



UNIVERSIDAD
SAN SEBASTIAN
VOCACIÓN POR LA EXCELENCIA

UNIVERSIDAD SAN SEBASTIÁN
FACULTAD DE INGENIERÍA, ARQUITECTURA Y
DISEÑO
ESCUELA DE INGENIERÍA

**NEODIMIO Y EL FUTURO DE LAS TECNOLOGÍAS LIMPIAS:
ANÁLISIS DE APLICACIONES Y DESAFÍOS EN LA INDUSTRIA
MODERNA**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL EN MINAS

NAYARETH CAMILA MUÑOZ SALAZAR

Docente guía

Roberto Acevedo Llanos PhD.

Santiago de Chile

2024

© Nayareth Camila Muñoz Salazar

Se autoriza la reproducción parcial o total de esta obra, con fines académicos, por cualquier forma, medio o procedimiento, siempre y cuando se incluya la cita bibliográfica del documento.

DEDICATORIA

A mis padres quienes, creyeron en mi en todo momento, que, con su amor, esfuerzo constante, perseverancia y apoyo incondicional, me han permitido alcanzar este importante logro académico.

A mis profesores por compartir de sus consejos y conocimientos para guiarme en esta etapa, y a cada persona que aportó de una u otra manera en todo mi proceso.

AGRADECIMIENTOS

Quiero agradecer, primeramente, a Dios por concederme el culminar esta etapa de mi vida y acompañarme en todo momento.

A mi padre Alex Muñoz y mi madre Betzabeth Salazar, por su apoyo constante, sus palabras de aliento y por ayudarme a creer en mi en todo momento. Este logro no habría sido posible sin su ayuda. Lo cual es un reflejo del amor, valores y dedicación que me inculcaron desde pequeña, y que todo se puede lograr en la vida, aun cuando se torna difícil.

También quiero agradecer a mi profesor guía, quien, con su experiencia y consejos, marcó mi formación profesional.

Gracias a cada docente por prepararme como profesional para esta nueva etapa, por sus palabras de aliento y motivación constante. Y también agradecer a cada persona que aportó de distintas formas.

1.1 RESUMEN

El neodimio (Nd), es un elemento químico que presenta un número atómico 60, pertenece al grupo de las tierras raras y además ha adquirido una importancia crucial en la tecnología moderna debido a sus propiedades físicas, químicas y, sobre todo, magnéticas. Este metal, se caracteriza por su estructura cristalina hexagonal y comportamiento paramagnético, es un componente clave en la fabricación de imanes permanentes de neodimio-hierro-boro (NdFeB), los cuales son los más potentes producidos en masa, encontrando aplicaciones fundamentales en sectores como la energía eólica, los vehículos eléctricos y dispositivos electrónicos.

Los imanes de neodimio se han convertido en elementos fundamentales para la aplicación de diversas industrias y también en el uso cotidiano, especialmente en aquellas que requieren alta eficiencia energética y miniaturización, como motores eléctricos, generadores de energía eólica y dispositivos electrónicos utilizados en el hogar durante la vida cotidiana.

La siguiente investigación, explora las aplicaciones del neodimio en la industria, con un enfoque específico en aplicaciones en la energía eólica y vehículos eléctricos. La investigación busca analizar como los imanes de neodimio han mejorado la eficiencia operativa y la sostenibilidad de las actividades industriales, destacando su uso en motores eléctricos de alta eficiencia y la industria en términos generales.

De forma metodológica, el estudio se desarrolla a través de una revisión exhaustiva de la literatura científica, combinada con estudios de caso, revistas de carácter confiable tanto nacional como internacional. También, se examinaron los beneficios específicos del uso de imanes de neodimio en equipos industriales como en las turbinas eólicas.

Además, la investigación analiza la distribución geográfica de las reservas de neodimio a nivel mundial, destacando la concentración en China, lo que genera preocupaciones sobre la seguridad del suministro y la variación de los valores de comercialización. Se expone también el impacto ambiental del neodimio.

Los resultados preliminares de este estudio indican que la incorporación de tecnologías basadas en imanes de neodimio ha tenido un impacto positivo en la eficiencia y sostenibilidad de la industria. Sin embargo, también se identifican desafíos significativos relacionados con la dependencia de suministros concentrados y los impactos ambientales.

En conclusión, la investigación en cuestión ofrece una visión integral de la relevancia del neodimio perteneciente a las tierras raras en la industria moderna, con una cooperación internacional para enfrentar los desafíos futuros y maximizar las oportunidades que este elemento ofrece en la transición hacia una economía tecnológicamente avanzada a nivel global en proyectos en estudio o futuros. También, a medida que la demanda global de neodimio crece por la transición hacia tecnologías más sostenibles, surgen retos para equilibrar oferta y demanda hacia tecnologías más sostenibles.

1.2 ABSTRACT

Neodymium (Nd) is a chemical element with an atomic number of 60, belonging to the rare earth group. It has gained crucial importance in modern technology due to its physical, chemical, and especially magnetic properties. This metal, characterised by its hexagonal crystalline structure and paramagnetic behaviour, is a key component in the production of neodymium-iron-boron (NdFeB) permanent magnets. These magnets are the most powerful mass-produced ones, with essential applications in sectors such as wind energy, electric vehicles, and electronic devices.

Neodymium magnets have become fundamental elements in various industries and everyday uses, particularly in applications requiring high energy efficiency and miniaturisation, such as electric motors, wind energy generators, and electronic devices commonly used in daily life.

This research explores the applications of neodymium in industry, with a specific focus on wind energy and electric vehicles. The study aims to analyse how neodymium magnets have enhanced operational efficiency and sustainability in industrial activities, highlighting their use in high-efficiency electric motors and the industry at large.

Methodologically, the study is conducted through an exhaustive review of scientific literature combined with case studies and reliable national and international journals. The specific benefits of using neodymium magnets in industrial equipment, such as wind turbines, were also examined.

