www.dii.unipd.it

Università degli Studi di Padova – Dipartimento di Ingegneria Industriale

Corso di Laurea in Ingegneria dell'Energia

Relazione per la prova finale «Recupero e riciclo di magneti permanenti utilizzati nei motori elettrici »

Tutor universitario: Prof. Fabrizio Dughiero

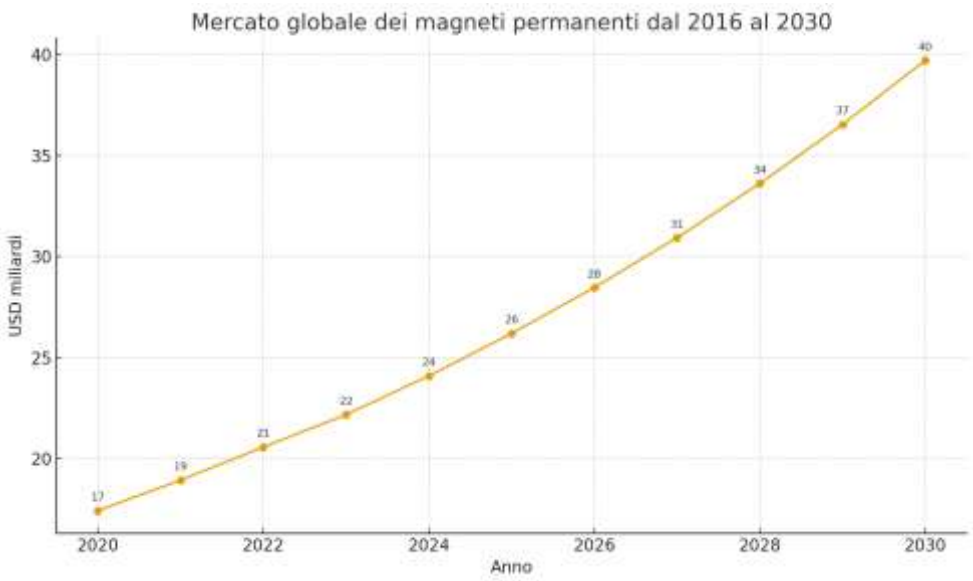
Laureando: *Meneghetti Filippo 2077942*

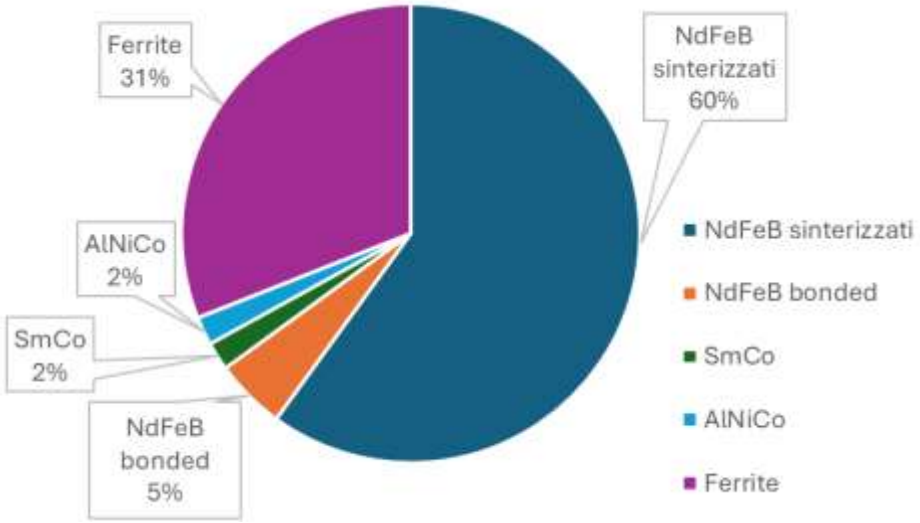
Padova, 26/09/2025

INTRODUZIONE

www.dii.unipd.it

Negli ultimi decenni la transizione verso un'economia più sostenibile, a basse emissioni di carbonio ha favorito una notevole diffusione dei motori elettrici, in particolare quelli a magneti permanenti. Il crescente utilizzo di questi motori ha comportato un progressivo aumento della domanda di magneti permanenti ad alte prestazioni.





