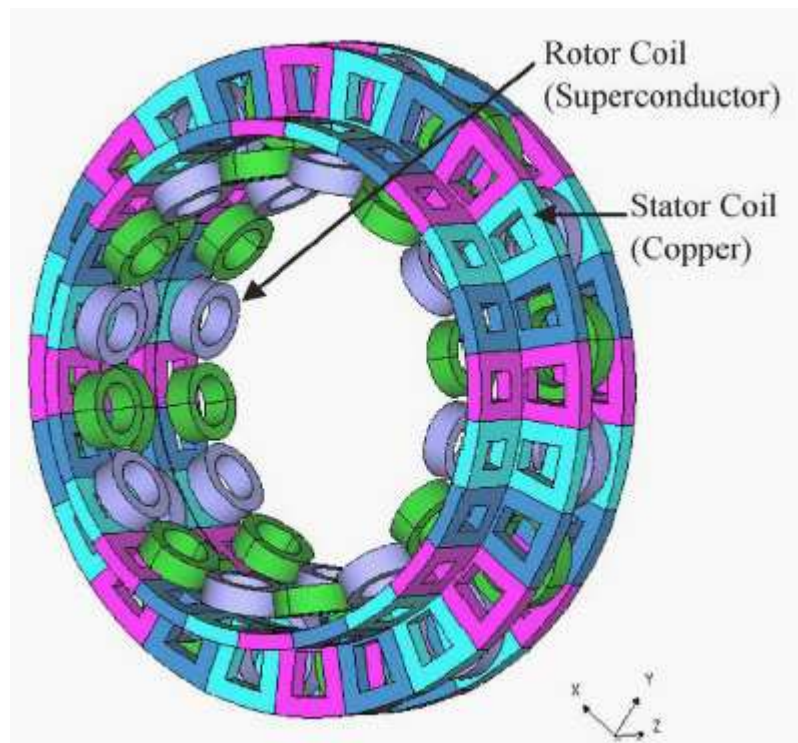


Fig. 3.2 Esempio di modello strutturale di un generatore a 16 poli per turbine eoliche.

Fino ad oggi il prezzo elevato dei superconduttori, ha infatti impedito la loro implementazione in questa tecnologia di produzione elettrica, ma già dalla seconda generazione di superconduttori, essi potrebbero essere prodotti in maggiori quantità a prezzi più attraenti.

Il tutto, tenendo conto del fatto che sono comunque richiesti elementi di terre rare per la costruzione di un superconduttore, ma che essi sono tra quelli meno colpiti dalla crisi a differenza di quelli che troviamo nei magneti permanenti⁵.

Questa seconda generazione di superconduttori, è comunque già disponibile sul mercato globale. Anche se sono necessarie terre rare (ad esempio l'ittrio) per la produzione di superconduttori, esse saranno richieste sempre in minore quantità rispetto a quelle utilizzate nella produzione dei magneti permanenti.

Si pensi che, vengono richiesti dai generatori solo 2Kg di terre rare per MW installato nel caso dei superconduttori, rispetto ai 250Kg per uno stesso generatore nel caso di generazione a magneti permanenti [8].

3.1.3 Sostituzione di Disprosio e Terbio nei magneti permanenti

Molti dei magneti al Neodimio consistono approssimativamente in un 65-70% di ferro, 1% di boro, un 3% di Disprosio e per il 30% un mix di Neodimio/Praseodimio.

Le applicazioni ad alte performances, potrebbero richiedere una quota maggiore di Disprosio.

La sua funzione è quella di aumentare il campo coercitivo e quindi la tolleranza alla temperatura che deve essere elevata in dispositivi quali motori e generatori.

Altra qualità del Disprosio è quella di accrescere la resistenza alla corrosione dei magneti.

La funzione del Terbio è simile a quella del Disprosio ma il suo utilizzo è limitato dalla scarsa disponibilità e dall'alto prezzo di questo materiale. Una sua peculiarità è data dal buon impatto del valore dell'induzione residua, che dovrebbe essere il più alto possibile al fine di aumentare le prestazioni del magnete.

A causa della carenza di approvvigionamento prevista per Disprosio e Terbio, società industriali e di ricerca stanno investigando su eventuali alternative, ma possiamo allo stato attuale solamente dire che:

- Società sostengono che i produttori di magneti permanenti saranno probabilmente costretti ad offrire magneti al NdFeB con composizioni modificate sacrificando alcune prestazioni. Ad esempio, una riduzione del contenuto di Disprosio o di Terbio potrebbe tradursi in una riduzione del campo coercitivo del 10-30%. Solo rapporti dettagliati sui costi, potranno comunque dire quali potrebbero essere i compromessi da adottare in fase di composizione.
- Discussioni tra esperti europei hanno indicato come non ci siano tuttora sostituti commerciabili di Disprosio nei magneti al Neodimio. Un totale abbandono del Terbio, sembra un'opportunità abbastanza concreta per molte applicazioni che non richiedono altissime prestazioni, nel momento in cui però il Disprosio (terra rara a più ampia disponibilità) possa colmare la mancanza di stabilità e prestazioni.

⁵ Si tratta per lo più di materiali quali: Cerio 66ppm, Lantanio 35ppm, Itterbio 26 ppm per i superconduttori. Per i magneti permanenti intendiamo invece: Neodimio 40ppm, Praseodimio 9.1 ppm, Disprosio 4.5 ppm e Terbio 1.2 ppm.

Inoltre possiamo sottolineare come vi siano attività che mirano a migliori performances dei magneti al Neodimio contando su un minore apporto sia di Disprosio che di Terbio.

Un progetto di ricerca di questo tipo è attualmente avviato dalla St.Pölten University of Applied Sciences in Austria in cooperazione con la University of Sheffield in cui scienziati, stanno studiando la composizione ideale per i magneti permanenti ad alte prestazioni per l'utilizzo nei veicoli ibridi e nei motori elettrici sempre nel settore dei trasporti, specificando quale sia la composizione di Disprosio che possa essere ridotta senza compromettere la stabilità termica di tali magneti.

I ricercatori suggeriscono inoltre che ottimizzando la parte magnetica nelle auto ibride ed elettriche, esse possano essere rese molto più economicamente competitive.

Altro esempio che possiamo citare è l'investigazione di come si possa ridurre il contenuto di terre rare nei magneti, ma questa volta in maniera globale, sempre per quanto riguarda i veicoli.

Alcuni reports indicano come siano stati recentemente sviluppati processi efficaci per la riduzione di Terbio mediante tecniche di sputtering⁶ e vaporizzazione.

3.1.4 Sostituzione dei magneti al Neodimio con quelli a SmCo

La produzione di magneti al SmCo deriva da una serie di processi difficili e dispendiosi, essi perciò, vengono utilizzati solamente in pochi casi lasciando maggior spazio ai magneti al Neodimio.

Una sostituzione di questo tipo diventa perciò economicamente interessante solo nel caso in cui si possa disporre di magneti SmCo meno costosi e/o il prezzo dei magneti al Neodimio aumenti.

A parte il forte aumento del prezzo del Neodimio nel 2010, vi sono due opportunità che potrebbero portare a un innalzamento della quota di mercato dei magneti al SmCo:

- i. La Northeastern University ha presentato un nuovo processo di produzione monostadio che porterebbe alla realizzazione di magneti SmCo molto più economicamente. E' stato precisato che a differenza del tradizionale processo multistadio, che fornisce un controllo limitato nella riduzione delle dimensioni e della forma finale delle particelle magnetiche, il metodo monostadio produce nanoparticelle dalla forma allungata simili a lame che porterebbero a una migliore formazione del magnete, che potrebbe diventare più piccolo e leggero senza comprometterne le prestazioni.
- ii. I magneti al SmCo non necessitano, a differenza dei magneti al Neodimio, di rivestimenti. Pertanto, se i prezzi del Neodimio continuassero a salire, vi potrebbe essere una certa convenienza di sostituzione in particolare nei piccoli magneti. La ragione di questo è che il vantaggio economico del non rivestimento nei piccoli magneti permanenti, è più rilevante rispetto ai costi che si hanno quando le dimensioni cominciano a crescere.

Tuttavia la sostituzione, sarà in ogni caso fortemente limitata a causa della restrizione delle risorse di Samario. Il fabbisogno di Samario è stimato tra 4.000 e 5.000 tonnellate nel 2012 mentre quello di neodimio tra 30.000 e 40.000 tonnellate sempre nel 2012.

La ripartizione dei minerali di terre rare nelle miniere di Cina, Australia, Canada, Stati Uniti e Groenlandia, ha dimostrato come tutti i minerali contengano in maniera più significativa Neodimio rispetto a Samario pertanto, si capisce come non vi sia una sufficiente disponibilità di quest'ultimo in grado di poter sostituire una quota così rilevante di Neodimio.

Da tenere inoltre in considerazione l'elevato prezzo e la scarsità di risorse di Cobalto che ha un forte peso sul costo finale dell'accoppiata SmCo.

⁶ Sputtering: processo per il quale si ha emissione di atomi, ioni o frammenti molecolari da un materiale solido detto bersaglio, bombardato con un fascio di particelle energetiche (generalmente ioni).

3.1.5 Riduzione della domanda di terre rare tramite miglioramenti dell'efficienza dei processi

Vi sono iniziative che le industrie possono intraprendere per far fronte ad un aumento del prezzo delle terre rare.

In primo luogo, la modalità classica di produzione Cinese di blocchi di NdFeB e successivamente il loro taglio nella forma desiderata, porta ogni anno a una grande quantità di rifiuti di Neodimio e Praseodimio. La Cina dunque ha la necessità di passare a processi di modellazione tramite compressione già utilizzati in Giappone e in occidente per decenni.

Si ha inoltre la necessità di ridurre lo spreco di preziose terre rare nelle filiere di taglio e sminuzzamento.

Oltre a questo, da non sottovalutare in chiave futura l'utilizzo dei magneti nano-compositi che costituiscono una nuova generazione di magneti che perciò, vengono studiati con alta priorità.

3.2 Magneti nell'industria elettronica

Approssimativamente un terzo dei magneti al Neodimio vennero utilizzati nel 2007 negli Hard Disk Drive e circa il 10% dei magneti in dispositivi ottici e acustici.

In questi settori applicativi essi sono utilizzati per piccoli motori, testine di scrittura e lettura, auricolari e sensori.

In prima parte, gli Hard disk Drive dotati di VCM⁷ (Fig 3.3), possono essere sostituiti con una nuova generazione di dispositivi di immagazzinamento dati, la Solid State Drive (SSD) che utilizza una memoria a stato solido per memorizzare dati persistenti.



Fig. 3.3 Esempio di Voice Coil Motor.

Tra i vantaggi vi è inoltre la non presenza di parti in movimento sostituite da microchip. La scarsità di terre rare potrebbe quindi costituire un'accelerazione a questo tipo di prospettiva.

⁷ Voice Coil Motor: questo motore elettrodinamico è un attuttore dinamico nel quale la forza assiale generata sullo stelo è proporzionale alla corrente continua che circola nell'avvolgimento elettrico.

Abbiamo inoltre già parlato della possibile sostituzione di Disprosio e Terbio e abbiamo concluso come essa risulti difficile nel caso di grossi magneti permanenti per motori nei veicoli ibridi ed elettrici.

La questione potrebbe però risultare meno ostica nelle applicazioni elettroniche di minori dimensioni in cui le temperature in gioco sarebbero minori e tali da favorire la sostituzione o la riduzione di essi.

3.3 Batterie

Terre rare vengono utilizzate nelle batterie Ni-MH⁸: oltre a Nickel e Cobalto, gli elettrodi-MH contengono un mix di differenti tipi di terre rare variabili a seconda del costruttore. Le principali sono Lantanio e Cerio con l'aggiunta di alcune parti di Neodimio e Praseodimio.

Le batterie Ni-MH vengono utilizzate in dispositivi portatili e nei veicoli elettrici ed ibridi che costituiscono il 50% delle vendite mondiali in questo settore.

Vi è tuttavia una certa scarsità di prospettiva per ulteriori miglioramenti, anche se possiamo affermare che la tecnologia futura potrebbe essere basata su batterie agli ioni di Litio (Fig. 3.4).

Questo, può a grandi linee essere confermato dal fatto che la Toyota comincerà ad equipaggiare nuovi veicoli proprio con questi tipi di accumulatori con prestazioni superiori in termini di durata, a partire dal 2011 e che la Germania include questa opzione nel suo piano nazionale per la mobilità elettrica.

Si stima infatti, che questi accumulatori costituiscano il più alto potenziale futuro di accumulo.

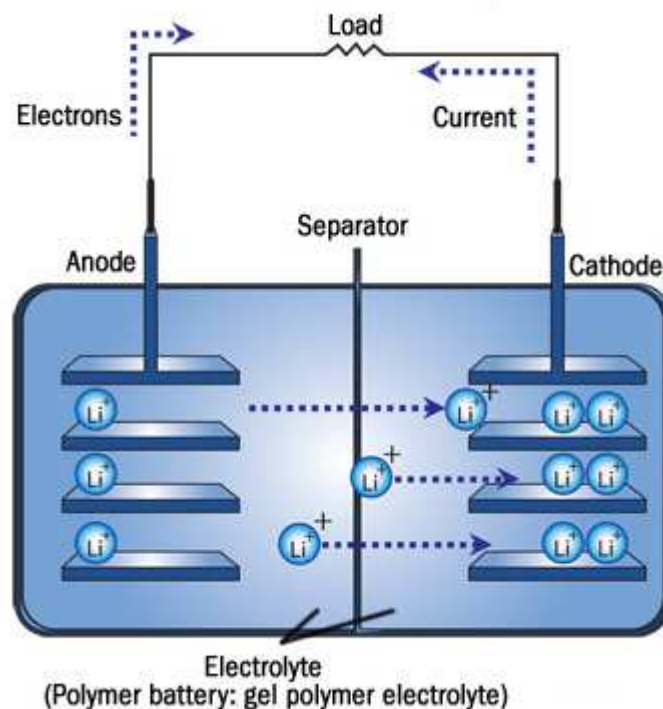


Fig. 3.4 Struttura dell'accumulatore agli ioni di litio.

⁸ *nickel-metal hydride*: accumulatore nichel-idruro metallico.

Inoltre potrebbero svolgere un ruolo importante sempre in chiave futura le redox-flow battery⁹ (Fig. 3.5), batterie al Magnesio e le batterie metallo-aria¹⁰ (Fig.3.6).