Furthermore, the research analyses the global geographical distribution of neodymium reserves, highlighting their concentration in China, which raises concerns about supply security and price fluctuations. The environmental impact of neodymium is also addressed.

Preliminary results indicate that the incorporation of neodymium-based technologies has had a positive impact on the efficiency and sustainability of industry. However, significant challenges have also been identified, including reliance on concentrated supply chains and environmental impacts.

In conclusion, this research provides a comprehensive view of the relevance of neodymium, a rare earth element, in modern industry. It calls for international cooperation to tackle future challenges and maximise the opportunities this element

offers in the transition to a technologically advanced global economy, both in ongoing and future projects. Additionally, as global demand for neodymium grows due to the transition to more sustainable technologies, challenges arise in balancing supply and demand towards achieving a more sustainable future.

CONTENIDO

DEDICATORIA.....	3
AGRADECIMIENTOS	4
CAPÍTULO 1	5
1.1 RESUMEN	5
1.2 ABSTRACT	7
CONTENIDO.....	9
ÍNDICE DE GRÁFICAS.....	12
ÍNDICE DE TABLAS	12
ÍNDICE DE FIGURAS	12
CAPÍTULO 2	13
2.1 INTRODUCCIÓN	13
2.2 ALCANCES	15
2.3 LIMITACIONES	16
CAPÍTULO 3	17
3.1 ESTADO DEL ARTE	17
3.1.1 Introducción	17
3.1.2 Aplicaciones.....	17
3.1.3 Mercado global y desafíos	18
3.1.4 Medioambiente y reciclaje	18
CAPÍTULO 4	19
4.1 OBJETIVOS	19
4.1.1 Objetivo general.....	19
4.1.2 Objetivos específicos	19

CAPÍTULO 5	21
5.1 NEODIMIO	21
5.1.1 Propiedades físicas del neodimio	21
5.1.2 Propiedades atómicas del neodimio	22
5.1.3 Propiedades magnéticas del neodimio	22
CAPÍTULO 6	25
6.1 IMANES DE NEODIMIO.....	25
6.1.1 Imanes de neodimio – hierro - boro (NdFeB) “Neos”	26
6.1.2 Fabricación de imanes NEO	27
CAPÍTULO 7	30
7.1 APLICACIONES INDUSTRIALES.....	30
7.1.1 Vehículos eléctricos: Motores eléctricos	32
7.1.2 Dispositivos médicos	39
7.1.3 Tecnología de energía renovable	42
CAPÍTULO 8	45
8.1 INGENIERÍA 5.0 Y APLICACIONES.....	45
CAPÍTULO 9	52
9.1 LA IMPORTANCIA DEL NEODIMIO EN LA CADENA GLOBAL DE TIERRAS RARAS	52
CAPÍTULO 10	54
10.1 COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DEL MERCADO GLOBAL: NEODIMIO	54
10.1.1 Movimiento histórico del precio del Neodimio.....	55
CAPÍTULO 11	56
11.1 FACTIBILIDAD ECONÓMICA.....	56
11.1.1 Demanda	56
11.1.2 Oferta.....	58
11.1.3 Producción global	58

CAPÍTULO 12	60
12.1 MERCADO MUNDIAL DE NEODIMIO	60
12.1.2 Causas de la variación en el precio el neodimio	63
12.1.3 Proyecciones de crecimiento y tendencias del mercado de neodimio.....	67
CAPÍTULO 13	71
13.1 ASIA – PACÍFICO: SE CONSOLIDARÁ COMO LÍDER DEL MERCADO	71
CAPÍTULO 14	75
14.1 MERCADO DEL NEODIMIO: DESAFÍOS	75
CAPÍTULO 15	78
15.1 IMPACTO AMBIENTAL DEL NEODIMIO	78
CAPÍTULO 16	81
16.1 MERCADO CHILENO: NEODIMIO	81
16.1.1 Proyecto Aclara en Penco	82
16.1.2 Tierras raras en relaves	85
CAPÍTULO 17	87
17.1 CONCLUSIONES.....	87
17.2 RECOMENDACIONES	89
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	90
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE GRÁFICAS.....	105
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE FIGURAS	106
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TABLAS	107

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Participación de las diferentes aplicaciones en el mercado mundial de NdFeB en el año 2012.	31
Gráfica 2. Venta mundial de coches eléctricos 2015-2024	34
Gráfica 4. Neodimio - Contrato de Futuros – Precios (2023-2024).	60
Gráfica 5. Mercado mundial de neodimio: tendencias de la industria y pronóstico hasta 2029.	61
Gráfica 6. Mercado mundial de neodimio por productos.	62
Gráfica 7. Evolución del precio del neodimio de junio de 2017 a junio de 2022	64
Gráfica 8. Evolución de los precios USD/CNY de junio de 2017 ^a junio de 2022	65

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Resumen de propiedades de neodimio.	23
Tabla 2. Precios históricos y cambios de valores del Neodimio.	55
Tabla 3. Principales actores que operan en el mercado de neodimio.	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Evolución y proceso de fabricación de imanes “NEO” aplicados a motores de vehículos eléctricos.	35
Figura 2. Tasa de crecimiento del mercado de neodimio por región.	71
Figura 3. Corea del Sur, aprueba Proyecto eólico flotante.	74

2.1 INTRODUCCIÓN

Desde su aislamiento en el año 1885, el neodimio ha pasado de ser una curiosidad científica para convertirse en un pilar fundamental de las innovaciones modernas industriales. Este elemento se distingue por sus propiedades magnéticas excepcionales, que lo han posicionado como el componente principal de los imanes permanentes poderosos más conocidos.

La demanda de estos imanes ha crecido de manera positiva debido a su alta capacidad para generar campos magnéticos muy intensos en comparación con su tamaño y peso, lo que los hace indispensables en una amplia variedad de aplicaciones industriales y tecnológicas en diversos campos industriales.