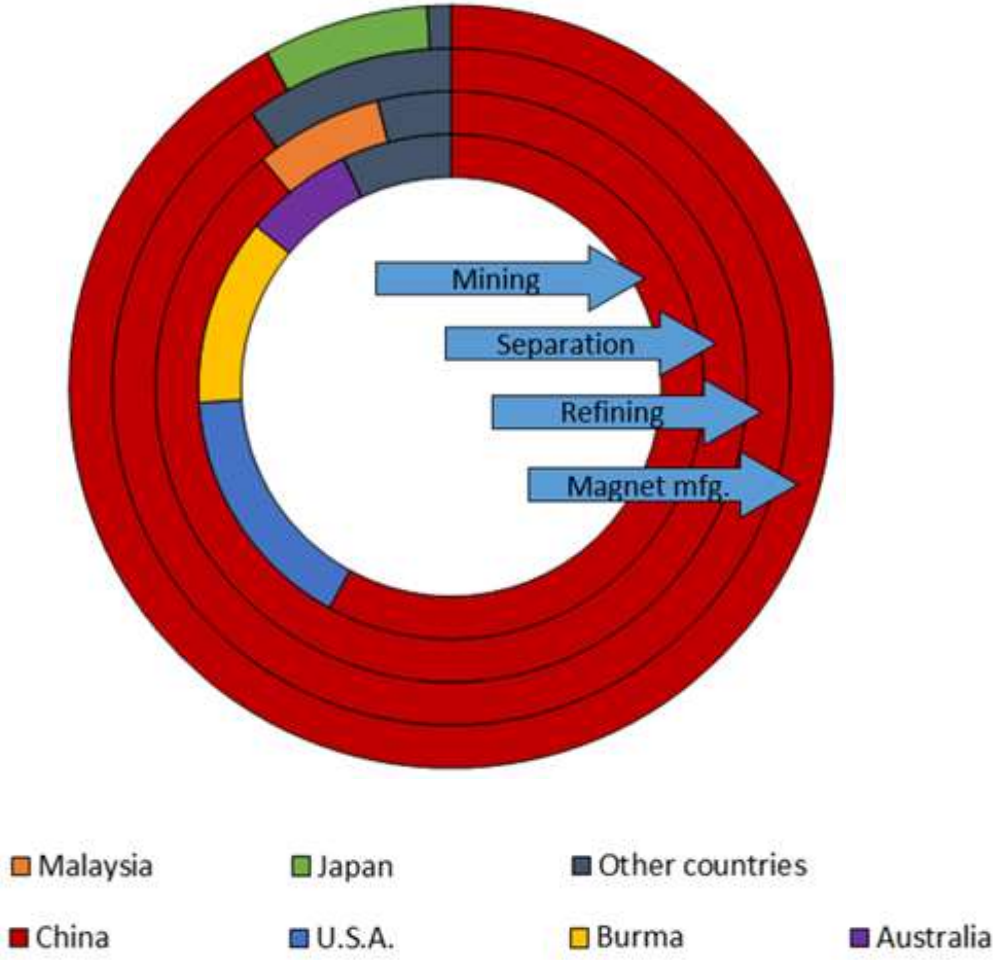
Tra le diverse tipologie di magneti permanenti, quelli realizzati con elementi delle terre rare, in particolare i magneti al neodimio-Ferro-Boro (NdFeB) e al samario-cobalto (SmCo), rappresentano le soluzioni più diffuse. Il grafico mette in evidenza la centralità dei magneti NdFeB nell'attuale scenario di mercato.