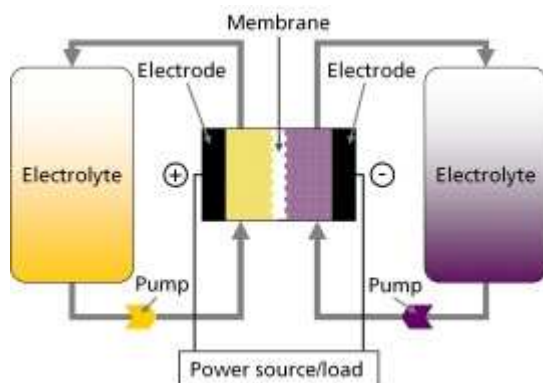


Fig. 3.5 Rappresentazione schematica di una batteria redox-flow.

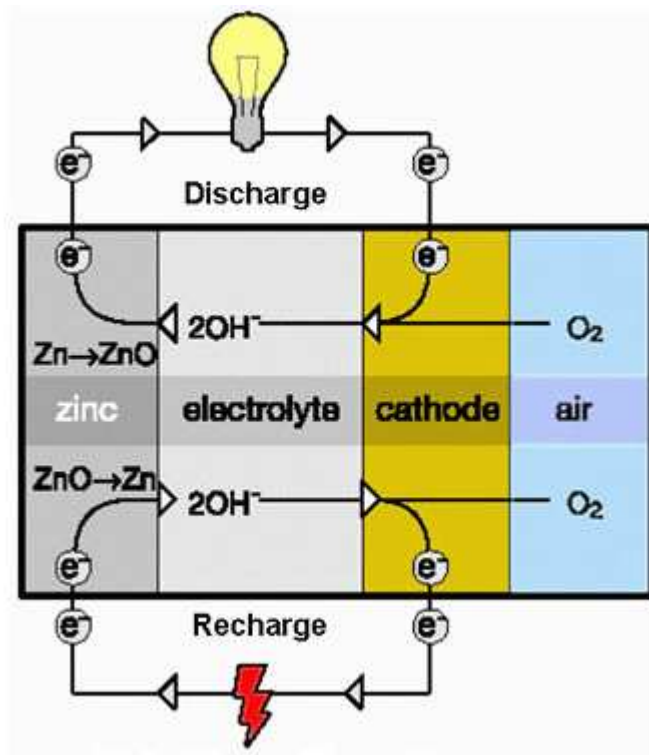


Fig. 3.6 Schema di funzionamento della batteria metallo-aria.

⁹ Le redox-flow sono batterie ricaricabili in cui elettroliti, contenenti una o più sostanze elettroattive disciolte, fluiscono attraverso una cella elettrochimica che converte l'energia chimica direttamente in energia elettrica. Nelle batterie redox, tutti i componenti elettroattivi vengono disciolti nell'elettrolita.

¹⁰ Le batterie metallo-aria non incorporano un catodo. Esso è costituito dall'ossigeno che, proveniente dall'atmosfera, e che passa successivamente attraverso una membrana. Si ha perciò un risparmio significativo in termini di peso e costi.

Dunque, a fronte di tutto ciò, le previsioni parlano di un graduale accantonamento delle batterie Ni-MH con un significativo aumento dell'utilizzo delle batterie agli ioni di litio negli anni a seguire. Potremmo essere un po' più ottimisti dicendo che, per quanto riguarda la trazione ibrida elettrica, l'utilizzo delle Ni-MH potrà cessare addirittura nel medio termine e che il trend per molte altre applicazioni portatili, possa confermare questo passaggio. Un'ulteriore carenza nel campo delle terre rare potrà quindi accelerare questo sviluppo.

3.4 Illuminotecnica

Nel settore delle lampade a fluorescenza, trovano utilizzo in maniera frequente terre rare come Ittrio, Cerio e Lantanio.

E' stato scoperto che l'Ittrio non può essere sostituito da altri elementi e che i fosfori contenenti terre rare, risultano superiori ad altri fosfori.

Tuttavia si è fatto riferimento al Manganese come possibile alternativa al Terbio con un probabile decremento del consumo fissato al 40%.

Da un progetto di ricerca giapponese per la sostituzione di Terbio ed Europio partito nel 2009, che prevede l'utilizzo di metodi di calcolo e sintesi chimica dei materiali, è comunque risultato che non vi è capacità di sostituzione per l'Europio sia nelle lampade e fluorescenza sia come fosforo rosso in schermi televisivi.

La futura tecnologia LED invece, potrebbe eliminare la necessità di fosfori di Lantanio e Terbio mentre continueranno ad utilizzare Cerio ed Europio.

3.5 Catalizzatori

Un importante esempio dell'utilizzo di terre rare nel campo dei catalizzatori a livello industriale è l'FCC¹¹ in cui gioca un ruolo fondamentale il Lantanio con una richiesta annuale approssimativa di 12.000 tonnellate.

Attualmente non vi è traccia di materiali in grado di sostituire il Lantanio, e di assicurare stabilità termica anche se esperti affermano che ci sono numerose sollecitazioni alla riduzione dovute all'aumento dei prezzi di questa terra rara.

L'incapacità di riuscire a trovare un degno sostituto, colpisce anche il reparto dei catalizzatori per autotrazione.

¹¹ *Fluid Catalytic Cracking*: Il cracking catalitico a letto fluido permette di ottenere benzine con alto potere indetonante da gasoli pesanti e residui della distillazione atmosferica.

Capitolo 4

Possibile ritorno alle ferriti

Data l'ampia variazione delle proprietà esistenti nei materiali per magneti permanenti, si fa solitamente uso di speciali criteri che giustifichino la scelta di un certo materiale al posto di un altro, in determinate applicazioni.

Questi criteri fanno riferimento a vari parametri ma, quelli che probabilmente più ci interessano, sono i costi e gli aspetti legati al peso e al volume (soprattutto nei veicoli elettrici ibridi).

Con un possibile utilizzo di magneti in ferrite nei campi d'applicazione più importanti del settore elettrico ed elettronico, si potrebbe quindi contare su un notevole abbassamento dei prezzi.

4.1 Motore a magneti permanenti in ferrite

I motori sincroni a magneti permanenti, sono una parte fondamentale degli attuali veicoli elettrici ibridi, nei quali vengono richieste prestazioni sofisticate, piccole dimensioni, alta densità di potenza ed alto rendimento.

Al fine di raggiungere tali prestazioni, risulta fondamentale l'utilizzo di magneti permanenti a base di terre rare, dato il loro elevato prodotto di energia.

Tuttavia, come abbiamo visto nei capitoli precedenti, gli utilizzi di magneti permanenti contenenti terre rare quali Neodimio e Disprosio, destano più di qualche preoccupazione a causa della dipendenza dal mercato cinese con l'inevitabile aumento dei prezzi. D'altra parte però, l'utilizzo di questo tipo di veicoli, tende ad essere promosso rapidamente a causa di problematiche riguardanti l'impatto ambientale con susseguente espansione della domanda di terre rare nel prossimo futuro.

E' quindi il caso di riuscire a proporre in questo campo lo sviluppo e l'utilizzo di un motore con magneti permanenti in ferrite in sostituzione a quelli a base di terre rare.

In generale, la massima energia prodotta da un magnete permanente in ferrite è circa il 10% di quella prodotta da un magnete permanente a base di terre rare. Quindi risultano essere minori sia il campo coercitivo sia l'induzione residua e di conseguenza la coppia magnetica esplicita dal motore sincrono risulta significativamente ridotta. Per le stesse ragioni, nelle ferriti si pone anche il problema di una possibile smagnetizzazione causata da un indebolimento di flusso.

E' quindi di fondamentale importanza lo studio di una configurazione che possa tradursi in un aumento della coppia.

4.1.1 Struttura del motore a magneti permanenti in ferrite

Possiamo a questo punto prendere in esame un esempio di configurazione di motore per veicoli ibridi a magneti permanenti in ferrite, che non fa utilizzo di terre rare [1].

E' inanzitutto utile fare una comparazione tra i target proposti dal motore a magneti permanenti in ferrite e i già buoni risultati raggiunti dal motore con magneti a base di terre rare negli attuali veicoli elettrici ibridi (Tab. 4.1).

La grandezza del motore è praticamente la stessa. Anche se la coppia massima fissata a 320 Nm del prototipo è l'80% di quella assicurata dai motori attuali ad alte prestazioni, la massima potenza in uscita di 50 kW si ottiene aumentando la velocità nominale a 1500 giri/min.

In Fig. 4.2 viene proposta la struttura del prototipo; esso è costituito da un singolo rotore interno a due statori.

	Comparison value	Target value
Max. power	50 kW	50 kW
Volume	8.92 L	8.81 L
Max. power density	5.61 kW/L	5.68 kW/L
Max. torque	400 Nm	320 Nm
Max. torque density	45 Nm/L	36 Nm/L
Rated speed	1200 rpm	1500 rpm
Max. current density	22 Arms/mm ² (surmised value)	22 Arms/mm ²

Tab. 4.1 Comparazione tra valori raggiunti da un motore con magneti permanenti a base di terre rare e aspettative di un prototipo con magneti permanenti in ferrite.

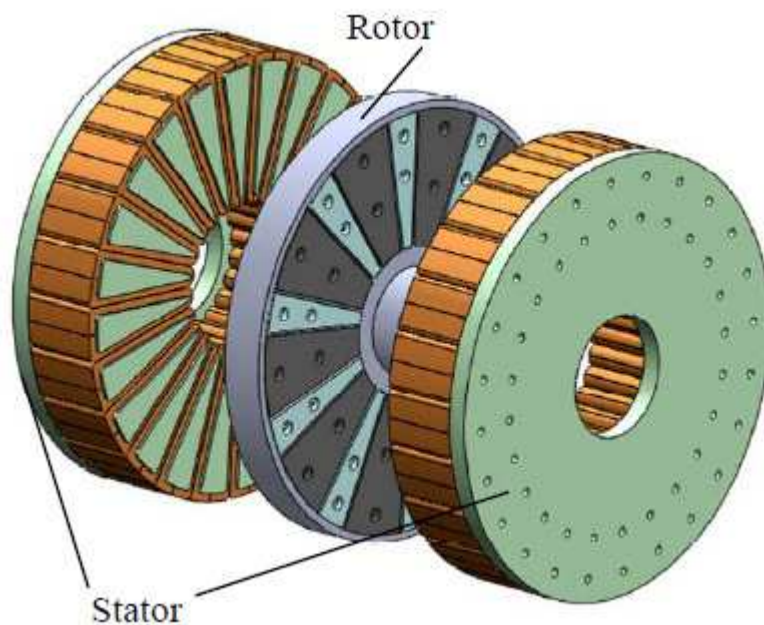


Fig. 4.2 Struttura del motore.

Il nucleo dello statore è costituito da materiale SMC¹² (Fig. 4.3) . In questo prototipo, vi sono 10 poli ad avvolgimenti concentrati avvolti attorno ai 24 denti di statore, pertanto si ha una configurazione d'avvolgimento irregolare.

¹² Soft magnetic composite: polveri di materiale magnetico dolce compattate e legate tramite polimero.

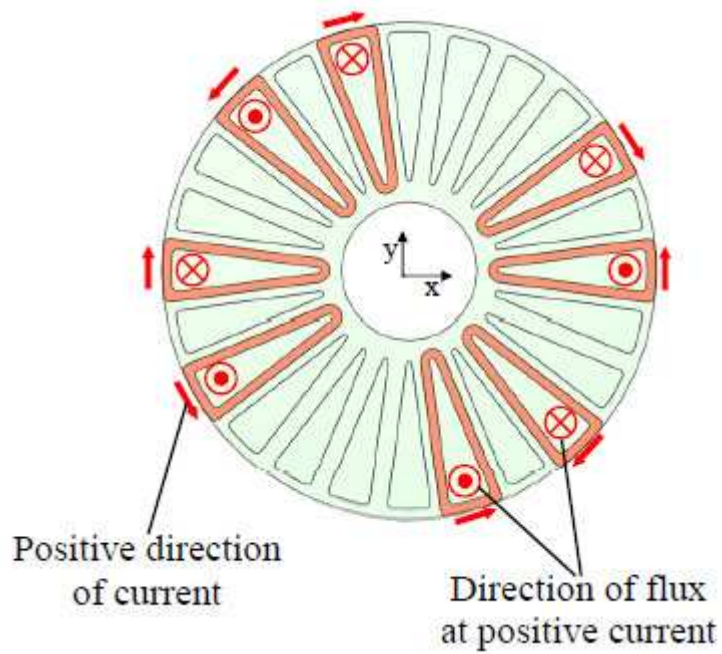


Fig. 4.3 Configurazione d'avvolgimento dello statore.

Il rotore (Fig. 4.4), è strutturato in modo tale da avere i magneti permanenti e i nuclei in SMC, disposti alternativamente attorno ad un supporto in acciaio inox. Di conseguenza il motore, funziona come un motore elettrico a 10 poli.

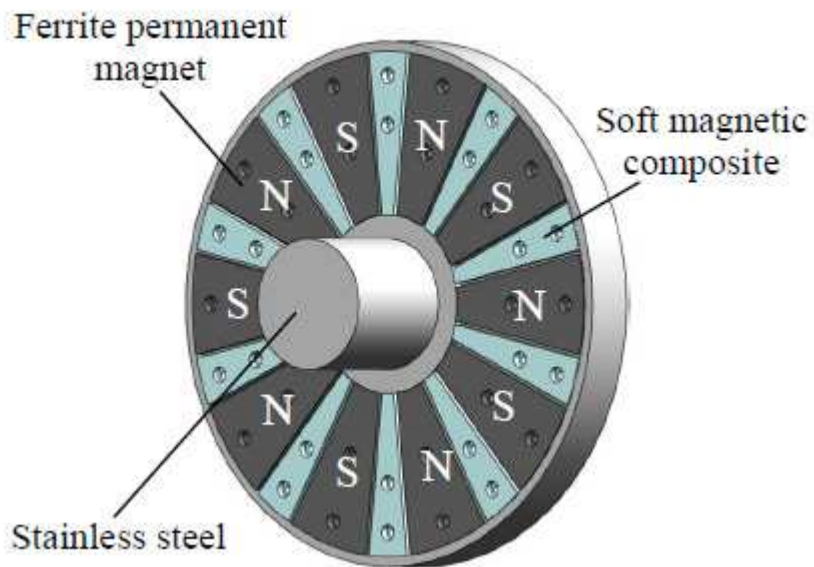


Fig. 4.4 Struttura del rotore

L'induttanza L_d relativa all'asse d (Fig. 4.5), è molto bassa in quanto il percorso del flusso magnetico di questo asse, è intercettato dai segmenti dei magneti permanenti caratterizzati da un'elevata riluttanza magnetica che quindi svolgono un ruolo di barriera magnetica.