En la industria de vehículos eléctricos y energía eólica, el neodimio ha emergido como un recurso esencial para la modernización y alta eficiencia de los procesos de funcionamiento. Los motores eléctricos que incorporan imanes de neodimio son más potentes y eficientes, lo cual va permitiendo un funcionamiento más eficaz.

La adopción de tecnologías basadas en neodimio es clave para mantener la competitividad en el mercado de forma global. La integración de imanes de neodimio en vehículos eléctricos, en ellos sensores avanzados, ha permitido no solo en el mejoramiento de la productividad, sino también reducir los costos operativos y las emisiones de gases contaminantes hacia el medio ambiente.

La mayoría de las reservas de neodimio se encuentran concentradas en China, que domina principalmente la producción y el procesamiento de este elemento perteneciente a las tierras raras. Esta concentración geográfica genera una vulnerabilidad en la cadena de suministro global, exponiendo a la industria minera a riesgos asociados con fluctuaciones en los precios y posibles interrupciones debido a tensiones geopolíticas presentes.

La motivación para la elección de este tema radica en la creciente relevancia que el neodimio ha adquirido en el sector de vehículos eléctricos y en la industria de la generación eólica. Esta memoria tiene como objetivo explorar en profundidad las propiedades del neodimio, su papel crucial en la industria, los desafíos y oportunidades

que su uso presenta en el contexto actual y con visión hacia el futuro y una visión en la energía renovable. Se analizarán las aplicaciones principales de imanes de neodimio destacando como este elemento ha contribuido a mejorar la eficiencia y sostenibilidad de las operaciones.

A través de esta investigación, se espera proporcionar una comprensión integral de como el neodimio puede continuar desempeñando un papel fundamental en la evolución de la industria minera en el siglo XXI con sus avances para una mirada hacia el futuro global.

Metodológicamente, el estudio se lleva a cabo mediante un análisis de la literatura existente y estudios científicos. Se espera que los resultados del análisis proporcionen una comprensión integral de como el neodimio puede continuar desempeñando un papel fundamental en la evolución de la industrialización.

Se busca demostrar que el neodimio no solo es un elemento clave para la innovación tecnológica, sino también un componente esencial para garantizar la sostenibilidad y la competitividad a largo plazo de este sector para la economía global. Y que se esperan desafíos en el mercado en parques eólicos ya en estudio y en la demanda de vehículos eléctrico hacia el futuro próximo.

Por último, se agrega a la investigación la importancia del neodimio en Chile, y su actual visión en el mercado a nivel global.

2.2 ALCANCES

- **Revisión exhaustiva del uso del neodimio en aplicaciones industriales**

La presente investigación detalla cómo los imanes de neodimio han transformado sectores clave como los motores eléctricos y las turbinas eólicas, resaltando su capacidad en la eficiencia operativa.

- **Estudio de aplicaciones específicas en vehículos eléctricos e industria eólica**

Se analiza cómo los imanes de neodimio han contribuido a optimizar la eficiencia energética, destacando casos de éxito en la industria eólica y de vehículos eléctricos.

- **Análisis de distribución geográfica y concentración de reservas**

La investigación evalúa la concentración de las reservas de neodimio, principalmente dada en China, y su impacto en el mercado global, incluyendo aspectos económicos y proyecciones.

- **Exploración del impacto ambiental**

Se explica como el neodimio se encuentra presente en lo que el medioambiente y su impacto en él.

- **Análisis de mercado**

Se examinan las tendencias en oferta, demanda y crecimiento de las tecnologías renovables relacionadas con el neodimio.

- **Impacto en la competitividad global**

La investigación destaca cómo la adopción del neodimio en tecnologías clave puede garantizar competitividad, considerando sus aplicaciones en proyectos innovadores futuros.

2.3 LIMITACIONES

- **Dependencia de información secundaria**

La investigación utiliza principalmente fuentes literarias y estudios previos, lo que puede restringir el acceso a algunos datos actualizados sobre el mercado y los avances tecnológicos más recientes.

- **Cobertura geográfica específica**

El enfoque en China como principal proveedor puede limitar el análisis de regiones emergentes o países que se encuentran en su fase inicial o incrementando su producción de neodimio.

- **Falta de experimentación propia**

No se incluyen pruebas experimentales o estudios de campo propios, lo que podría limitar la capacidad de validar los hallazgos de forma práctica.

- **Análisis limitado de impactos ambientales**

Aunque se exploran las implicaciones ambientales, no se abordan con detalle las emisiones de tipo específicas o la gestión de residuos en las distintas etapas del ciclo de vida del neodimio. Faltan detalles sobre gestión de residuos y emisiones en cada etapa.

- **Enfoque restringido en industrias seleccionadas**

Las aplicaciones analizadas se limitan a energía eólica y vehículos eléctricos, dejando fuera un análisis exhaustivo de su impacto en otras industrias como la salud o la electrónica de consumo.

3.1 ESTADO DEL ARTE

3.1.1 Introducción

El neodimio se utiliza, entre otras cosas, para hacer imanes que hacen funcionar los motores de los vehículos eléctricos (BBC News Mundo, 2020). Este elemento químico fue descubierto por primera vez por el químico austríaco Carl Auer von Welsbach en el año 1885 (BYJU'S, s.f.). El neodimio es un elemento con símbolo Nd y número atómico 60 en la tabla periódica (BYJU'S, s.f.). El neodimio es un elemento metálico de color blanco plateado a amarillo del grupo de las tierras raras que se utiliza especialmente en imanes y láseres. Los imanes de neodimio están compuestos de neodimio, boro, hierro y algunos metales de transición. Estos imanes se denominan imanes NdFeB o Neo (Mordor Intelligence, s.f.).

3.1.2 Aplicaciones

En el ámbito de la energía eólica, los imanes de neodimio desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento de las turbinas eólicas de accionamiento directo. Estas turbinas utilizan el campo magnético generado por los imanes de neodimio para convertir eficazmente la energía cinética del viento en energía eléctrica. Al eliminar la necesidad de cajas de engranajes, las turbinas de accionamiento directo aumentan la fiabilidad, reducen los costes de mantenimiento y mejoran la producción total de energía (Eurobalt, 2024, párr. 4).