INTRODUZIONE

www.dii.unipd.it

La catena di fornitura dei magneti permanenti in terre rare presenta diverse criticità:

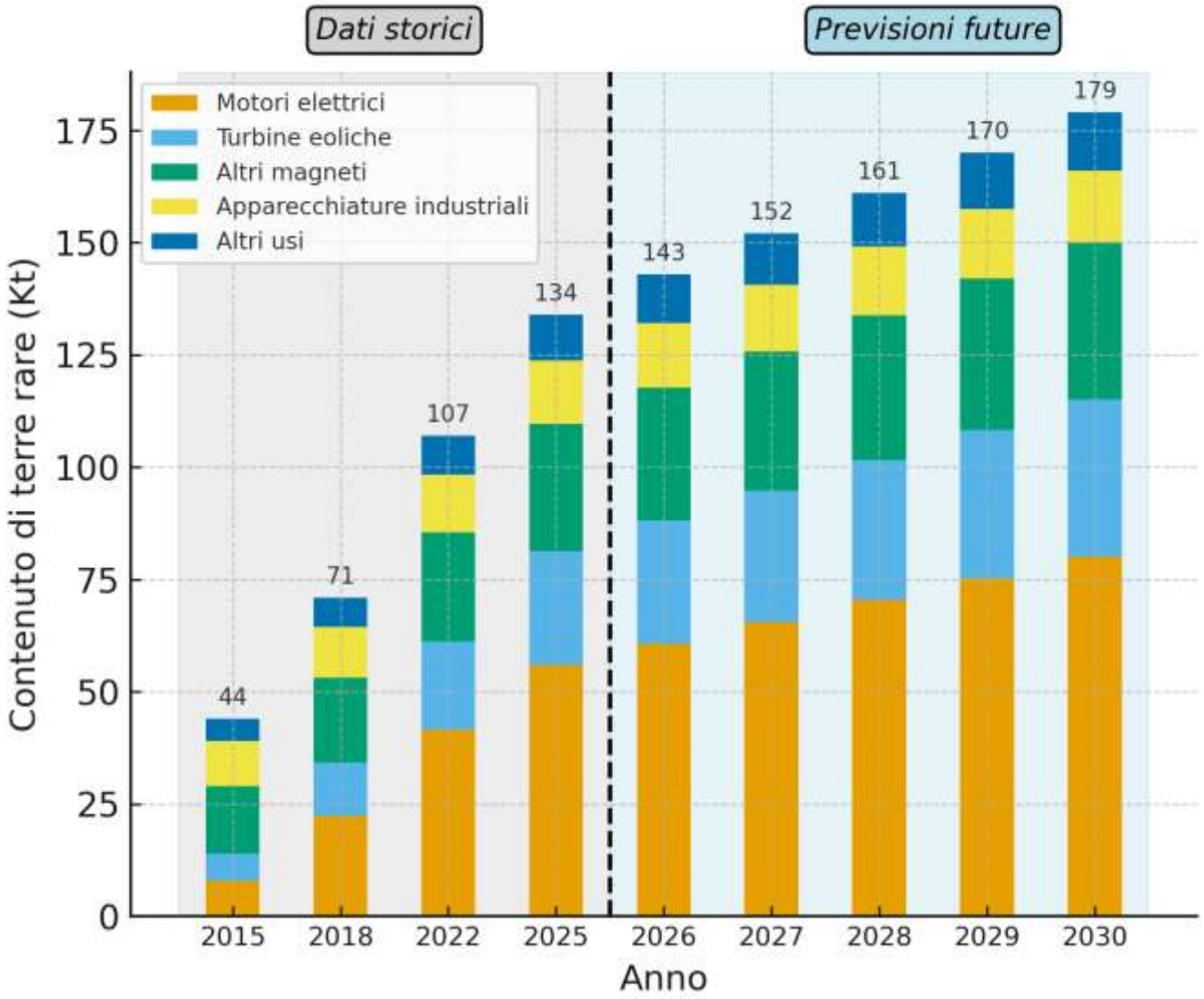
- Predominio della Cina in ogni segmento della produzione, favorito da giacimenti ad alto rendimento e da una strategia industriale di sostegno a investimenti e produzione su larga scala, il quale determina un'alta concentrazione geografica, un mercato poco competitivo ed una forte volatilità dei prezzi.
- Estrazione e lavorazione illegale delle terre rare, che immettono sul mercato metalli a prezzi altamente concorrenziali.
- Criticità ambientali dovute a processi di estrazione e lavorazione fortemente inquinanti.