L'induttanza L_q relativa all'asse q invece, è molto alta in quanto il percorso del flusso magnetico lungo questo asse è composto dai segmenti in SMC caratterizzati da un'elevata permeabilità.

Pertanto il rapporto L_q/L_d della struttura rotorica, è più alto rispetto a quello delle strutture convenzionali.

Di conseguenza vengono a crearsi non solo coppie magnetiche ma anche coppie di riluttanza. Quindi in questo tipo di configurazione vi è una sostanziale riduzione dell'indebolimento di campo dovuto al flusso che scorre direttamente nei segmenti di ferrite quindi, si viene a creare una buona contromisura alla smagnetizzazione irreversibile della ferite.

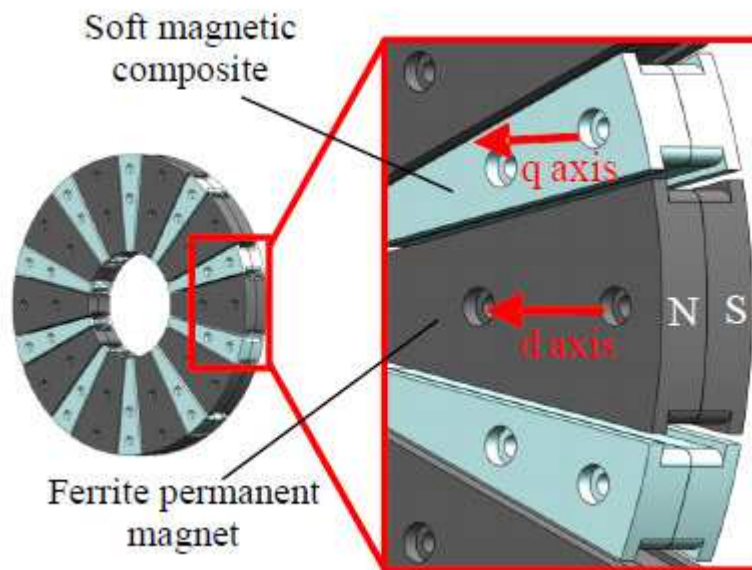


Fig. 4.5 Struttura segmentata del rotore.

4.1.2 Risultati dell'analisi ad elementi finiti

L'analisi ad elementi finiti viene effettuata al fine di valutare le caratteristiche di coppia e la smagnetizzazione irreversibile dei magneti in ferrite.

In Tab. 4.6 sono riportati le specifiche del motore in accordo ai target della Tab. 4.1.

Number of poles	10
Number of slots	24
Outer diameter of stator	269 mm
Inner diameter of stator	74 mm
Stator height	62 mm
Outer diameter of rotor	264 mm
Rotor thickness	29 mm
Arc angle of PM	24 deg
Arc angle of SMC core	12 deg
Total motor axial length	155 mm
Diameter of shaft	64 mm
Air gap	1 mm
Slot fill factor of coil	57.6%

Tab 4.6 Dati del motore in prova.

La Fig. 4.7 mette in evidenza la relazione tra la coppia media del motore e l'angolo di fase ad una densità di corrente di 22 A/mm^2 . La massima coppia è di 326.7 Nm attorno ai 40 gradi e può superare quindi l'obiettivo prefissato all'inizio (Tab. 4.1).

Utilizzando i magneti in ferrite, si riesce a raggiungere una densità di coppia massima di 37.1 Nm/L che rappresenta più dell'80% dei 45 Nm/L raggiunti dai motori magnetici a base di terre rare quindi possiamo dire che, alla velocità di 1500 giri/min , la configurazione proposta consente di raggiungere la potenza richiesta di 50 kW .

La linea tratteggiata descrive invece il valore teorico della componente magnetica della coppia: a 40 gradi, si può notare come il valore della coppia di riluttanza sia circa il 54.4% del valore della massima coppia massima e come quindi essa possa effettivamente essere utilizzata.

In Fig. 4.8 viene invece mostrata la relazione tra il valore della coppia istantanea e l'angolo di rotazione corrispondente a una densità di corrente di 22 A/mm^2 e alla fase di 40 gradi. Si nota come vi sia un ripple tra la massima coppia media e il valore istantaneo in alcuni punti.

Questo difetto si riesce a colmare tramite la struttura irregolare degli avvolgimenti di Fig. 4.3.

Quindi tramite queste analisi, si può notare come la caratteristica meccanica del prototipo in analisi sia molto buona in accordo con quelle che erano le richieste iniziali.

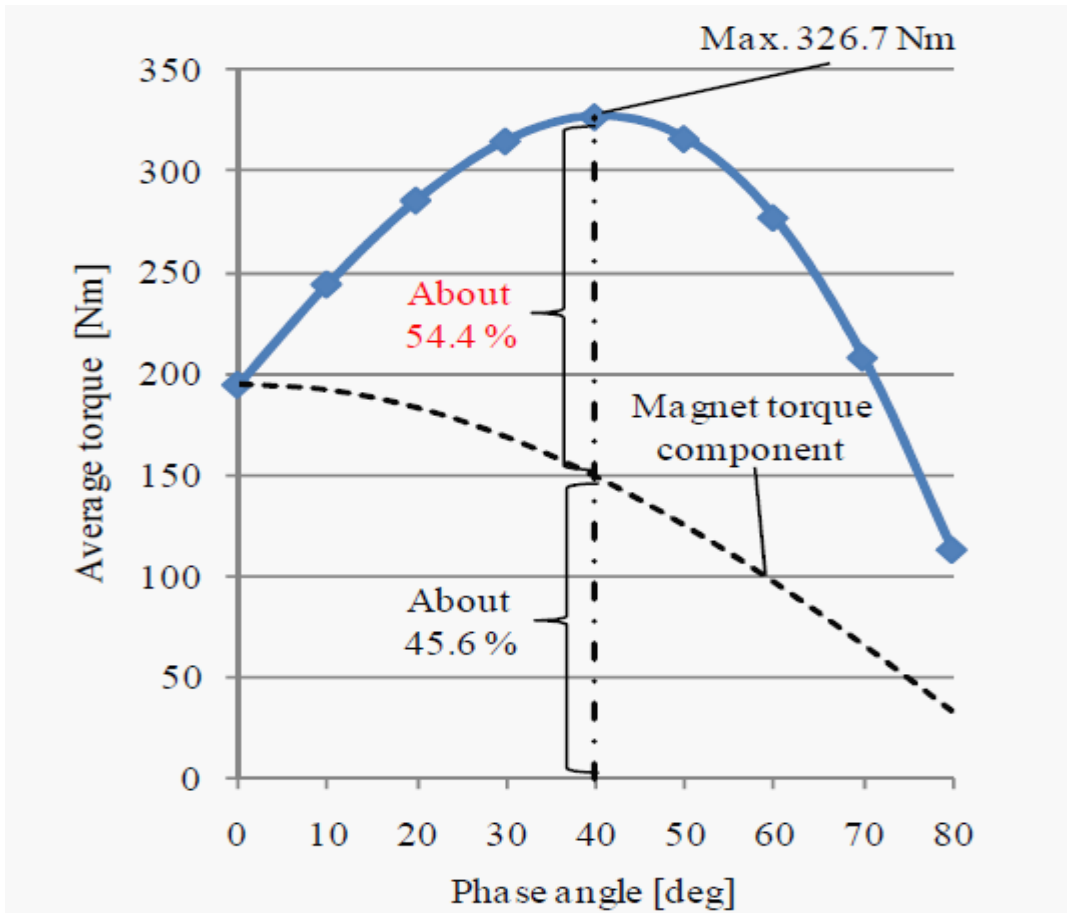


Fig. 4.7 Relazione tra coppia media ed angolo di fase.

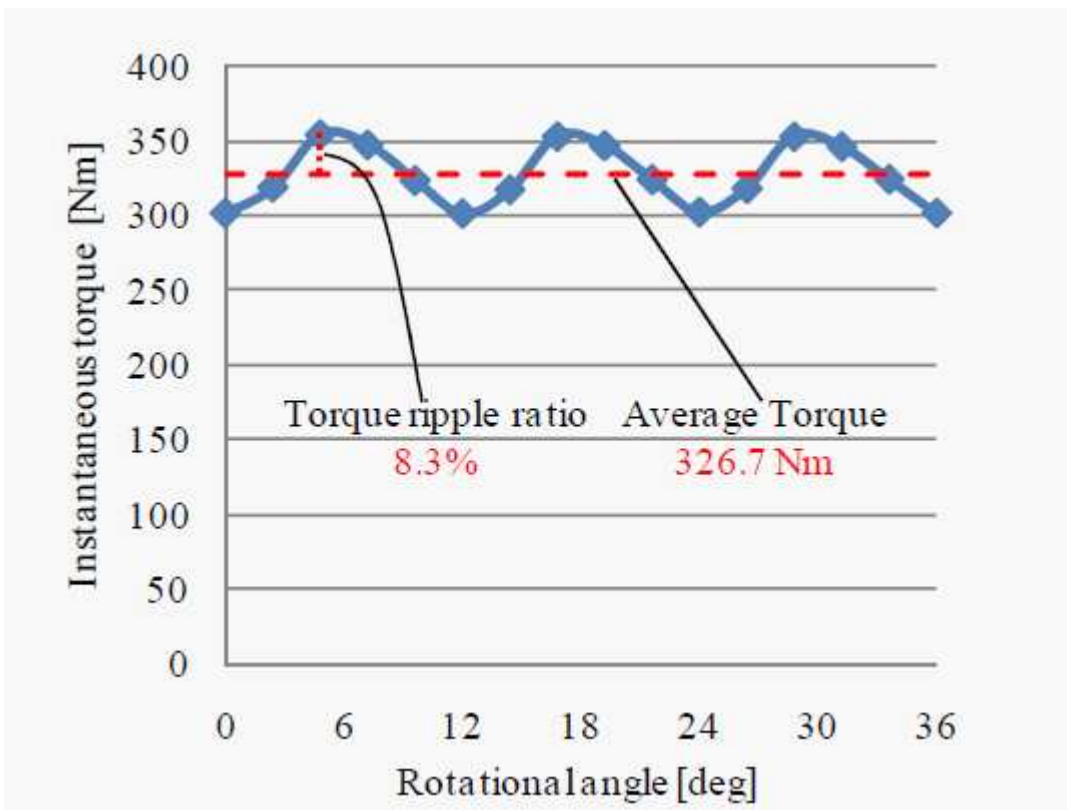


Fig. 4.8 Coppia istantanea in funzione dell'angolo di rotazione.

L'analisi ad elementi finiti mette inoltre in evidenza come vi sia la possibilità di ridurre efficacemente la smagnetizzazione dei magneti in ferrite grazie solamente alla modifica del design dei segmenti rotorici (Fig. 4.9).

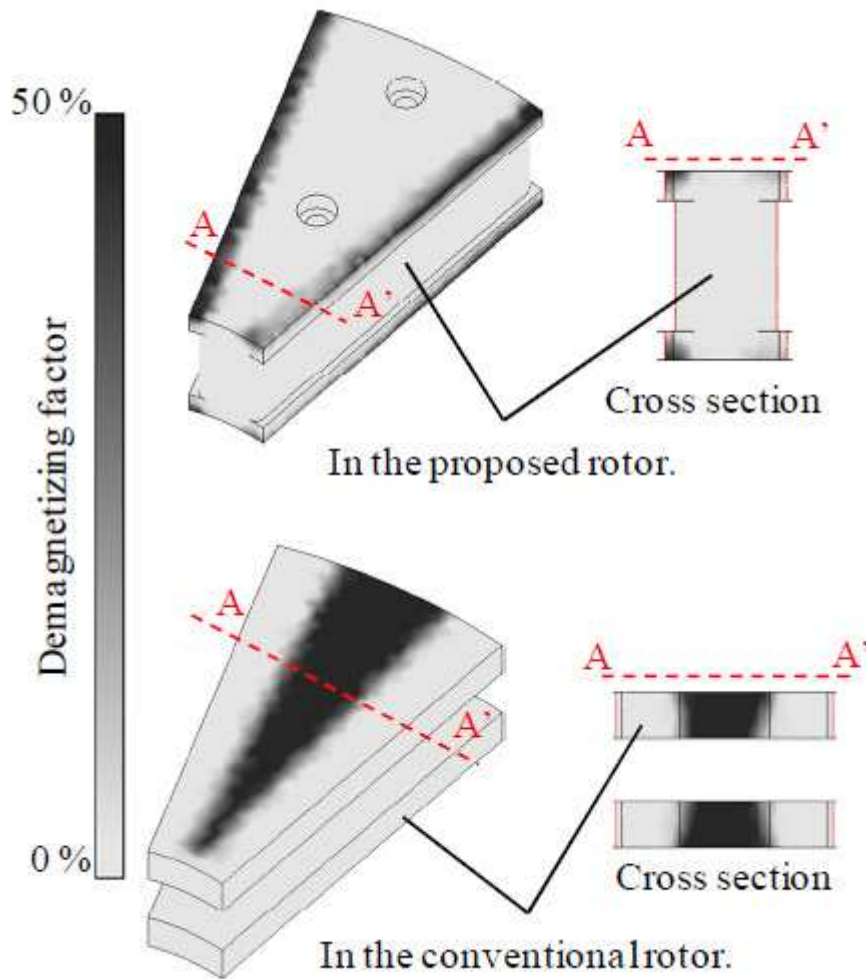


Fig. 4.9 Smagnetizzazione irreversibile dei segmenti magnetici di due tipi di strutture rotoriche.

L'aumento della tonalità nera, sta a indicare un aumento del fattore di smagnetizzazione della ferrite. Si nota quindi come nelle inserzioni di tipo convenzionale, questo fattore sia molto più elevato che in segmenti strutturati in modo differente in cui la smagnetizzazione si attesta in maniera molto più leggera e solamente ai bordi del magnete.

Questo ci fa capire come la struttura segmentata possa costituire un enorme vantaggio contro la smagnetizzazione irreversibile.