La transición a los vehículos eléctricos (VE) está acelerando la demanda de imanes de neodimio en aplicaciones de motores eléctricos. Los imanes permanentes de neodimio son componentes integrales de los motores de los vehículos eléctricos e híbridos, ya que facilitan un par elevado, un diseño compacto y una mayor eficiencia energética. A medida que la industria automovilística cambie hacia la electrificación, la demanda de imanes de neodimio se disparará, impulsando los avances en la tecnología de los vehículos eléctricos (Eurobalt, 2024, párr. 5).

3.1.3 Mercado global y desafíos

El neodimio se encuentra en minerales como la bastnasita y la monacita. Los procesos de intercambio iónico y extracción con solventes lo extraen comercialmente. La mayor conciencia sobre los vehículos eléctricos y el aumento sucesivo de la demanda de estos vehículos por parte de los clientes son los impulsores clave del mercado del neodimio. Debido a sus propiedades magnéticas, el neodimio ha estado atrayendo la atención de los fabricantes de automóviles electrónicos para su aplicación en motores magnéticos. Los fabricantes de vehículos eléctricos también están aumentando la adopción del neodimio (Data Bridge Market Research, 2022, párr. 2).

Data Bridge Market Research analiza que el mercado del neodimio se valoró en 554,83 millones de dólares en 2021 y se espera que alcance los 783,00 millones de dólares en 2029, registrando una tasa compuesta anual del 4,40% durante el período previsto de 2022 a 2029 (Data Bridge Market Research, 2022, párr. 3).

3.1.4 Medioambiente y reciclaje

Aunque los imanes de neodimio ofrecen ventajas sustanciales para las tecnologías de energías renovables, su producción y eliminación plantean problemas medioambientales. La extracción y el refinado de elementos de tierras raras contribuyen a la destrucción de hábitats, la contaminación del agua y las emisiones de gases de efecto invernadero. Además, la eliminación de residuos electrónicos que contienen imanes de neodimio puede contaminar el suelo y el agua, agravando la degradación del medio ambiente (Eurobalt, 2024).

El neodimio se recicla llevándolo al punto limpio o centro de reciclaje más cercano. Es importante separar los imanes de otros materiales y colocarlos en el contenedor adecuado para su reciclaje. Al hacerlo, se está ayudando a conservar los recursos naturales y evitando la acumulación de estos imanes en los vertederos, contribuyendo así a un medio ambiente más limpio y sostenible (Organitza L'Orgànica, s.f.).

4.1 OBJETIVOS

4.1.1 Objetivo general

Realizar un análisis técnico y exhaustivo sobre las propiedades y aplicaciones del neodimio en la industria, en el sector de la energía eólica, vehículos eléctricos y algunas otras industrias.

Se considerarán temas como la caracterización detallada de las propiedades magnéticas del neodimio, su impacto en la aplicación de equipos industriales. Además, se abordarán los desafíos de mercado asociados con este elemento. El estudio pretende proporcionar una base técnica para la adopción de tecnologías basadas en neodimio en la industria, facilitando la transición hacia una operación más eficiente, sostenible y tecnológicamente avanzada para el siglo XXI.

4.1.2 Objetivos específicos

- Caracterizar las propiedades magnéticas, físicas y químicas del neodimio, con el fin de comprender su comportamiento en aplicaciones industriales, específicamente en la fabricación de imanes permanentes utilizados en la industria.
- Fabricación de imanes “Neo”.
- Investigación de las reservas de neodimio a nivel global.
- Analizar el impacto de los imanes de neodimio en la eficiencia energética de los dispositivos electrónicos avanzados, motores eléctricos, y tecnologías de energía renovable.
- Aplicación de imanes de neodimio en la ingeniería 5.0.
- Estudiar los impactos en el mercado el neodimio.

- Futuros proyectos eólicos en propuesta.
- Visión general del impacto ambiental del neodimio y su reciclaje.

5.1 NEODIMIO

El neodimio se extrae principalmente de minerales como la monacita, la bastnasita, que son minerales ricos en tierras raras. Estos minerales se encuentran principalmente en depósitos geológicos en regiones específicas de países tal como China, que es el principal productor y procesador de neodimio, seguido por Australia, Estados Unidos, y Malasia. La extracción de neodimio se realiza mediante minería a cielo abierto o subterránea, donde estos minerales se procesan para separar el neodimio y otros elementos considerados como tierras raras.

5.1.1 Propiedades físicas del neodimio

El neodimio es altamente demandado para la confección de imanes permanentes usados en los generadores de turbinas eólicas (Ibacache. A., s.f.).

Este elemento, forma parte de las tierras raras, es de particular interés debido a sus propiedades físicas y químicas que lo hacen esencial en una amplia variedad de aplicaciones tecnológicas avanzadas en diferentes industrias.

El estado del neodimio en su forma natural es sólido. El neodimio es un elemento químico de aspecto blanco plateado, amarillento y pertenece al grupo de los lantánidos. El símbolo químico del neodimio es Nd. El punto de fusión del neodimio es de 1,297 grados Kelvin o de 1,024.85 grados Celsius o grados centígrados. El punto de ebullición del neodimio es de 3,373 grados Kelvin o de 3,100.85 grados Celsius o grados centígrados (Pimienta Posso, J. W., 2014).

El neodimio, en particular, es un metal de color plateado, con una notable maleabilidad y ductilidad presente en fase sólida, esto provoca que puede ser fácilmente trabajado en formas diversas sin romperse. Sin embargo, una de sus características más notables es su tendencia a oxidarse rápidamente cuando se expone al aire, formando una capa de óxido que puede alterar sus propiedades superficiales.

5.1.2 Propiedades atómicas del neodimio

La masa atómica de un elemento está determinada por la masa total de neutrones y protones que se puede encontrar en un solo átomo perteneciente a este elemento. En cuanto a su posición dentro de la tabla periódica de los elementos se puede encontrar en el período 6. El neodimio tiene una masa atómica de 144,242 u. La configuración electrónica del neodimio es $[\text{Xe}]4f^46s^2$.