OBIETTIVI DEL LAVORO

www.dii.unipd.it

In previsione di un costante aumento della domanda di elementi contenenti terre rare impiegati in magneti permanenti e date le notevoli fragilità a cui è soggetta la catena di approvvigionamento e la volatilità dei prezzi del mercato ad essa legati, il riciclo ed il recupero dei magneti permanenti contenenti terre rare svolge un ruolo strategico per ridurre la dipendenza dalle materie prime critiche e rendere l'intera produzione più ecosostenibile, consentendo di abbattere i costi energetici e ambientali legati ai processi estrattivi, favorendo un'economia più circolare ed efficiente.



TECNICHE DI RICICLO

www.dii.unipd.it

Le principali tecniche di riciclo possono essere classificate in tre categorie:

- Riutilizzo diretto
- Riciclo diretto
- Riciclo indiretto

RIUTILIZZO DIRETTO

www.dii.unipd.it

Nel riutilizzo diretto del magnete vengono mantenute invariate le proprietà del magnete, in quanto non vengono usati trattamenti chimici o termici che ne possano alterare la struttura molecolare. Sono presenti principalmente due strategie differenti di riutilizzo diretto:

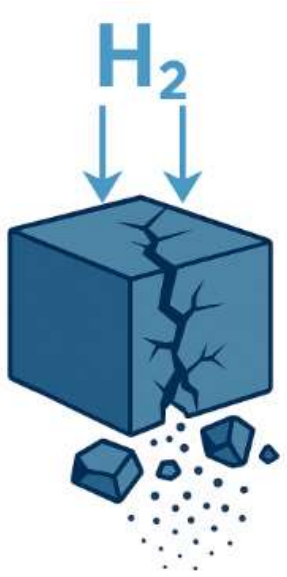
- Riutilizzo completo del magnete: prevede il riutilizzo del magnete nella sua forma originale
  - Strategia che comporta il minor costo economico e minor impatto ambientale
  - Il magnete estratto necessità di una forte compatibilità geometrica
  - Deve essere garantita integrità strutturale per non comprometterne le proprietà magnetiche

- Design «lego»: in questa tecnica il magnete una volta estratto viene suddiviso in piccoli segmenti standardizzarti, che mantengono le loro proprietà magnetiche, i quali in seguito verranno riassemblati mediante l'utilizzo di colle o adesivi.
  - Non richiede compatibilità geometrica
  - Necessita di notevoli quantità di colla e adesivi per mantenere incollati i segmenti
  - Deve essere garantita integrità strutturale per non comprometterne le proprietà magnetiche

RICICLO DIRETTO

www.dii.unipd.it

Se i magneti permanenti recuperati non presentano più l'integrità necessaria per essere riutilizzati direttamente, una valida alternativa è rappresentata dal riciclo diretto. In questo approccio si preserva, almeno in parte, la microstruttura originale del materiale. La tecnica di riciclo diretto più sviluppata è il trattamento con idrogeno:



- Trattamento con idrogeno (HD): in questo processo il magnete viene messo a contatto diretto con l'idrogeno, il quale provoca una frantumazione, smagnetizzazione e polverizzazione del magnete nel medesimo istante.
  - Basso consumo energetico
  - Elevata efficienza
  - Minore complessità impiantistica rispetto al riciclo indiretto
  - Basso impianto ambientale
  - Soluzione più promettente e industrializzabile