La Fig. 4.10 mostra infine il prototipo in fase di costruzione, le cui dimensioni erano già state riportate nella Tab 4.6. Si può notare come il rotore sia a struttura segmentata con l'alternanza di magneti permanenti in ferrite e segmenti SMC.

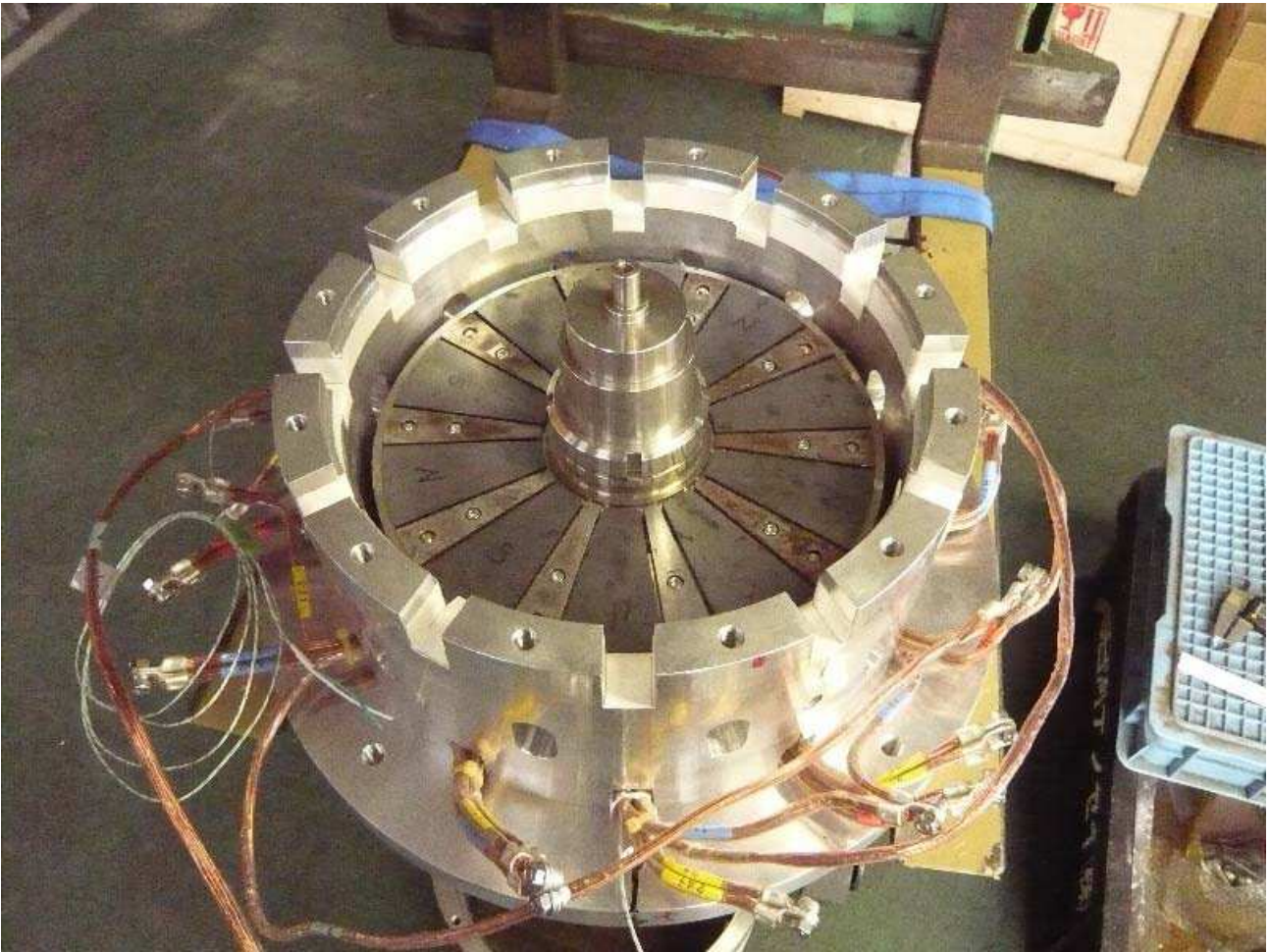


Fig. 4.10 Immagine del prototipo in analisi.

4.1.3 Conclusioni

La massima energia prodotta da un magnete permanente in ferrite, è molto più bassa di quella prodotta da un magnete a base di terre rare come era stato detto in principio. E' quindi di fondamentale importanza riuscire a generare efficacemente una coppia di riluttanza al fine di compensare la riduzione della coppia magnetica esplicita dal motore e in aggiunta sopprimere in maniera adeguata la smagnetizzazione irreversibile dei magneti in ferrite.

La configurazione proposta, costituisce quindi una buona base di partenza per un possibile ritorno all'utilizzo dei magneti permanenti in ferrite al posto dei più costosi magneti attualmente utilizzati perlomeno in questo campo d'applicazione (che è comunque attualmente di fondamentale importanza) e deve far ragionare sul fatto che, con alcuni possibili accorgimenti strutturali, si possono ottenere caratteristiche molto simili alle strutture già implementate.

4.2 Generatore a riluttanza e magneti permanenti in ferrite

La richiesta di generatori elettrici che presentino alta potenza ed elevato rendimento a basse velocità e soprattutto a costi contenuti, è sempre più in aumento.

Un generatore a riluttanza commutata, costituito da nucleo magnetico ed avvolgimenti, presenta una struttura semplice e robusta. Il suo utilizzo risulta perciò appetibile in applicazioni quali la generazione tramite microturbine a gas.

Data poi la grande libertà di forma e il basso momento d'inerzia, favorevoli per l'utilizzo a basse velocità, questi tipi di generatori trovano grande spazio nelle turbine eoliche di piccola scala e nella generazione di energia elettrica tramite piccole turbine in impianti idroelettrici di modeste dimensioni.

Tuttavia i generatori a riluttanza commutata, hanno il problema che il loro sistema di generazione è complicato in quanto richiedono un circuito di eccitazione esterno e un encoder¹³ che viene utilizzato per rilevare la posizione del rotore rispetto allo statore, e quindi in grado di decidere la perfetta sincronizzazione dei segnali di comando delle fasi (solitamente tre). Per risolvere questa problematica, si è deciso dunque di spostare l'attenzione verso i generatori a riluttanza con magneti permanenti.

Essi hanno la stessa struttura dei generatori a riluttanza commutata ma sono privi di ulteriori circuiti esterni di eccitazione e di sensori di posizione il che ci porta a concludere che i generatori a magneti permanenti, sono molto più semplici ed efficienti.

Discusse queste problematiche, ne rimane ancora una di notevole importanza: il costo dei magneti permanenti a base di terre rare.

E' per questo motivo che cercheremo di capire come utilizzare i magneti in ferrite (che abbiamo già evidenziato essere meno costosi ma con peggiori qualità magnetiche) nei generatori a riluttanza in modo da avere la stessa potenza generata e le stesse caratteristiche di quelli con magneti permanenti a base di terre rare[4].

4.2.1 Struttura ed analisi del generatore a riluttanza

In Fig. 4.11 si vogliono mettere in evidenza le dimensioni e le schematizzazioni di due configurazioni di generatori a riluttanza e magneti permanenti a NdFeB disposti lungo lo statore.

Si può notare come il rendimento (Fig. 4.12), vari in funzione del numero di giri e del numero dei poli; in particolare un aumento di quest'ultimi è efficace in modo da poter migliorare il rendimento alle basse velocità.

Se il nostro obiettivo fosse lavorare attorno ai 1.000 giri/min o poco meno, e quindi nel caso di generazione tramite piccole turbine idroelettriche, un aumento delle coppie polari per ottenere un incremento del rendimento non è un'ipotesi assolutamente da scartare.

¹³ Dispositivo elettromeccanico che converte la posizione angolare del suo asse rotante in segnali elettrici digitali.

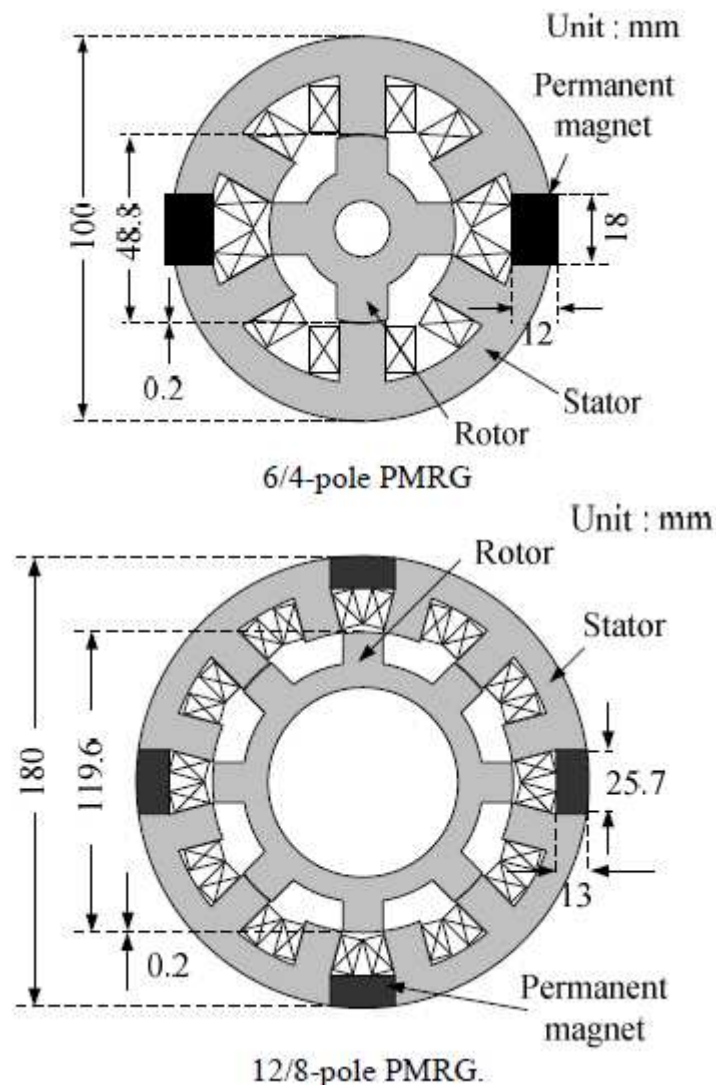


Fig. 4.11 Forma e dimensione di due generatori a riluttanza con magneti a terre rare.

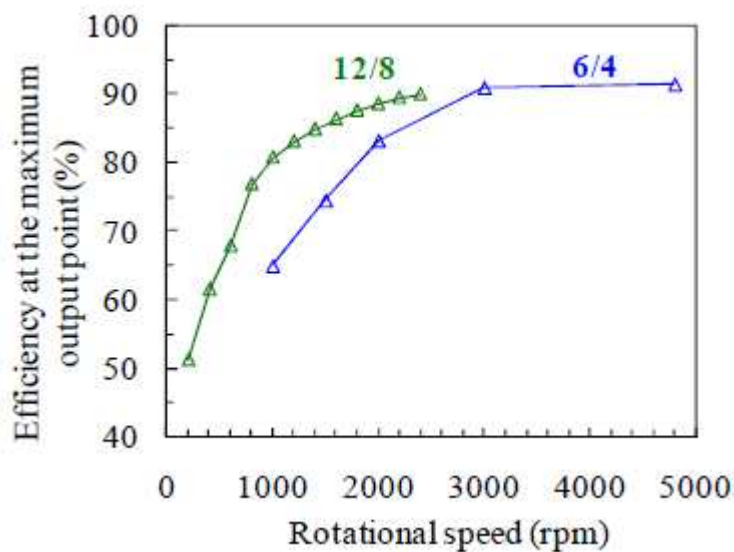


Fig. 4.12 Andamento del rendimento alla massima potenza generata.

Tuttavia, se il numero delle coppie polari aumenta, questa tipologia di rotore interno non offre sufficiente spazio all'inserimento di magneti permanenti e lo spazio perso aumenterebbe. Al contrario, se venisse impiegata una struttura a rotore esterno, lo scarto diminuirebbe in conseguenza al minor numero di poli di statore utilizzati (Fig. 4.13).

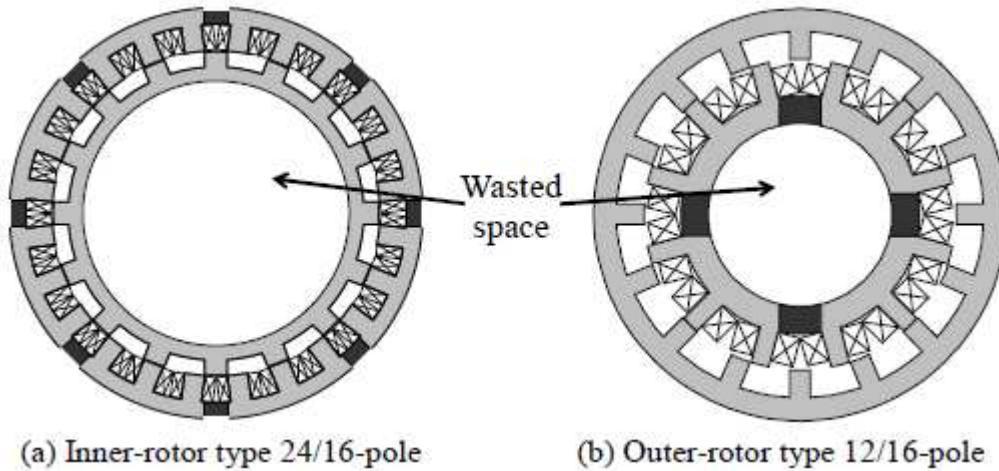


Fig. 4.13 Rotore interno ed esterno (aventi lo stesso numero di poli) in un generatore a riluttanza e magneti permanenti.

A questo punto lo spazio recuperato nella configurazione a rotore esterno, può essere utilizzato efficacemente per il posizionamento dei magneti permanenti.

Pertanto, un magnete in ferrite, avente circa un terzo dell'induzione dei magneti a base di terre rare, ma un costo dieci volte minore, potrebbe trovarci impiego.

Date queste considerazioni dunque, un generatore a riluttanza con magneti permanenti in ferrite e rotore esterno multipolare (Fig. 4.14), può essere confrontato con uno avente magneti permanenti a base di terre rare tramite un'analisi ad elementi finiti in due dimensioni.