La configuración electrónica de los elementos determina la forma en la cual los electrones están estructurados en los átomos de un elemento. El radio medio del neodimio es de 185 pm y su radio atómico o radio de Bohr es de 206 pm. El neodimio tiene un total de 60 electrones cuya distribución es la siguiente: En la primera capa tiene 2 electrones, en la segunda tiene 8 electrones, en su tercera capa tiene 18 electrones, en la cuarta, 22 electrones, en la quinta capa tiene 8 electrones y en la sexta, 2 electrones (Pimienta Posso, 2014).

Como parte del grupo de los lantánidos, el neodimio pertenece a una familia de elementos conocidos por su comportamiento químico similar y por su importancia en la tecnología moderna. Estos elementos, aunque no son tan raros en la corteza terrestre como su nombre lo sugiere, pero si son recursos estratégicos. Su estructura cristalina es de tipo hexagonal en su forma metálica.

5.1.3 Propiedades magnéticas del neodimio

El neodimio es paramagnético, lo que implica que sus átomos poseen momentos magnéticos que se alinean débilmente con un campo magnético externo. Este comportamiento es especialmente notable en sus orbitales 4f, en este orbital los electrones desapareados contribuyen a su magnetismo. Además, hay que destacar que la estructura del neodimio es cristalina hexagonal de doble empaquetamiento cerrado.

La electronegatividad del neodimio es de 1.2 según la escala de Pauling, una medida que indica su tendencia a atraer electrones hacia sí en un enlace químico. Esta baja electronegatividad es coherente con su posición en la serie de los lantánidos, donde los elementos suelen tener una afinidad electrónica relativamente baja.

Tabla 1. Resumen de propiedades de neodimio.

Neodimio

Nombre	Neodimio
Número atómico	60
Valencia	3
Estado de oxidación	+3
Electronegatividad	1,2
Radio iónico	1,09
Configuración electrónica	[Xe] 4f ⁴ 5d ⁰ 6s ²
Masa atómica(g/mol)	144,24
Densidad (g/ml)	7,00
Punto de ebullición (C°)	3027
Punto de fusión	1024
Descubridor	Carl Auer Von Welsbach 1885

Fuente: Álvarez Quicaño, D. C. (2018).

Estas características aludidas con anterioridad hacen del neodimio un elemento clave en la fabricación de imanes permanentes de alta potencia, que son esenciales en dispositivos electrónicos avanzados, motores eléctricos, y tecnologías de energía renovable, como los generadores eólicos. Además, su capacidad para formar compuestos y aleaciones con propiedades únicas lo convierte en un recurso indispensable en la industria moderna, a pesar de los desafíos asociados con su suministro y procesamiento.

Una de las propiedades por las que se destaca el neodimio es su capacidad para formar imanes extremadamente potentes, conocidos como imanes de neodimio (NdFeB), que son los imanes permanentes más fuertes fabricados en cuanto a masa. Estos imanes se utilizan en una amplia gama de aplicaciones, incluyendo motores eléctricos, discos duros, auriculares, micrófonos, y en tecnología de energías renovables, tales como, generadores eólicos.

El neodimio también tiene aplicaciones en la fabricación de láseres, y es un componente importante en ciertas aleaciones metálicas que mejoran la resistencia y la durabilidad de los materiales. A pesar de ser clasificado como una tierra rara, el neodimio es relativamente abundante en la corteza terrestre, pero su extracción y procesamiento son complejos y costosos, lo que lo convierte en un recurso valioso que debe utilizarse de manera estratégica para no generar elevadas pérdidas.

6.1 IMANES DE NEODIMIO

Según Bermúdez Jáuregui y Pedraza Soler (s.f), un imán de neodimio (también conocido como imán NdFeB, NIB, o Neo) es el tipo de imán de tierras raras más utilizado, es el resultado de una aleación de neodimio, hierro y boro, combinados para formar un compuesto con la fórmula empírica $\text{Nd}_2\text{Fe}_{14}\text{B}$. Fue desarrollado en 1982 por la General Motors y la división de metales especiales de la Sumitomo Metal Industries. Los imanes de neodimio son los imanes permanentes fabricados con mayor fuerza magnética. Han reemplazado a los demás tipos de imanes permanentes en varias aplicaciones de la industria moderna como la fabricación de motores en herramientas inalámbricas, discos duros, y sellos magnéticos.

Una de las aplicaciones más importantes de las tierras raras es como elementos constituyentes de los imanes permanentes utilizados en vehículos eléctricos, turbinas eólicas y discos duros de ordenador.

En Imanes permanentes, construidos en base a Neodimio-Hierro-Boro (NdFeB), son los imanes más poderosos que se conocen y se utilizan frecuentemente en motores eléctricos, turbinas eólicas, discos duros, auriculares, altavoces, etc (Brovelli Sepúlveda, F., 2023).

La composición más utilizada, NdFeB, contiene alrededor de un 30% de Nd; se alternan capas de hierro y Nd-B para crear una distribución densa de electrones desapareados con espines alineados para formar un campo magnético fuerte. También se añaden otras tierras raras traza, como Pr y Dy, para que el imán sea estable a altas temperaturas (Kim & Jariwala, 2021).

6.1.1 Imanes de neodimio – hierro - boro (NdFeB) “Neos”

A este tipo de imanes se les conoce como los imanes de neodimio-hierro-boro o frita de neodimio (NdFeB). Estos son conocidos como la tercera generación de imanes permanentes pertenecientes a las tierras raras, “se fabrican a partir de Nd, Fe, B, además de algunos otros elementos como Dy, Tb, Co, Nb, Ga., Al, Cu, etc” (Jin Magnets, s.f.). Los imanes de neodimio – hierro - boro (NdFeB) son conocidos por su remanencia magnética superior a 1.0 T, lo que los convierte en una de las opciones más fuertes entre los imanes permanentes (Santana Hernández, 2022).