RICICLO INDIRETTO

www.dii.unipd.it

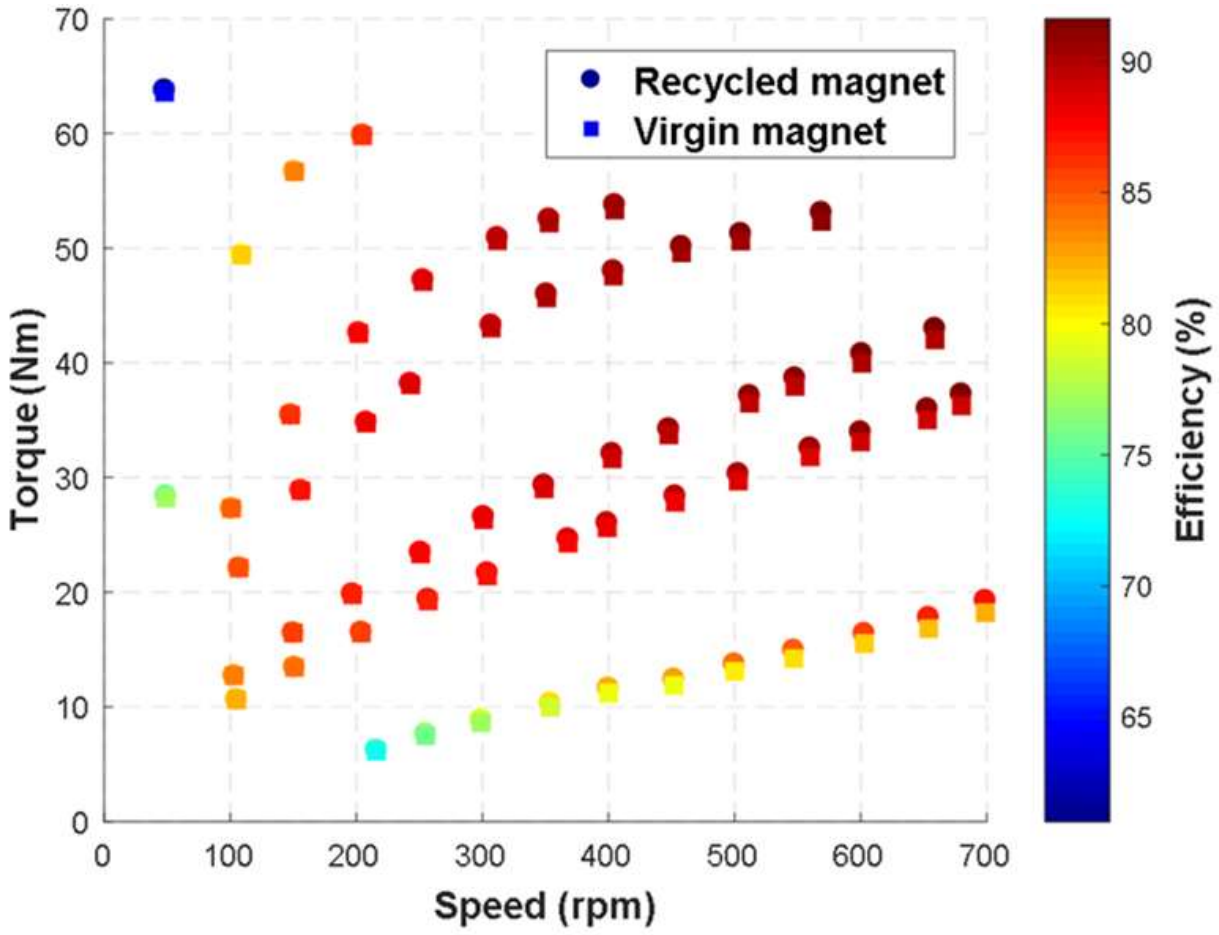
Il riciclo indiretto si basa sulla dissoluzione chimica e sulla separazione metallurgica dei singoli elementi che compongono il magnete, al fine del recupero delle sole terre rare in esso contenuto con un elevato grado di purezza.