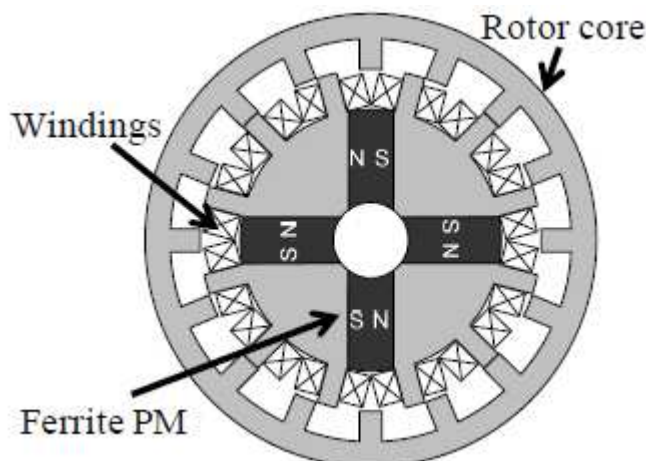


Fig. 4.14 Struttura del generatore a rotore esterno e magneti in ferrite.

L'analisi (Fig. 4.15) mostra effettivamente come la soluzione in ferrite fornisca quasi la stessa potenza d'uscita della soluzione precedente.

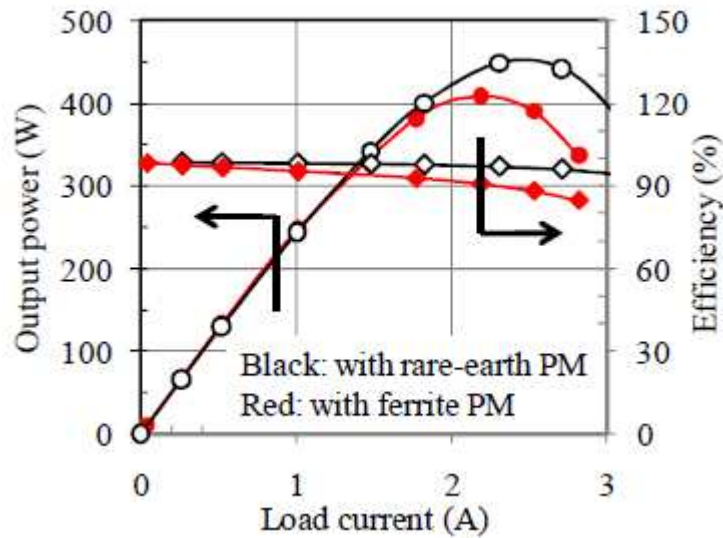


Fig. 4.15 Andamenti della potenza d'uscita e del rendimento nel confronto.

4.2.2 Riduzione del ripple di coppia

Questo tipo di generatore presenta un elevato ripple di coppia a causa della struttura a poli salienti ed è sfavorevole nella generazione tramite turbine idroelettriche ed eoliche di piccola taglia. Accoppiando al rotore esterno un altro rotore con la stessa struttura ma sfalsando leggermente la posizione polare del primo rispetto al secondo (Fig. 4.16), si può ottenere un miglioramento dell'ondulazione della coppia. Anche se comunque l'efficacia risulta maggiore nel caso di multi-sovrapposizione, dobbiamo tenere conto del fatto che accoppiando più parti rotoriche, l'ingombro aumenta.

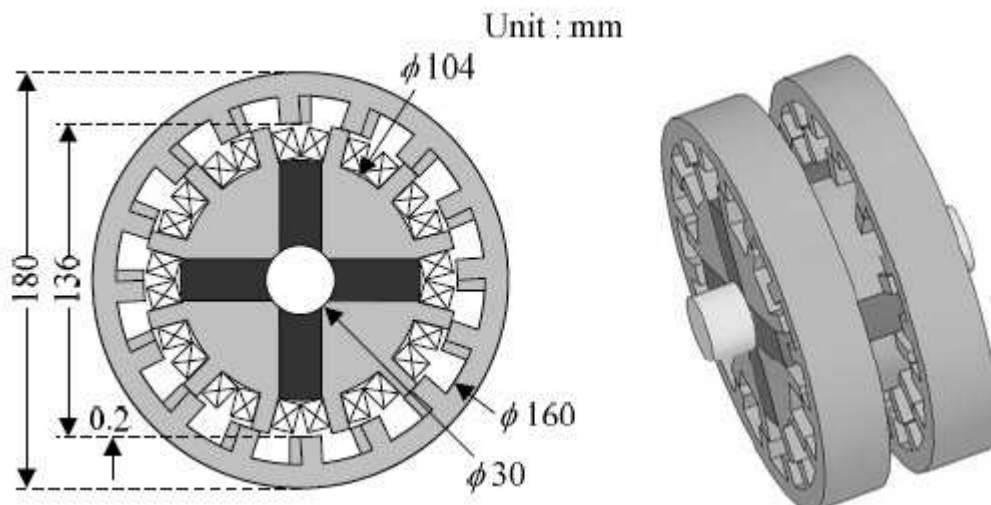


Fig. 4.16 Accoppiamento di due rotori sfalsati in una configurazione a rotore esterno, 12 poli statorici, 16 poli rotorici e magneti in ferrite.

Il beneficio che si potrebbe ottenere, è descritto in Fig. 4.17. Se la forma d'onda della coppia di un solo rotore contenesse solamente armoniche dispari, il ripple potrebbe in teoria essere completamente cancellato solamente adattando due rotori spazati l'uno rispetto all'altro di un angolo elettrico pari a 180° .

In questo caso quindi, avrò uno spostamento angolare di 3.75 gradi.

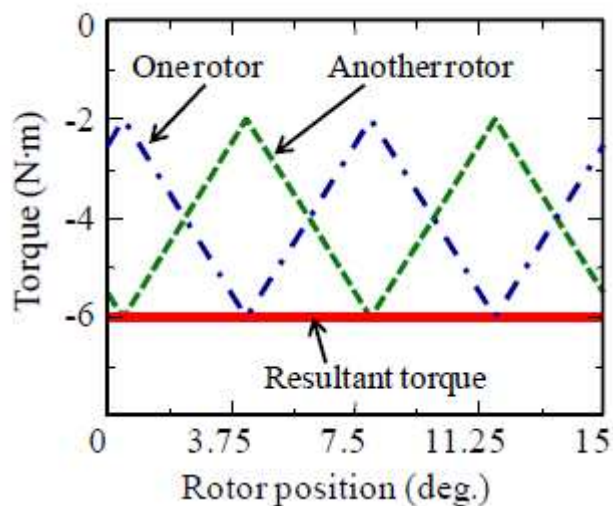


Fig. 4.17 Principio di riduzione del ripple di coppia.

Si potrebbe poi utilizzare una tipologia di poli rotorici (Fig. 4.18a) smussati rispetto al tipo precedente in modo tale che la forma d'onda contenga solo armoniche di ordine dispari.

La larghezza dei poli (2mm) e l'angolo di smussamento (15 gradi), vengono determinati dall'analisi ad elementi finiti in 3D (Fig. 4.18b).

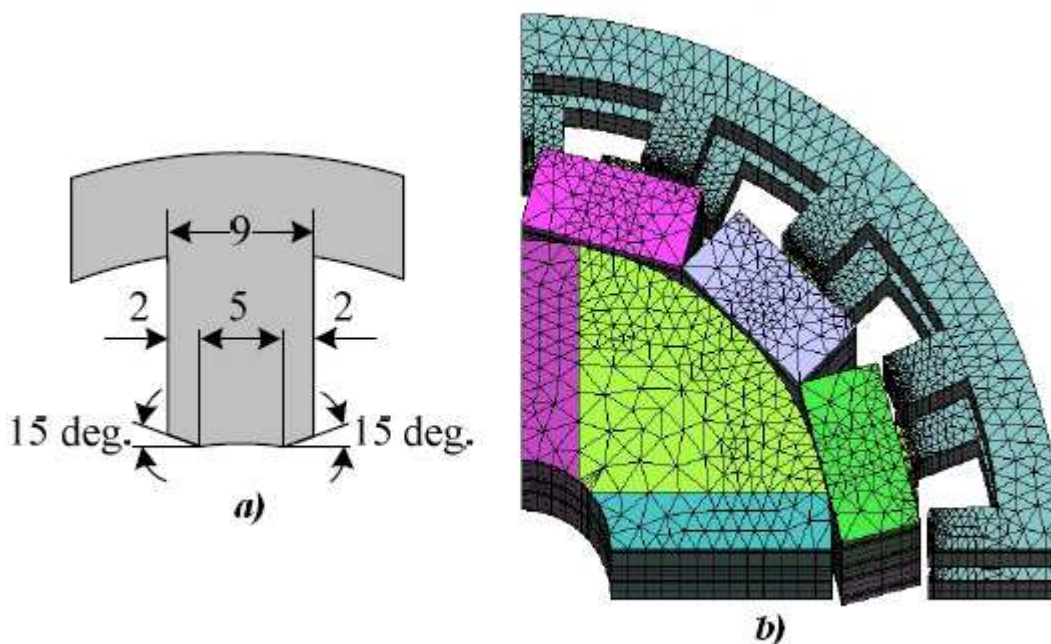


Fig. 4.18 Struttura dei poli rotorici e modello tridimensionale di una struttura a due rotori (dall'analisi ad elementi finiti).

E' risultato dalle analisi che, utilizzando questo metodo, il ripple si riduce ulteriormente (Fig. 4.19a e 4.19b).

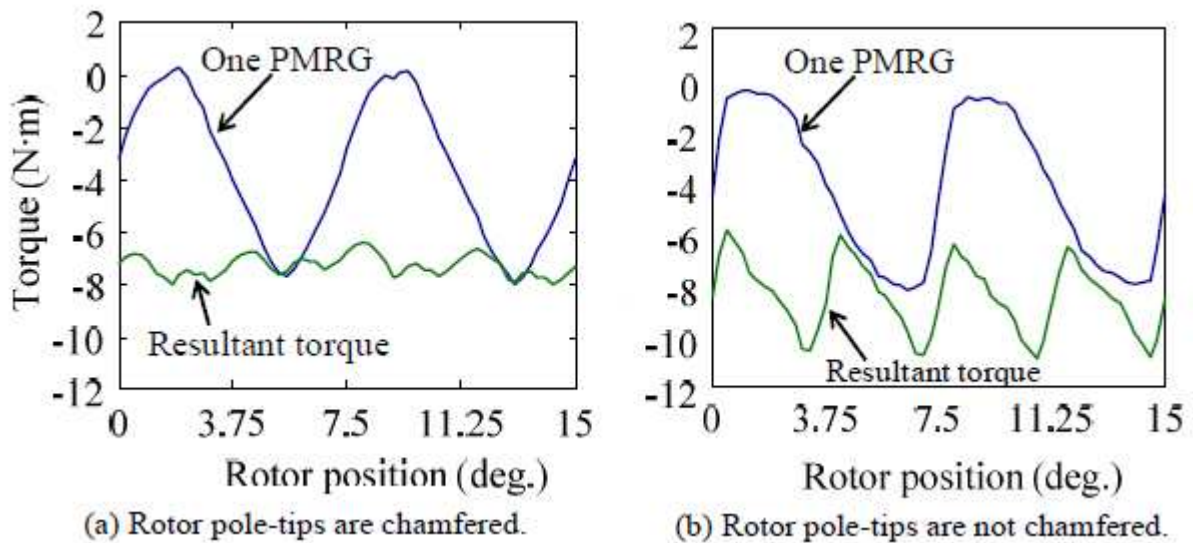


Fig. 4.19 Calcolo delle forme d'onda nel caso di smussamento dei poli rotorici e nel caso contrario.

4.2.3 Verifiche sperimentali

In base ai ragionamenti precedenti, il sistema di Fig 4.16, è stato sperimentato in un prototipo (Fig. 4.20) al fine di essere sottoposto a verifiche sperimentali.

Un servomotore, viene utilizzato per guidare il generatore a riluttanza ad una velocità costante che viene misurata assieme alla coppia.

Pertanto la potenza meccanica in ingresso è data dalla coppia moltiplicata per la velocità angolare.

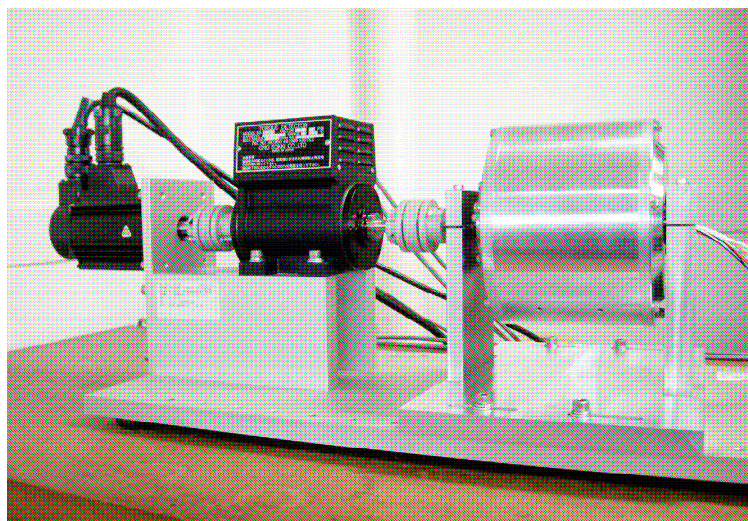
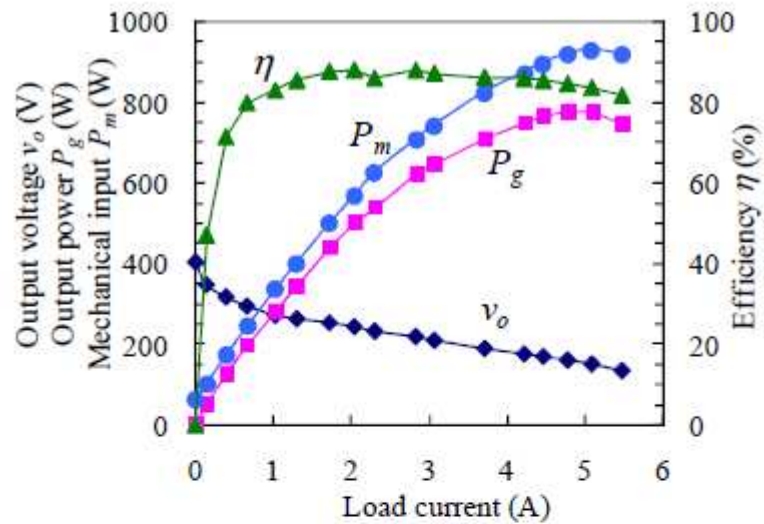
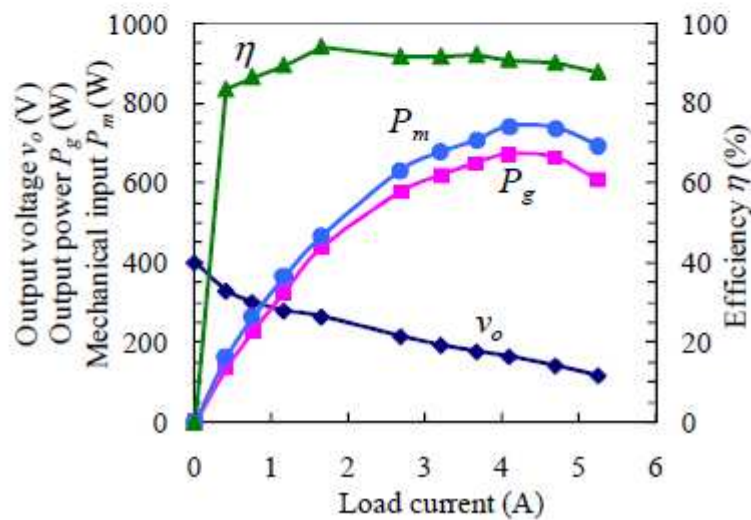


Fig. 4.20 Vista generale di un prototipo in fase di sperimentazione.