Los imanes conocidos como “NEO” o NdFeB están constituidos por una mezcla de tierras raras (principalmente neodimio), hierro y boro, y fabricados habitualmente mediante sinterización, siendo los únicos imanes con la suficiente energía para sustituir los bobinados del rotor de los motores eléctricos (Abad & Sagredo, 2018).

El neodimio es el metal de tierras raras más fuerte, por lo que es el más utilizado en los imanes permanentes. Los imanes de neodimio-hierro-boro son los preferidos para la mayoría de las aplicaciones debido a su rendimiento superior en el volumen más pequeño (Mordor Intelligence, 2024).

Como ventaja de este tipo de imanes, se tiene que “los imanes de neodimio son resistentes a la corrosión solo cuando se encuentran protegidos, por lo que no los reemplaza con frecuencia, lo que reduce los costos de mantenimiento y mejora la confiabilidad general de los motores eléctricos” (TY Magnets, 2023).

La desventaja es que los imanes de neodimio tienen una temperatura de Curie más baja y son más vulnerables a la oxidación y la corrosión que los imanes de samario-cobalto, alnico y ferrita. También son bastante frágiles. Para superar estos problemas se pueden recubrir con plástico, caucho, níquel u otros materiales (Super Magnetic Shop, s.f.).

Estos imanes son fabricados a través de un proceso complejo que incluye la preparación de polvos, sinterización a altas temperaturas, mecanizado, magnetización y recubrimiento protector. Son vitales en motores eléctricos, generadores. Su costo es elevado debido a la demanda de neodimio y la necesidad de prácticas de reciclaje sostenible representan desafíos significativos y la responsabilidad de utilizar de manera óptima este recurso.

Los materiales de tierras raras, como el neodimio - praseodimio, o NdPr, se utilizan para producir los imanes más potentes y eficientes del mundo. Los imanes de tierras raras son insumos clave para la electrificación y las tecnologías avanzadas, incluidos los vehículos eléctricos, las turbinas eólicas y varios dispositivos electrónicos (Sumitomo Corporation, 2023).

6.1.2 Fabricación de imanes NEO

A continuación, se presentan las opciones para la fabricación de los imanes conocidos como neo, que se dividen en dos tipos principales, estos son: sinterizados y aglomerados. Al considerar la producción de estos imanes, es fundamental evaluar no solo sus características magnéticas, que son las más destacadas, sino también la evaluación de otros factores importantes.

a. Sinterizados o de densidad completa

El imán NdFeB sinterizado es uno de los materiales magnéticos más fuertes con alta inducción residual (B_r), fuerza coercitiva intrínseca (H_{c_j}) y producto de alta energía (BH), lo que lo hace adecuado para servomotores, motores de disco sin escobillas, motores móviles, industriales, MRI, productos de audio, separador magnético, magnetizador de agua y elevador magnético (Jin Magnets, s.f.).

Según Abad y Sagredo (2018), Todos los imanes sinterizados son anisotrópicos, lo que favorece sus altos productos de energía alcanzando actualmente valores de 52 MGOe y que es el motivo de ser los elegidos para la construcción de motores eléctricos de hasta 60 kW para vehículos.

Posibilidad de magnetización en cualquier dirección, alta resistencia a la desmagnetización, alto rendimiento y buena fuerza coercitiva, temperatura de trabajo hasta 200 °C, formas posibles: cilindros, bloques, segmentos (RCC Industrial, 2024).

Los imanes de neodimio sinterizados se fabrican comenzando con la fusión de las materias primas en un horno. El material fundido se vierte en moldes y se enfría para formar lingotes. A continuación, estos lingotes se transforman en un polvo extremadamente fino mediante un proceso conocido como decrepitación por hidrógeno,

que se explicará más adelante. Este polvo se somete luego a un proceso de sinterización en fase líquida, durante el cual las partículas se alinean magnéticamente y se compactan para formar bloques densos. Estos bloques pasan por un tratamiento térmico, se cortan en las formas deseadas y se les aplica un recubrimiento superficial para evitar la corrosión. Finalmente, los imanes se magnetizan exponiéndolos a un potente campo magnético generado por bobinas. Como aglutinante se emplean elastómeros como caucho nitrilo, polietileno y vinilo y no suele superar un 5% de la composición total (Abad & Sagredo, 2018).

b. Imanes Neo Aglomerados (Bonded)

Inicialmente estos compuestos se habían relegado a un segundo plano, porque ofrecen un flujo magnético menor que el de los imanes sinterizados, sin embargo, en los últimos años el interés por ellos ha crecido, especialmente en aquellas aplicaciones que tiene que ver con los motores de imanes permanentes (Abad & Sagredo, 2018).

Entre las ventajas que presentan este tipo de imán, se pueden destacar los siguientes aspectos:

- Posee una alta versatilidad en los procesos de fabricación, y esto ha permitido incrementar el valor del producto, logrando que, bajo ciertas condiciones, sean competitivos en comparación con los imanes de tipo sinterizados.
- Tienen la capacidad de ser moldeados en formas muy complejas, lo que permite obtener la potencia específica que se necesita. El polvo que se produce actualmente es muy fino lo que positivamente facilita un mayor grado de compactación.
- En general, los costos de fabricación son más bajos, especialmente cuando se trata de producciones a gran escala. Además, si se eliminan los altos costos de montaje asociados con los prismas, los imanes aglomerados se vuelven aún más rentables, ya que permiten ser magnetizados después de que el rotor esté completamente ensamblado.

Estos imanes tienen la misma constitución que los anteriores, con la diferencia de que los granos finos de tierras raras que constituyen el imán permanente se obtienen por procesos de templado muy rápidos obteniendo polvo isotrópico, que se mezclan con una determinada proporción de aglomerante entre un 20 – 40%, formando una

estructura reticular. Posteriormente se constituye el imán por un proceso de compresión o de inyección. También son conocidos como de solidificación rápida (Abad & Sagredo, 2018).