- Processo pirometallurgico: questa strategia sfrutta le alte temperature per alterare lo stato chimico degli elementi dei magneti per facilitarne il recupero.
  - Rendimento di estrazione molto elevato
  - Consumi eccessivamente elevati
  - Necessità di gestire le emissioni e i rifiuti

- Processo idrometallurgico: questa strategia consiste nell'immersione in soluzioni acide o organiche di magneti esausti a fine vita.
  - È il processo maggiormente diffuso e promettente
  - Elevata efficienza e tassi di recupero molto elevati
  - Consumo energetico notevolmente inferiore rispetto ai processi pirometallurgici
  - Costi chimici elevati
  - Elevata produzione di acque reflue, le quali necessitano di costi aggiuntivi per il loro smaltimento

ANALISI COMPARATIVA DELLE PRESTAZIONI E DEL COSTO ENERGETICO

www.dii.unipd.it



È stato analizzato un motore brushless commerciale, tipicamente impiegato nei veicoli elettrici leggeri. Inserendo i dati del motore in un software agli elementi finiti, è stato possibile confrontare coppia ed efficienza in funzione della velocità, simulando prima l'impiego di magneti vergini e successivamente magneti riciclati, mediante trattamento HD, mantenendo invariati tutti gli altri parametri.

- Coppia istantanea praticamente identica
- Efficienza maggiore con i magneti riciclati

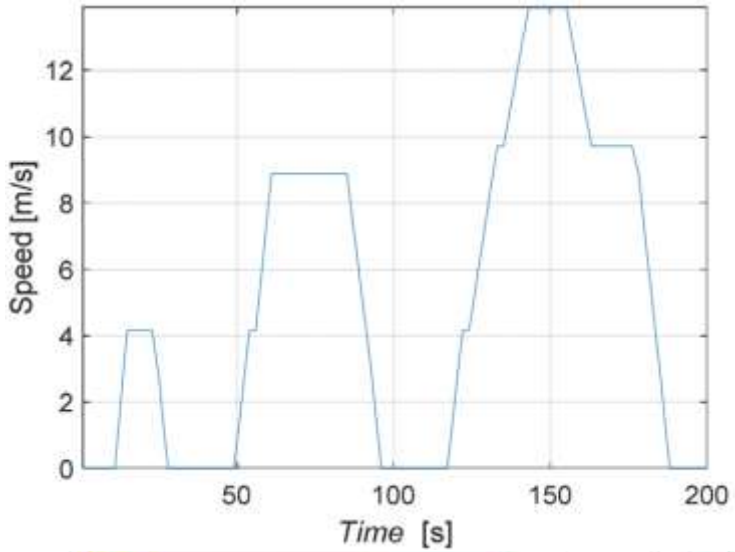
ANALISI COMPARATIVA DELLE PRESTAZIONI E DEL COSTO ENERGETICO

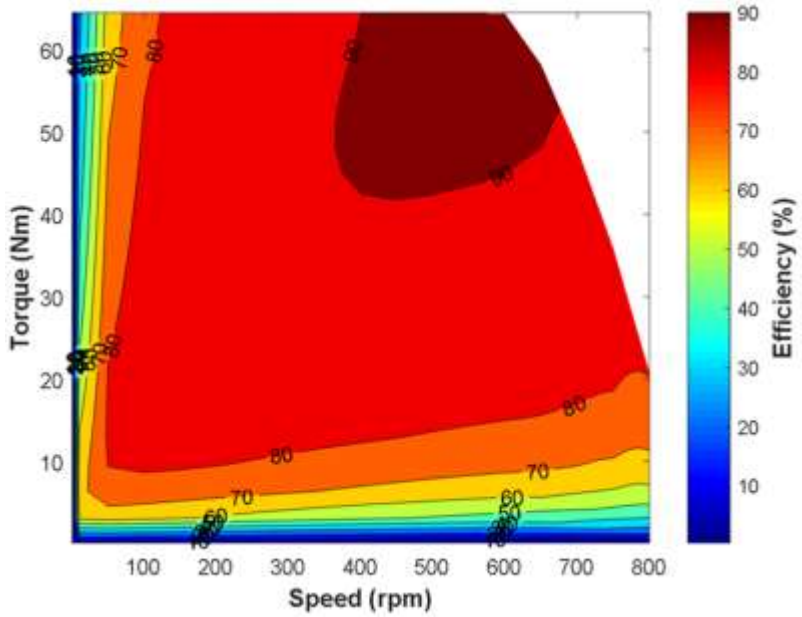
www.dii.unipd.it

1. Valutazione energetica del motore con magneti vergini

Attraverso la modellizzazione del motore mediante software agli elementi finiti, è possibile ottenere la mappa di efficienza. Integrando questa con il profilo di un ciclo di guida reale, che consente di determinare la coppia richiesta alla ruota, si può stimare l'energia consumata da un singolo motore nell'intero ciclo di vita utile, stimato di 10 anni, ipotizzando 2 ore di funzionamento giornaliero.