Il massimo rendimento ottenibile è dell'87.8% a 1000 giri/min e con una corrente di carico di 2A. La massima potenza in uscita è di 777W a 4.8A con un rendimento dell'84.5% (Fig. 4.21). Il rendimento calcolato e la potenza in entrata, risultano leggermente diversi rispetto ai valori calcolati in quanto, in fase di calcolo, vengono trascurate le perdite meccaniche e le perdite nel ferro.



(a) Measured values



(b) Calculated values

Fig. 4.21 Caratteristiche di carico.

La misura della forma d'onda della coppia, presenta un ripple molto basso che si attesta attorno al 10% del valore medio.

E' stato infine riscontrato (Fig. 4.22) che un aumento del numero dei poli rotorici alla massima potenza di uscita, corrisponde a un incremento del rendimento nella regione delle velocità moderate, il che conferma la teoria precedente.

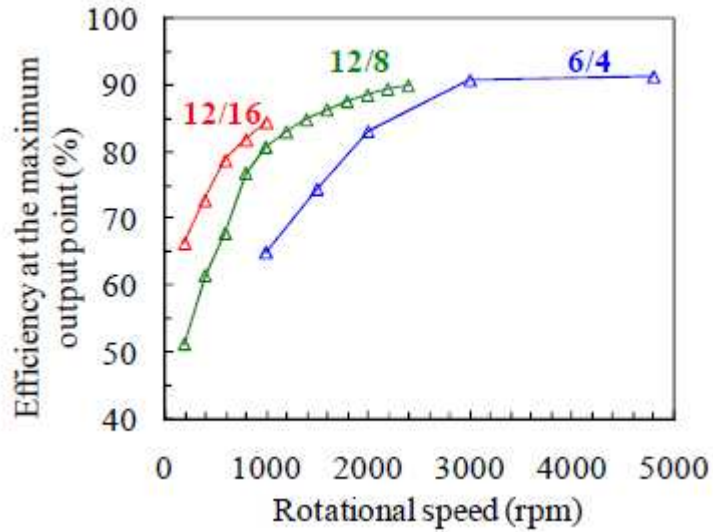


Fig. 4.22 Confronto dell'efficienza dati vari tipi di configurazione.

4.2.4 Conclusioni

E' stato sviluppato un tipo di generatore a riluttanza e magneti permanenti in ferrite utile in applicazioni per basse velocità. Rendimento e potenza d'uscita, sono molto simili a quelli dei generatori convenzionali che impiegano terre rare come materiali per magneti permanenti. Ma il costo del materiale, può essere del 45% inferiore e soprattutto svincola da qualsiasi problematica legata a materiali quali il Neodimio.

Capitolo 5

Il riciclaggio delle terre rare

Il forte aumento dei prezzi delle terre rare nel 2010, il bisogno di copertura da eventuali carenze di approvvigionamento e le restrizioni alle esportazioni cinesi, hanno posto il problema del riciclaggio delle terre rare in tutto il mondo.

Lo scopo di questo capitolo consiste nella valutazione dello sviluppo di una nuova strategia europea (e mondiale) che miri al raggiungimento di una sostenibilità economica delle terre rare a minor impatto ambientale possibile.

A questo punto, dopo aver trattato la sostituzione e l'utilizzo efficiente delle terre rare, ci soffermiamo sul riciclaggio di quest'ultime.

5.1 Stato attuale delle attività di riciclaggio

Allo stato attuale, sono scarse le attività industriali che mirano al riciclaggio delle terre rare. Fino ad ora, non si è potuto di certo contare su un riciclaggio su larga scala proveniente da magneti, batterie e altri dispositivi.

Principalmente, i processi di riciclaggio sono piuttosto complessi ed estesi con l'ulteriore aggiunta della necessità di trattamenti di tipo chimico e fisico. Si riesce ad intuire allora come molte di queste procedure, abbiano un dispendio energetico non indifferente; senza tralasciare il fatto che per tutte le attività post-consumo (ad esempio il riciclaggio di terre rare provenienti da motori elettrici, Hard disk e altri componenti elettronici), si necessita di una fase di demolizione di entità non trascurabile. Sono quindi stati identificati parecchi vincoli per un più ampio riciclaggio delle terre rare, quali ad esempio l'esigenza della creazione di un sistema efficiente di raccolta e l'abbattimento dei prezzi delle varie filiere.

Il riciclaggio delle terre rare presenta parecchi vantaggi rispetto all'utilizzo delle risorse primarie:

- L'Europa è una delle responsabili maggiori del largo consumo di terre rare, il che significa che vi sono grosse quantità di rifiuti provenienti da prodotti finiti contenenti terre rare. Queste "preziose risorse", possono essere sicuramente restituite al processo industriale per un possibile riutilizzo.
- La dipendenza da risorse straniere, può essere notevolmente ridotta rifornendo il mercato europeo di terre rare "secondarie".
- A parte alcune specifiche industrie ed applicazioni, il know-how nella lavorazione delle terre rare in Europa è molto scarso. La formazione di know-how permetterà di ampliare le competenze delle imprese e delle istituzioni scientifiche in Europa in merito alla trasformazione di questi materiali.
- Il trattamento di terre rare di tipo secondario (cioè precedentemente estratte e utilizzate) è esente da impurità radioattive mentre sappiamo che il trattamento e l'ulteriore estrazione di terre rare di tipo primario, coinvolge nella maggior parte dei casi radiazioni di tipo nucleare dovute ad elementi situati nei depositi naturali.
- I processi di riciclaggio richiedono sicuramente la presenza rilevante di specifici vettori energetici e prodotti chimici. D'altra parte però si potrà contare comunque su di un notevole risparmio energetico (che comprende quindi minori emissioni) rispetto alla catena di trasformazione primaria. E' prevedibile quindi che la maggior parte dei processi di

riciclaggio, possano rappresentare un beneficio netto per quanto riguarda le emissioni atmosferiche, la protezione delle acque sotterranee e la protezione climatica.

5.2 Riciclaggio di terre rare da magneti

Si sono svolte attività di ricerca per quanto riguarda il riciclo pre-consumo e post-consumo sia in Cina che in altri paesi.

Un aspetto importante riguarda sicuramente il possibile riciclaggio della grande quantità rappresentata da scarti di materiale magnetico, non solo dopo il consumo, ma già nella fase di produzione.

Si stima infatti che circa il 20 – 30 % del materiale magnetico proveniente da terre rare, venga demolito nella fase di lavorazione. Tuttavia, il recupero di scarti da produzione non si è ancora affermato, ma è comunque possibile far riferimento ad alcune tecnologie:

- Ri-fusione del rottame e successivo recupero ad uno stato non ossidato. Il rendimento dovrebbe comunque essere abbastanza basso.
- Il recupero della terra rara allo stato di ossido. Tuttavia le prestazioni delle terre rare allo stato di ossido, sono molto inferiori a quelle delle terre rare allo stato metallico.
- Riutilizzo dei materiali magnetici per i nuovi magneti senza una separazione effettiva di materiale.
- Estrazione selettiva di Nd e Dy direttamente da rottami di magneti utilizzando cloruro di magnesio fuso come agente di estrazione selettiva. Esami di laboratorio sono state condotte in Giappone, con temperature intorno ai 1.000 ° C

Vi è inoltre in Cina una serie di studi che affermano un possibile recupero di terre rare da rottami e rifiuti di magneti al Neodimio. E' stato scoperto ad esempio che l'ossido di Disprosio (Dy_2O_3) può essere recuperato con un'efficienza che tocca il 99%.

Un'altra aspettativa importante è data dalla possibilità di recupero del Neodimio da rifiuti generati durante la fabbricazione di magneti e quindi la successiva separazione delle terre rare per esempio da leghe quali Nd-Fe-B. Per il raggiungimento di questo obiettivo, ci si basa sul concetto che i metalli delle terre rare assorbono elevate quantità di idrogeno formando una buona parte di idruri¹⁴. L'assorbimento di idrogeno durante la formazione dell'idruro, ha come risultato un'elevata espansione nel reticolo della terra rara. Questa reazione, sarebbe in grado di causare nei magneti di scarto industriale la separazione del ferro e del boro dall'idruro di Neodimio.

Una volta raggiunta la separazione dell'idruro di Neodimio, l'elevata temperatura di dissociazione dell'idruro, sarà in grado di riprodurre il metallo.

Piani di ricerca sono in corso in Giappone per quanto riguarda il riciclo post-consumo da motori, generatori ed altri dispositivi che includono magneti permanenti.

Si può citare ad esempio come la Hitachi, abbia in progettazione una macchina per la demolizione di magneti al Neodimio da Hard Disk e compressori con una capacità di 100 magneti per ora, velocità 8 volte superiore alla normale lavorazione manuale. Il processo di utilizzo avrà inizio nel 2013.

¹⁴ Composti dell'idrogeno con elementi a carattere metallico e non metallico.

5.3 Riciclaggio di terre rare da batterie

Un'interessante applicazione di questi metalli, è data dall'utilizzo nelle batterie ricaricabili per auto elettriche ed ibride.

La giapponese JOGMEC's Metals Mining Technology Group, ha creato una tecnologia di recupero di metalli quali Lantanio e Cerio dalle batterie Ni-MH in disuso utilizzate nei veicoli ibridi, allo scopo di affinare le parti recuperate per il riutilizzo in nuove batterie. Gli elettrodi vengono prima trattati con un processo di raffinazione, e successivamente avviene la fase di separazione.

Utile inoltre citare lo sviluppo di una nuova tecnologia tedesca che si basa sul recupero di terre rare dalle scorie derivanti da un trattamento pirometallurgico che coinvolge le batterie Ni-MH in disuso e una ricerca cinese sul recupero di nichel, cobalto e alcune terre rare (Lantanio, Cerio, Neodimio e Praseodimio), tramite un processo di dissoluzione che prevede l'utilizzo di acido solforico.

5.4 Riciclaggio di terre rare da dispositivi di illuminazione

Alcune attività di ricerca e nuovi brevetti, si occupano del riciclaggio che può coinvolgere questo tipo di dispositivi nel periodo post-consumo. Esse possono essere sintetizzate in:

- L'OSRAM detiene un brevetto sul riciclaggio di Itrio ed Europio da lampade a scarica e lampade a fluorescenza.
- Attività che si concentrano sul recupero di Itrio ed Europio non solo da lampade ma anche da televisori a tubo catodico e monitor di computers.
- Alcune pubblicazioni cinesi, forniscono una panoramica scientifica sui metodi di recupero possibili per il riciclaggio di polveri fluorescenti contenenti Itrio, Europio, Lantanio e Cerio.

5.5 Riciclaggio di terre rare provenienti dai catalizzatori

Il riciclaggio di terre rare da catalizzatori esausti, non è un processo molto comune. Fonti del 2001 dicono che la maggior parte di catalizzatori FCC esausti derivanti da processi di cracking catalitico nelle raffinerie di petrolio della Germania, sono stati completamente utilizzati come additivi del cemento il che mette in evidenza come il recupero di terre rare (soprattutto Lantanio) da catalizzatori, non fosse stato all'epoca un problema rilevante.

La questione rappresenta però ora un'opportunità che potrebbe rivelarsi economicamente molto interessante nei prossimi anni ma questo dipenderà in maniera particolare solo dallo sviluppo del prezzo del Lantanio.

Da un punto di vista tecnico, il grande flusso globale di catalizzatori FCC utilizzati (600000 tonnellate annue) contenenti circa il 2% in terre rare, potrebbe rappresentare interessanti potenzialità per il riciclo da questo tipo di applicazioni.

Tuttavia lo sviluppo di una soluzione tecnicamente valida in questo campo è in via di studio e valutazione, rappresentando un'opportunità solo in futuro.

Le attività di riciclo che riguardano invece i catalizzatori per auto, sposta l'attenzione sul recupero di materiali facenti parte del gruppo del platino e quindi sono poco interessanti dal punto di vista delle terre rare.

5.6 Riciclaggio di terre rare provenienti da altre applicazioni

Oltre alle applicazioni precedenti è possibile mettere in rilievo alcune interessanti alternative derivanti dall'utilizzo di ferrosilicio e da scarti della produzione di alluminio. Esse sono:

- Recupero di terre rare da rifiuti solidi generati dalla produzione di alluminio che prendono il nome di fanghi rossi. Si ha in primo luogo una cottura dei fanghi e successivamente, le terre rare vengono trattate con acido cloridrico; ossido di scandio ed altre terre rare vengono poi separate dalla parte liquida.
- La società giapponese Kosaka Smelting and Refining, cerca di sviluppare metodi per il recupero di terre rare quali Neodimio e Disprosio da rifiuti elettronici.

5.7 Sfide per un efficiente riciclaggio delle terre rare

Le analisi fin qui svolte, mettono in evidenza e vogliono ribadire come sia effettivamente scarsa la presenza di tecnologie e di impianti di riciclaggio. Ad esempio, le pubblicazioni della US Geological Survey¹⁵ al 2010, menziona solamente riciclaggio di terre rare da piccole quantità di rottame magnetico contenente Neodimio, Praseodimio e Disprosio oltre a piccole quantità di Ittrio proveniente da applicazioni laser.