7.1 APLICACIONES INDUSTRIALES

Las tierras raras son un grupo de elementos químicos con unas altas aplicaciones en tecnologías. Son la llave para las energías verdes, ya que el Nd, Fe, B se usa en los imanes permanentes y éstos están en las turbinas eólicas (López Rodríguez, 2021, p. 13).

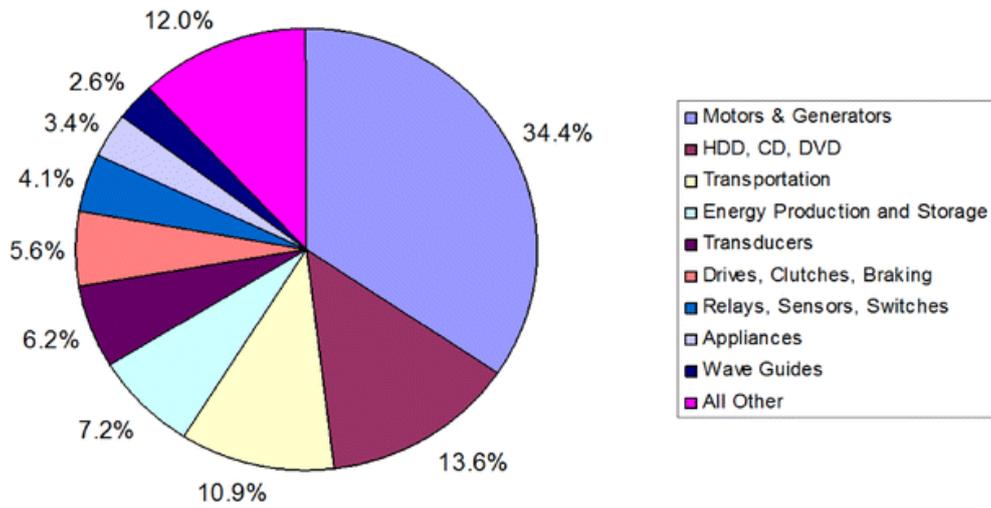
Las tierras raras se usan actualmente para construir baterías, armas, pantallas, en radiodiagnóstico. Lo que los volvió esenciales fue el descubrimiento de sus increíbles propiedades magnéticas (Consejo Superior de Investigaciones Científicas, CSIC, 2023).

Las aplicaciones de imanes de neodimio pueden muy variadas, desde artefactos de utilización común en el hogar hasta en la implementación en máquinas de gran envergadura. Como, por ejemplo; industria del mueble, sistemas de iluminación, industrias de plástico, industrias alimentarias, obras de construcción, dispositivos electrónicos, motores magnéticos, dispositivos médicos y muchas variadas aplicaciones más.

Los imanes permanentes cuentan con múltiples aplicaciones tecnológicas hoy en día, entre estas se encuentran los parlantes, motores, discos duros, transductores de velocidad electromecánicos, entre otros (Guarín-Zapata & Velásquez, 2009).

Hoy en día, los impulsores clave para el desarrollo de nuevos materiales de imanes permanentes, son las crecientes demandas de motores industriales y automatización, electrónica de consumo, movilidad eléctrica y el cambio hacia las energías de utilidad como las renovables, ante todo la energía eólica (Espoch, E., 2018).

Gráfica 1. Participación de las diferentes aplicaciones en el mercado mundial de NdFeB en el año 2012.



Fuente: Yang et al. (2017).

7.1.1 Vehículos eléctricos: Motores eléctricos

Varios fabricantes de vehículos eléctricos ya han tomado medidas para reducir el consumo de tierras raras en sus productos y hacerlos más resistentes a las fluctuaciones del mercado. Toyota, uno de los principales actores del mercado, ha dejado de utilizar Tb y Dy en sus productos desde 2016 (Bombgardner, 2018).

La empresa anunció entonces en 2018 un modelo completamente nuevo de imanes de NdFeB, que reduce drásticamente la cantidad de tierras raras necesarias a través de dos facetas: Una reducción de diez veces del tamaño del grano del imán para aumentar el área del límite del grano y la concentración de Nd en la superficie del grano en lugar de utilizar una composición homogénea para todo el grano (Kim & Jariwala, 2021).

Toyota espera que estas dos medidas permitan que su próxima generación de motores eléctricos requiera solo el 50% del Nd que requiere la generación actual de motores (Kim & Jariwala, 2021).

Para Corea del Sur, en el sector del transporte se descarbonizará completamente para 2050 utilizando vehículos eléctricos y vehículos de pila de combustible (El Periódico de la Energía, 2024).

El neodimio se utiliza en motores eléctricos como lo es para el caso de bombas, ventiladores, trituradoras y otros equipos mineros que requieren una alta operación de manera más eficiente. Los motores con imanes de neodimio pueden ofrecer una mayor potencia y eficiencia, lo que se traduce en una operación más económica y efectiva para la industria en términos generales. En la industria automotriz y en la generación de la energía eólica, estos imanes (NdFeB) se emplean para mejorar la eficiencia y el óptimo rendimiento en motores y generadores. Motores para automóviles tanto híbridos como eléctricos, por ejemplo, el motor eléctrico del vehículo Toyota Prius requiere de 1 kilogramo de neodimio para su fabricación (Bermúdez Jáuregui & Pedraza Soler, s.f.).

Actualmente, los imanes NdFeB son esenciales para optimizar la relación potencia-peso en motores y generadores, pero los fabricantes de automóviles están buscando formas de reducir su dependencia de los REE (Gielen & Lyons, 2022).

Un vehículo híbrido promedio o un vehículo eléctrico utiliza entre 2 kg y 5 kg de imanes permanentes, dependiendo de su diseño (Onstad, 2021). Los imanes permanentes en

los motores cuestan más de 300 dólares estadounidenses por vehículo, o hasta la mitad del costo total del motor (Onstad, 2021).