- Energia totale consumata: 3071 kWh
- Prezzo medio europeo dell'energia: 0,22 €/kWh
- Costo dell'energia durante il ciclo di vita: 676 €
- Prezzo del materiale dei magneti al NdFeB: 45 €/Kg
- Prezzo dei magneti impiegati (0,7 Kg): 31,5 €
- Totale: 707,5 €





ANALISI COMPARATIVA DELLE PRESTAZIONI E DEL COSTO ENERGETICO

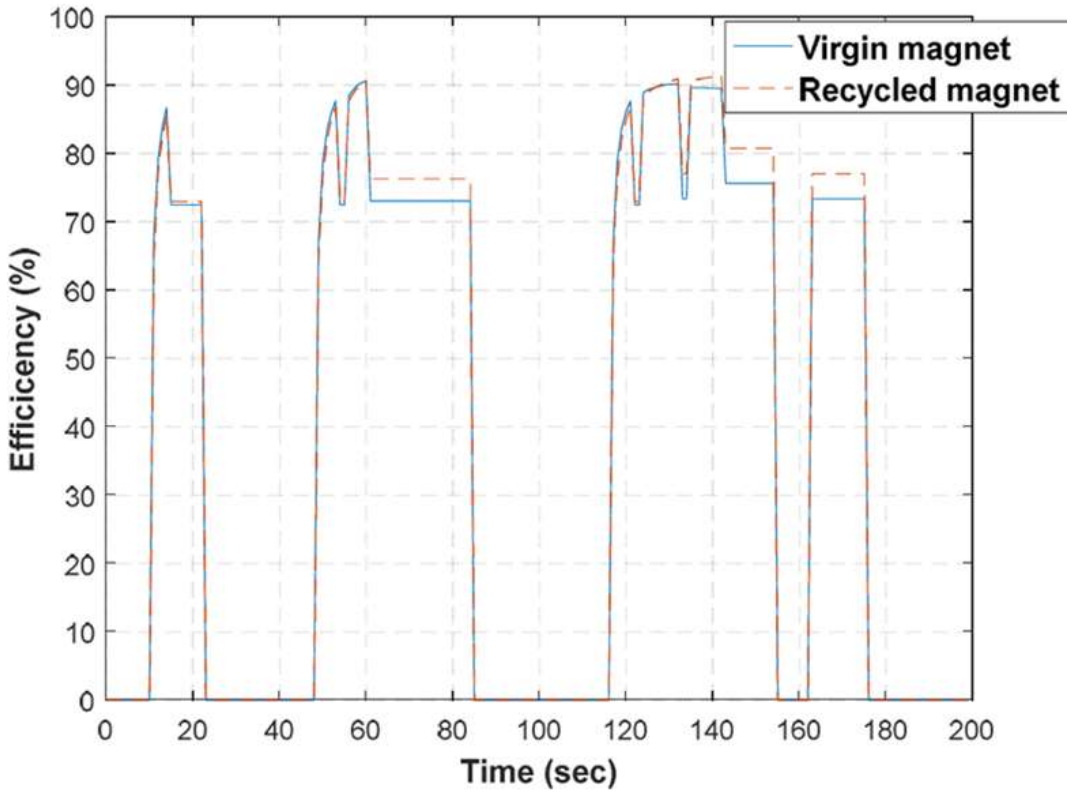
www.dii.unipd.it

2. Valutazione energetica del motore con magneti riciclati

Mediante una procedura analoga alla precedente è possibile ricavare i consumi energetici del motore brushless durante l'intero ciclo guida con magneti riciclati.