Inoltre, non si fa alcun riferimento a processi industriali di riciclo in corso per il recupero da batterie Ni-MH contenenti Lantanio, Cerio, Neodimio e Praseodimio.

Allo stato attuale possiamo dire che solamente il Giappone ha intrapreso una seria politica di ricerca nel campo del riciclo di questi metalli e i risultati pongono l'attenzione su una potenziale serie di processi di estrazione che non possono essere commercialmente sviluppati a causa di inconvenienti sui rendimenti e sui costi.

Prospettive interessanti sembrano venire da particolari trattamenti con metalli liquidi ma in ogni caso, si attendono potenziali sviluppi futuri.

Ricerche condotte da Öko-Institut¹⁶ affermano che alcune attività industriali di riciclo sono in fase di attuazione. In particolare nelle ultime pubblicazioni, vengono messi in evidenza i seguenti schemi:

- Recupero da fanghi prodotti da lavorazione e macinazione di leghe magnetiche in Giappone.
- Riciclo di Ittrio (anche se per piccoli quantitativi) proveniente principalmente da cristalli laser e granati sintetici.
- Riutilizzo di magneti provenienti da dispositivi per risonanze magnetiche.

¹⁵ United States Geological Survey (USGS) è un'agenzia scientifica del governo degli Stati Uniti che ne studia il territorio, le sue risorse e i rischi naturali che lo minacciano.

¹⁶ Associazione senza fini di lucro operante anche a livello internazionale interessata a dare il proprio contributo per uno sviluppo sostenibile.

Una delle più grandi sfide per l'affermazione di un'economia competitiva nel campo delle terre rare, è comunque rappresentata dal riciclaggio nel settore dei magneti in quanto applicazione più importante e con le peggiori aspettative dovute alla carenza di fornitura.

Per vincere questa sfida, si dovrà essere in grado di superare i seguenti vincoli:

- Il trasporto di materiale magnetico è molto restrittivo in quanto il campo magnetico potrebbe andare ad interferire ad esempio con la strumentazione necessaria per un trasporto aeromobile. Questo quindi richiederebbe una pre-smagnetizzazione prima del trasporto aereo o in alternativa altre modalità di trasporto comunque meno semplici da implementare.
- Una buona quantità di magneti provenienti da terre rare, viene utilizzata in motori e Hard Disk. In questo caso un possibile riciclo, è accompagnato da una fase intensiva di pre-demolizione date le modeste dimensioni delle parti magnetiche. Si necessita inoltre di una fase di smagnetizzazione prima che le parti in ferro possano essere separate. Se il magnete fosse immerso in strutture plastiche, si avrebbe la necessità di altro lavoro supplementare.
- Rottami elettronici vengono spesso riciclati in impianti piro-metallurgici. Molti metalli possono essere tranquillamente recuperati ma le terre rare vengono perse man mano che diventano una parte delle scorie, risultando così irrecuperabili.

Vincoli generali per un riciclo delle terre rare in campi di applicazione più vasti, sono rappresentati invece da:

- L'implementazione di un efficiente sistema di raccolta.
- Alcuni beni post-consumo quali veicoli in disuso o rottami elettronici, vengono esportati in paesi in via di sviluppo. Questi beni, che potrebbero rappresentare delle importanti risorse per il riciclo, non saranno quindi facilmente disponibili.
- Fino ad oggi il prezzo delle terre rare è comunque rimasto troppo basso affinché un processo economicamente vantaggioso di riciclo sia implementabile, in particolar modo se si considerano il complesso di demolizione, i processi di trattamento e la richiesta energetica troppo onerosa. Al momento, neanche l'aumento dei prezzi causati dalle restrizioni delle esportazioni cinesi garantisce una stabilità a lungo termine che rappresenterebbe una condizione necessaria pre-riciclo.
- Ci vorrà un lungo periodo di tempo prima che molti dei dispositivi contenenti magneti a terre rare terminino il loro ciclo di vita, in particolar modo per le macchine elettriche rotanti presenti nei veicoli e per le turbine eoliche.

5.8 Sviluppo di uno schema di riciclaggio

Lo sviluppo e l'implementazione di uno schema per il riciclaggio sono operazioni che potrebbero richiedere qualche anno.

Solo nel momento in cui, una **grossa quantità** di prodotti e dispositivi contenenti terre rare appena entrate in utilizzo, avrà terminato il proprio ciclo di vita, sarà possibile pensare di poter attuare strategie di riciclo.

La Fig.5.1 fornisce una panoramica generale dei passi attraverso i quali viene costituito uno schema di riciclaggio europeo e di seguito la descrizione dei vari steps [7].

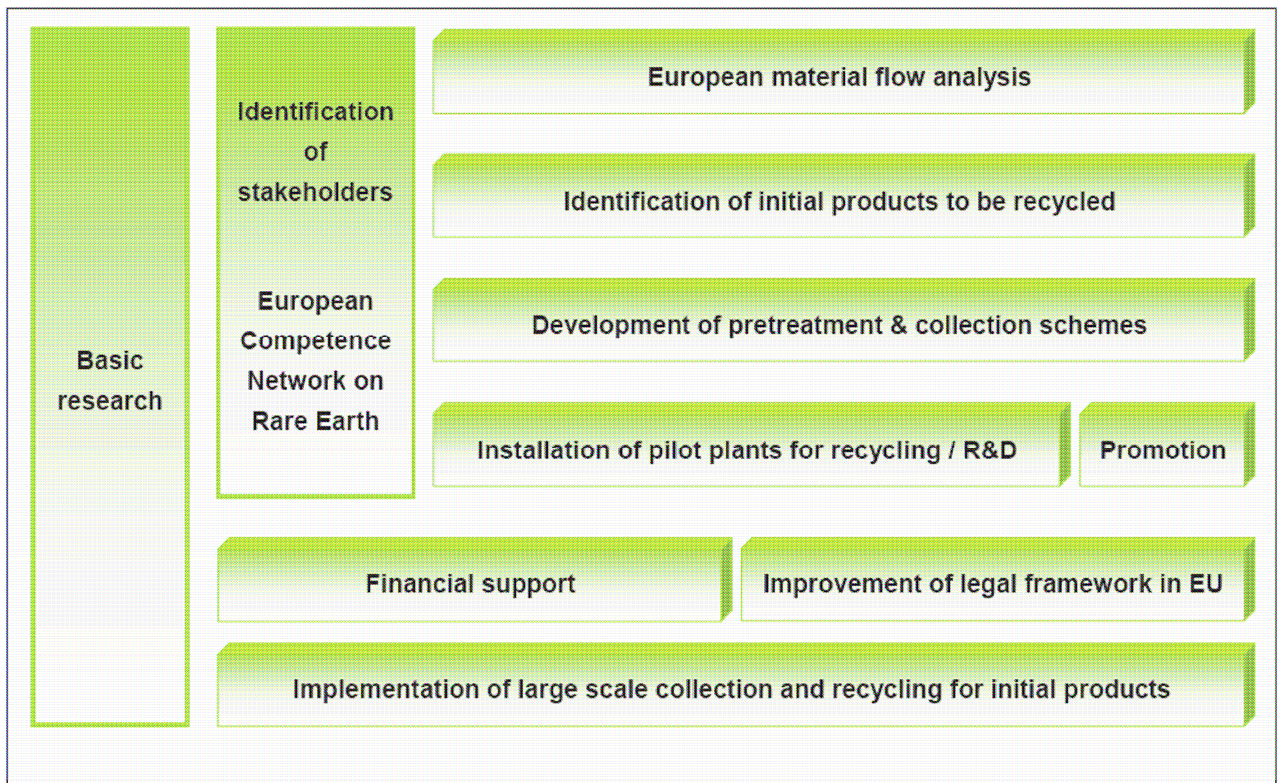


Fig. 5.1 *Ipotesi di procedura a livello europeo di riciclo delle terre rare.*

- **Ricerca di base sul trattamento delle terre rare:** a causa del fatto che non vi è estrazione nel suolo europeo e che solo pochissime aziende sono coinvolte in un processo di raffinazione, è necessaria una maggiore ricerca di base nel campo della lavorazione. Questi tipi di conoscenze potrebbero essere necessarie per stabilire una sempre maggior indipendenza dalle competenze giapponesi e cinesi. Attualmente gli Stati Uniti stanno pianificando di sviluppare una grossa base di formazione, in modo tale da poter essere in grado di elaborare terre rare provenienti dalla riapertura del giacimento di Mountain Pass nel 2012. Il primo passo dunque, per accrescere le conoscenze, è quello di identificare dettagliatamente il gap di conoscenza e di competenza europee con i paesi stranieri e le lacune in materia di elaborazione di questi metalli.
- **Rete di competenza europea nel campo delle terre rare:** una rete europea che comprenda tutte le parti interessate, in tutti i livelli di competenza, viene ritenuta indispensabile per lo sviluppo di uno schema in materia di riciclaggio. Tutti i soggetti rilevanti quali riciclatori, produttori, enti pubblici, politici e ricercatori, devono poter essere messi in relazione tra di loro. Una simile rete di competenze già esiste; un esempio è il Dutch Materials Innovation Institute in grado di gestire il rapporto pubblico-privato tra industria, istituti di ricerca e governo dei Paesi Bassi.
- **Analisi del flusso europeo di materiale:** l'obiettivo principale di un'analisi di questo tipo, è quello di colmare eventuali lacune e di acquisire una più ampia gamma di dati per una maggiore competenza europea in materia di terre rare. Quello che è emerso dai paragrafi precedenti di questo capitolo, è la scarsa disponibilità di dati e riferimenti in questo campo e soprattutto, che essi si affiancano ad applicazioni e processi molto giovani. La situazione

riguardante i dati sui flussi di terre rare, deve quindi essere migliorata sia in Europa che nel resto del mondo in un futuro abbastanza prossimo.

Ciò rappresenta un punto critico per l'instaurazione di un'economia sostenibile, ma anche un punto di partenza per accrescere le conoscenze necessarie a favorire un percorso, in termini di riciclaggio e utilizzo efficiente delle terre rare. Potremmo quindi evidenziare due punti focali d'analisi:

- i. Un primo step di identificazione dei principali produttori e attori in una catena di lavorazione.
- ii. Un secondo step di identificazione del flusso principale di materiale e la stima della quantità di terre rare che potrà essere estratta tramite riciclaggio.

➤ **Identificazione del prodotto iniziale:** il prossimo passo sarà quindi l'identificazione del prodotto iniziale costituito per la maggior parte da elementi di scarto e rifiuti. Sulla base delle conoscenze attuali, a livello pre-consumo, potremo contare sulla generazione di rifiuti provenienti da attività come:

- i. Rifiuti derivanti dalla produzione di magneti
- ii. Rifiuti derivanti dall'industria dell'illuminazione
- iii. Polveri di lucidatura industriali
- iv. Rifiuti derivanti da processi di lavorazione di terre rare
- v. Rifiuti derivanti dalla produzione di dispositivi elettronici

In termini quantitativi, i rifiuti post-consumo rappresentano una quota molto più rilevante. I prodotti che, una volta terminato il loro ciclo di vita, potrebbero rivelarsi adeguati, sono:

- i. Magneti derivanti da motori elettrici e generatori (provenienti da impianti eolici, veicoli ibridi e veicoli elettrici)
- ii. Lampade fluorescenti
- iii. Displays (plasma e LCD)
- iv. Catalizzatori industriali e per autoveicoli

➤ **Sviluppo di sistemi di raccolta e pretrattamento:** sulla base delle conoscenze raccolte dalle analisi dei flussi di materiale e successivamente alla selezione del prodotto iniziale, il prossimo passaggio prevederà la creazione di un sistema di raccolta e pretrattamento. Il trattamento di una grossa quantità di rifiuti contenenti terre rare, è già regolato da linee guida come la WEEE Directive¹⁷ e la ELV Directive¹⁸.

¹⁷ Waste Electrical and Electronic Equipment Directive: Direttiva sui rifiuti di apparecchiature elettriche ed elettroniche

¹⁸ End of Life Vehicle Directive: Direttiva sulla riduzione del quantitativo di rottami automobilistici

Tuttavia non esistono ancora norme specifiche; i requisiti specifici per lo sviluppo di sistemi di raccolta di rifiuti contenenti terre rare, devono quindi essere integrati in strutture già implementate. Un altro aspetto consiste nella richiesta di pretrattamento. Si pensi ad esempio alla già citata smagnetizzazione richiesta dai magneti prima del loro trasporto o alla scarica totale richiesta dalle batterie.

- **Sviluppo di impianti pilota:** i progetti di ricerca e sviluppo su larga scala, prevedono la realizzazione di impianti pilota allo scopo di individuare in modo appropriato i complessi processi chimici e le sofisticate attrezzature necessarie che stanno alla base di tutto il sistema di riciclaggio.

- **Questioni di tipo finanziario:** gli investimenti in impianti di questo tipo, possono presentare le seguenti problematiche:
 - i. La maggior parte degli impianti richiederà onerosi investimenti a lungo termine a causa della complessità delle tecnologie richieste.
 - ii. Vi è un gran numero di progetti che presentano incertezze circa la loro realizzazione.
 - iii. Grande incertezza riguardo allo sviluppo futuro dei prezzi. Disporre di dati affidabili sulla domanda e sulla situazione dell'approvvigionamento non è cosa semplice.
 - iv. Da non trascurare inoltre il fatto che le riserve di terre rare di alcune società e nazioni, sono sconosciute e che le speculazioni sui prezzi, potrebbero causare turbolenze sui mercati commerciali.

Risulta perciò di fondamentale importanza valutare come si possano ridurre al minimo i rischi per gli investitori.

- **Quadro normativo:** un sistema di riciclaggio delle terre rare non richiede solamente requisiti logistici e tecnici, ma anche un appropriato quadro normativo. Il primo obiettivo di questo step, sarà quello di individuare i settori in cui la raccolta e il trattamento sono già regolamentati e i settori che ne sono privi, come ad esempio quello delle turbine eoliche. Successivamente si andrà ad adattare il quadro giuridico dell'Unione europea al fine di ottimizzare il riciclaggio delle terre rare post-consumo affrontando specifiche questioni e problematiche.

- **Implementazione su larga scala:** l'ultimo passo consiste nell'implementazione su larga scala dei sistemi di riciclaggio sviluppati per specifici prodotti iniziali. Questo step, non comprende solamente l'inizio della raccolta delle terre rare, il pretrattamento e il loro riciclo, ma anche il monitoraggio delle prestazioni, l'ottimizzazione e le prospettive di ampliamento di attuali programmi di riciclo. Per una maggiore diffusione, potrebbero inoltre essere considerati l'esportazione di tecnologie di riciclaggio e lo sviluppo di una più ampia gamma di prodotti.

5.9 Esempio di una tecnologia di riciclaggio

Lo sviluppo di una tecnologia concreta per il riciclaggio dei magneti al Neodimio, è attualmente in fase di studio e progettazione.

Attualmente la Hitachi, offre un gran numero di prodotti contenenti proprio magneti al Neodimio, inclusi dispositivi per risonanze magnetiche, Hard Disk drive e compressori utilizzati per la refrigerazione e il condizionamento d'aria.

Vogliamo ora quindi descrivere lo stato dello sviluppo¹⁹ di una tecnologia di riciclaggio proveniente dalla casa giapponese, destinata ad esempio all'utilizzo con HDD e compressori per aria condizionata. Ci si augura perciò che questo tipo di struttura, possa costituire in futuro una delle misure per far fronte alle preoccupazioni riguardo alle carenze di approvvigionamento di terre rare quali il Neodimio [3].

Macchina per demolizione di compressori

Sebbene i compressori provengano da materiali che sono relativamente facili da riciclare (inclusi rame e ferro), a causa del fatto che l'ossatura principale è saldata insieme a parti in acciaio (Fig. 5.2), il metodo principale per accedere alle parti magnetiche interne interessate è quella del taglio al plasma.

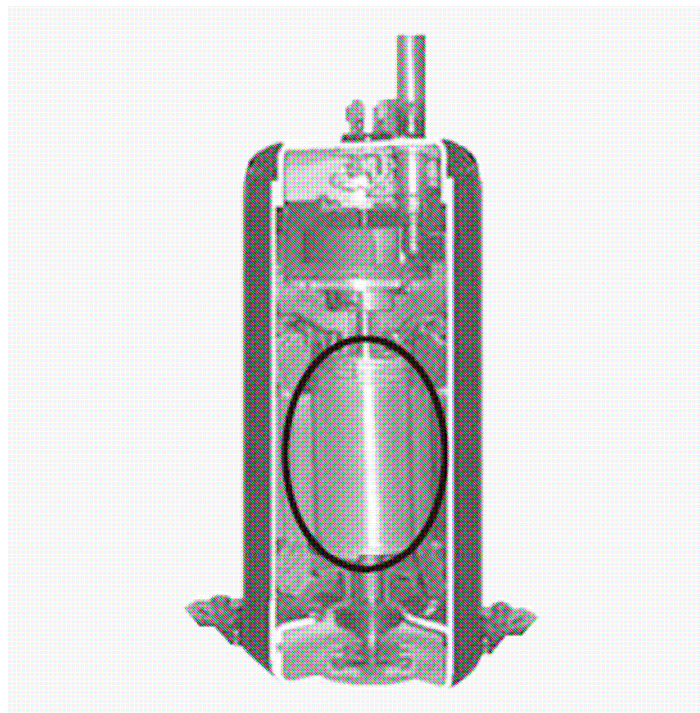


Fig.5.2 Struttura interna di un compressore con in evidenza la parte rotorica.

¹⁹ Esso non ci permette sicuramente di proporre una descrizione dettagliata dei sistemi adottati, bensì una semplice panoramica dovuta al fatto che l'effettiva partenza avverrà nel 2013.

Tuttavia il problema di questo metodo, è rappresentato dalla parte in olio residua all'interno del compressore che può facilmente prendere fuoco o produrre fumi.

In risposta a questo, è in fase di sviluppo un processo di demolizione dei compressori che riesce a risolvere questo problema oltre che a permetterne il recupero dei magneti al Neodimio.

Inoltre, dato che vi sono due tipi di compressori, a pistone e rotativi e che ognuno dei due viene lavorato in maniera differente, è necessaria una macchina in grado di gestirli entrambi.

Quindi una caratteristica fondamentale della macchina in via di sviluppo, è proprio quella che essa va a risolvere queste problematiche permettendo inoltre all'operatore di effettuare il taglio e l'estrazione del materiale interessato in modalità automatica (Fig.5.3).



Fig.5.3 Macchina che consente l'estrazione automatica

Dato che i magneti sono incorporati nel rotore, parte rotante al centro del compressore, in ultimo luogo si avrà l'operazione di estrazione e recupero magneti. La Fig.5.4 mostra il rotore e i magneti prima e dopo la rimozione.

A causa della differenza delle modalità di inserzione dei magneti, sono in studio delle operazioni standard di estrazione della parte magnetica che risultino economiche per qualsiasi modello.

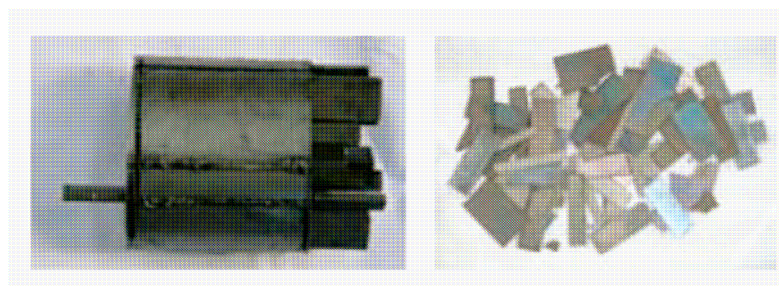


Fig.5.4 Recupero di magneti dal rotore

Macchina per demolizione di Hard Disk Drive

Anche prendendo in considerazione gli HDD, avremo a che fare con materiali relativamente facili da riciclare (inclusi alluminio e ferro), ma a causa della non trascurabile quantità di viti utilizzate in fase di assemblaggio, risulta difficile separare la parte magnetica dal resto dei componenti.

Possiamo dire che, a causa dei costi di demolizione manuali, per quanto riguarda gli HDD, sono stati stabiliti target che prevedono tempi medi di demolizione non superiori a un minuto per pezzo. Inoltre a causa della locazione, della quantità e di altri aspetti legati alle viti utilizzate nell'assemblaggio, variabili a seconda del produttore e dell'anno di produzione, è stato implementato un metodo che non prevede l'allentamento delle viti una ad una, ma che servendosi di shock meccanici e tecniche di vibrazione, riesce anche a separare le parti volute con particolare attenzione ai componenti magnetici utili a un possibile post trattamento di riciclo (Fig.5.5).

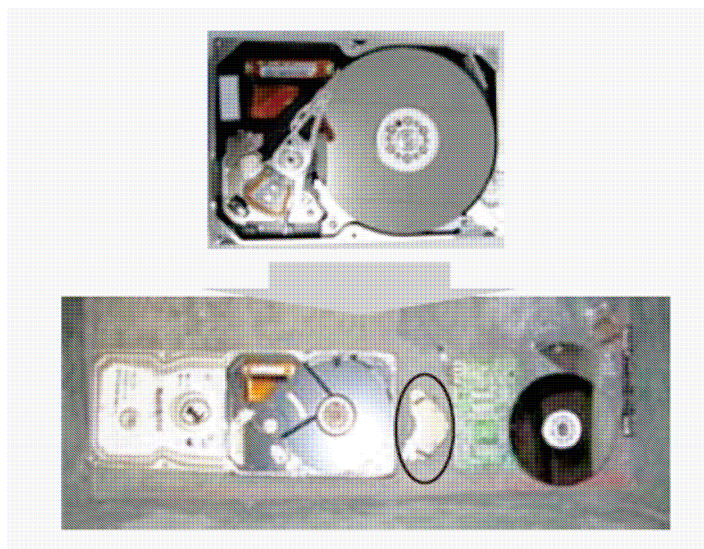


Fig.5.5 Risultato della demolizione di un HDD con in evidenza la parte magnetica al neodimio

Tecnologia per la rigenerazione di magneti

In parallelo allo sviluppo di macchine per la rimozione e il recupero di magneti da compressori, HDD e altri dispositivi, la Hitachi sta investendo inoltre in tecnologie per la rigenerazione di magneti.

A causa del fatto che i classici metodi quali ad esempio l'estrazione tramite solventi, producono rifiuti liquidi e altri tipi di inquinanti, sono richiesti accorgimenti in materia di costi e di impatto ambientale.

A fronte di questo la Hitachi sta sviluppando un processo a scarso impatto ambientale che ha come scopo la selettiva separazione e il recupero di terre rare quali Neodimio e Disprosio con un alto livello d'efficienza. Esperimenti rivelano come si possa approssimativamente recuperare il 95% di terre rare provenienti da rottami magnetici.

E' previsto che in futuro questi processi possano essere utilizzati in piccoli impianti urbani per riottenere un'importante quantità di terre rare lavorando solamente su scarti e rifiuti magnetici.

Conclusioni

In questo elaborato, si è cercato in primo luogo di far chiarezza sulla problematica riguardante il monopolio cinese delle terre rare fissando quindi le idee sulle cifre più significative in gioco nel mercato mondiale, e, successivamente, di descrivere una serie di alternative che non costituissero un degrado prestazionale rispetto agli apprezzabili minerali in questione.

Nel 1992 Deng Xiaoping, il padre della moderna Cina, aveva osservato che se il Medio Oriente ha il petrolio, la Cina dispone delle terre rare, che possono diventare il “petrolio del XXI secolo”.

Negli ultimi anni infatti questi materiali, stanno assumendo grande importanza commerciale e industriale per la produzione di magneti permanenti, di componenti dei televisori, dei telefoni cellulari, ecc...

Secondo le stime disponibili, sebbene la Cina produca il 97% delle terre rare a livello mondiale, le riserve cinesi di questi minerali rappresentano il 38% del totale mondiale. La Cina cerca quindi di non provocare un rapido esaurimento delle sue riserve.

Inoltre Pechino, approfittando delle sue imponenti risorse finanziarie, sta addirittura cercando di acquistare delle miniere straniere, ancora inutilizzate o poco sfruttate.

Dall'altro lato abbiamo invece una serie di Paesi protagonisti a livello mondiale nel mercato delle terre rare, che si vedono costretti a cambiare le proprie strategie proprio a causa dell'importanza commerciale di questi materiali e del largo utilizzo a livello industriale.

Allo stato attuale, risulta arduo (ma non impossibile) far riferimento ad iniziative che mirino ad un totale rimpiazzo di terre rare da parte di altri materiali meno costosi e il cui approvvigionamento non costituisca fonte di preoccupazioni. A rafforzare queste iniziative vi è la possibilità operare tramite approcci alternativi al pregetto dei prodotti e delle applicazioni in modo tale da ricavarne un utilizzo più efficiente.

Risulta ovvio quindi andare a focalizzare le ricerche nei settori in cui la crisi ha un impatto maggiore e cioè ad esempio nel campo dei magneti, che costituiscono una buona fetta della domanda economica mondiale di terre rare in quanto si collocano in applicazioni tipo motori e generatori elettrici per macchine ibride, turbine eoliche ecc...

Le scelte migliori e più redditizie ricadono nei settori appena citati in cui, oltre a poter contare su diverse opportunità di sostituzione, si può far riferimento a tecniche che prevedono l'utilizzo di altri tipi di materiali molto più economici (come le ferriti), a patto che vengano anche in questo caso modificati il design e la struttura dei dispositivi, al fine di ottenere quantomeno le stesse prestazioni dei casi precedenti.

Qualora queste iniziative non fossero sufficienti a risolvere le molteplici problematiche legate al monopolio, si spera di poter contare nei prossimi anni su valide tecnologie di riciclaggio, promosse ormai già da tempo per altri tipi di materiali. Attualmente si sta cercando comunque di impostare e studiare la questione dal punto di vista organizzativo, in quanto non si è ancora del tutto sicuri che i costi dello sviluppo di una filiera di riciclaggio ripaghino le scelte intraprese.

Questo lavoro di tesi, vuole far riflettere sul fatto che la problematica riguardante il monopolio cinese è alquanto seria. Qualcosa però negli ultimi anni sta cambiando ed è proprio quello che si intuisce scorrendo i vari capitoli.

Questo elaborato infatti non vuole assolutamente costituire una risposta a tutte le questioni riguardanti la scarsità e il sovrapprezzo delle terre rare, bensì vuole rappresentare un monito per far far capire che le alternative ci sono, siano esse complicate (come nel caso della sostituzione totale), meno complicate (come nel caso delle ferriti che, al di là dei due esaustivi esempi che troviamo nel quarto capitolo, propone allo stato attuale la via migliore) o in fase attuale di sviluppo (come nel caso del riciclaggio).

Bibliografia

- [1] Takahiko Miura, Shinji Chino, Masatsugu Takemoto, Satoshi Ogasawara, Akira Chiba, Nobukazu Hoshi
A Ferrite Permanent Magnet Axial Gap Motor with Segmented Rotor Structure for the Next Generation Hybrid Vehicle
2010 XIX International Conference on Electrical Machines (ICEM)
- [2] Simon Walker
Breaking the rare-earth monopoly
Engineering & Mining Journal; Dec2010, Vol. 211 Issue 10, p46-53, 8p
- [3] Kenji Baba, Takeshi Nemoto, Haruko Maruyama, Noriaki Taketani, Katsuhisa Itayagoshi, Yuko Hirose
Hitachi's Involvement in Material Resource Recycling
Hitachi Review Vol. 59 (2010), No. 4, p180-187
- [4] Kenji Nakamura, Jun Yoshida, and Osamu Ichinokura
Outer-rotor type permanent magnet reluctance generator with high power and low torque ripple
IECON 2010 - 36th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics [1-4244-5225-2] Nakamura
anno:2010 pag:2248 –51
- [5] Walt Benecki
What Rare Earth Crisis?
Magnetics & Technology Magazine, Winter 2009
- [6] Vittorio Regis
I materiali della green economy: le terre rare
www.energheimagazine.it
- [7] Doris Schöler, Matthias Buchert, Ran Liu, Stefanie Dittrich, Cornelia Merz
Study on Rare Earths and Their Recycling
Öko-Institut
- [8] Ursula Kollenbach
Superconductors Solve Rare Earth Element Problem for Wind Power
- [9] Quddes M. R., Sekino M., Ohsaki H., Kashima N., Nagaya S.
Electromagnetic Design Study of Transverse Flux Enhanced Type Superconducting Wind Turbine Generators
Applied Superconductivity, IEEE Transactions on.; Volume: 21; pag.:1101 - 1104