- Energia totale consumata: 2995 kWh
- Prezzo medio europeo dell'energia: 0,22 €/kWh
- Costo dell'energia durante il ciclo di vita: 659 €
- Prezzo ipotizzato dei magneti riciclati: 22.5 €/Kg
- Prezzo dei magneti impiegati (0,81 Kg): 18,23 €
- Totale : 667,23 €

- Economicamente più vantaggioso



INDICE DI COSTO ENERGETICO

www.dii.unipd.it

L'indice di costo energetico consente di analizzare diversi scenari e di stabilire quale sia economicamente più vantaggioso, più basso sarà l'indice, più vantaggioso sarà il motore in termini economici

- $$EC_i = \left(\frac{E_C(v)}{E_C(b)}\right) \cdot \left(\frac{Mag_C(v)}{Mag_C(b)}\right)$$

dove:

- EC_i è l'indice di costo energetico
- $E_c(v)$ è il costo energetico per lo scenario da valutare
- $Mag_C(v)$ è il costo dei magneti per lo Scenario da valutare
- $E_c(b\ )$ è il costo energetico per lo Scenario base
- $Mag_c(b)$ è il costo dei magneti per lo Scenario base.

	Costo dell'energia (€)	Costo dei materiali (€/Kg)	Costo totale del magnete	Indice di costo energetico
Scenario base	676	45.0	31.50	1.000
Scenario 2	659	22.5	18.23	0.564
Scenario 3	676	22.5	18.23	0.579
Scenario 4	659	45.0	31.50	0.975
Scenario 5	700	37.5	30.46	1.000

STATO ATTUALE DEI PROCESSI INDUSTRIALI

www.dii.unipd.it

Azienda	Area di produzione	Materie prime	Scala di lavorazione	Tecnologie
HyProMag	Tyseley Energy Park, Regno Unito	Magneti da turbine eoliche, hard disk, e rottami di produzione	Minimo di 100 -330 tonnellate all'anno di NdFeB riciclato	Trattamento con idrogeno (HD)
Ganzhou rare earth Youli Technology Development Co., LTD	Provincia di Jiangxi, Cina	Vari rifiuti NdFeB	Produzione annua di 6600 tonnellate di ossidi di terre rare	Processo idrometallurgico classico
Fujian Yuantong new material Co., LTD	Provincia di Fujian, Cina	Materiale NdFeB calcinato e scorie di colata	Produzione annua di REOs 7000 t/a	Processo pirometallurgico
Jiangxi wan hong high-tech materials Co., LTD	Provincia di Jiangxi, Cina	Vari rifiuti NdFeB	Produzione annua di 4500 ossidi di terre rare	Processo pirometallurgico
Ionic Technologies International Limited	Belfast, Inghilterra	Magneti dismessi da turbine eoliche e motori elettrici	Produzione annua di 10 tonnellate di ossidi di terre rare ad alta purezza	Processo idrmetallurgico avanzato
Cyclic Materials	Ontario, Canada	Hard disk e motori elettrici a fine vita	Lavorazione annua di 8000 tonnellate di prodotti a fine vita contenenti magneti	Processo idrometallurgico avanzato
Geomega	Boucherville, Québec, Canada	Hard disk e motori elettrici a fine vita	Produzione annua di 1640 tonnellate di ossidi di terre rare all'anno	Processo idrometallurgico avanzato

CONCLUSIONI E SFIDE FUTURE

www.dii.unipd.it

Sfide per la sostenibilità economica del riciclo dei magneti permanenti in Europa e negli Stati Uniti:

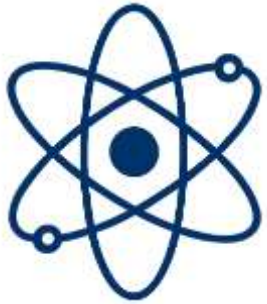
- Automatizzare e ottimizzare i processi di smontaggio

- Creare reti di raccolta dei rifiuti efficaci e capillari

- Scalare la produzione verso livelli industriali

- Promuovere politiche che attraggano investimenti mirati

- Introdurre incentivi e norme per favorire la raccolta dei rifiuti



- Potenziare ricerca e sviluppo nel settore del riciclo