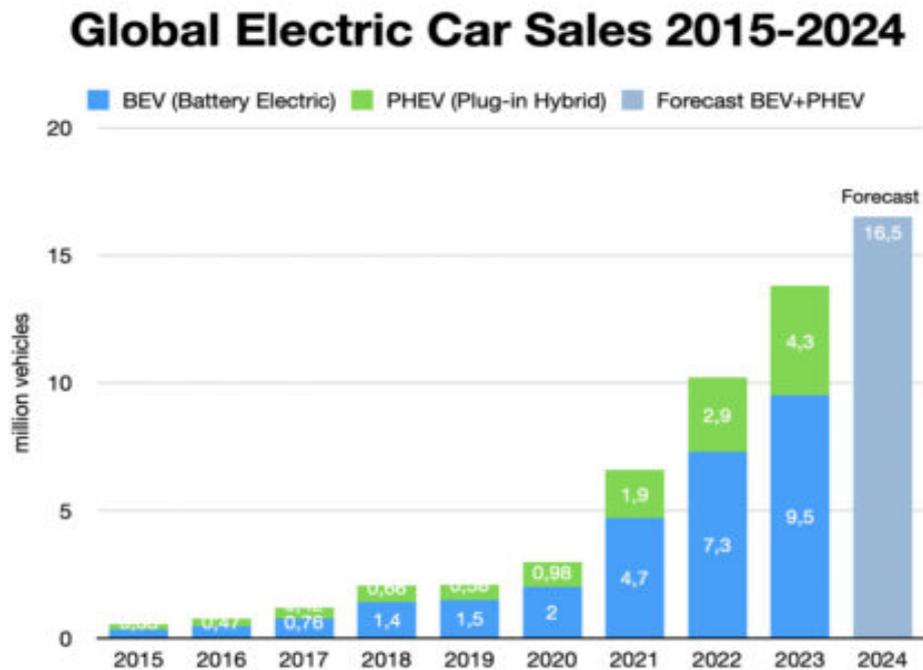
La necesidad de reducir la dependencia de los combustibles fósiles en el sector del transporte llevó a considerar alternativas entre las que destacan los vehículos eléctricos (EVs). Tecnológicamente se pueden distinguir tres tipos de vehículos eléctricos: vehículos eléctricos puros o de baterías, vehículos eléctricos de pila de combustible y vehículos eléctricos híbrido (HEV). Los dos primeros tipos son vehículos puramente eléctricos mientras que los vehículos híbridos combinan motores eléctricos con motores de combustión interna, lo que les confiere más potencia y una mayor autonomía, que es justo el punto débil de los vehículos eléctricos puros (Abad & Sagredo, 2018).

Estos imanes, poseen una extraordinaria relación fuerza-peso, creando más líneas de campo magnético en un área más pequeña. Su notable fuerza permite una conversión de energía más eficiente dentro de los motores eléctricos. Eso significa un par más alto y una mayor eficiencia general de los vehículos eléctricos. Además, los motores eléctricos fabricados con imanes de neodimio pueden ser hasta un 50% más pequeños que los motores eléctricos sin imanes (TY Magnets, s.f.).

Desde hace unos años, los vehículos con motor eléctrico se han convertido en la opción preferida por cada vez más consumidores. Actualmente, se esperan 250 millones de automóviles eléctricos en las carreteras (TY Magnets. s.f.).

Los vehículos eléctricos actualmente están experimentando un auge debido a su potencial para reducir la contaminación, las emisiones de gases de efecto invernadero y el coste de funcionamiento, a la vez que conservan un alto rendimiento. Aunque es probable que el motor de combustión interna (ICE) siga siendo dominante a corto y medio plazo, se espera que los vehículos eléctricos tengan un crecimiento significativo y rápido en las próximas décadas (ANSYS, 2021).

Gráfica 2. Venta mundial de coches eléctricos 2015-2024



Fuente: Bukold, S. (n.d.).

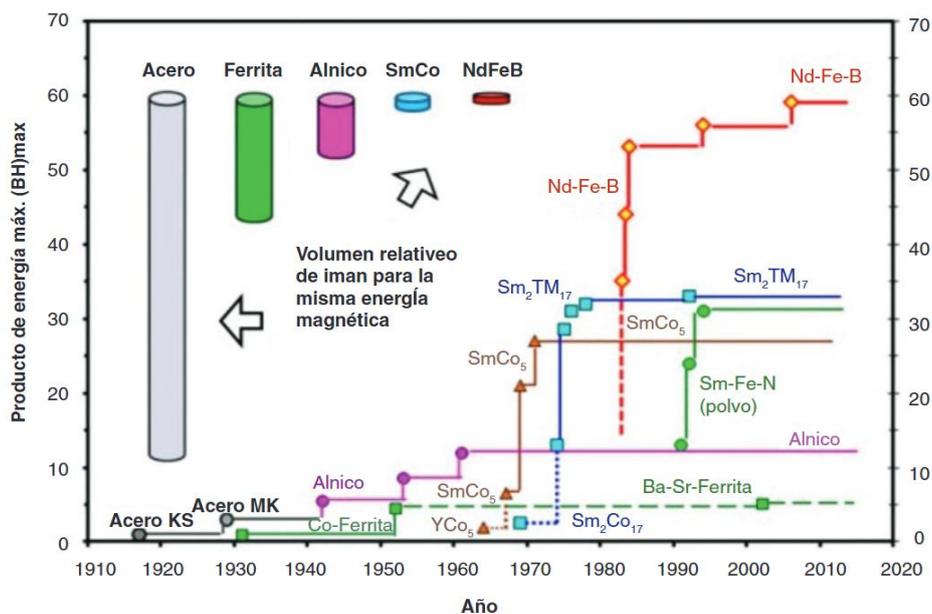
La alta densidad de flujo magnético del neodimio permite la construcción de motores que son compactos y potentes en su accionar. Estos motores generan una significativa fuerza de rotación, lo cual permite que la mayor parte de la energía eléctrica se pueda convertir en energía mecánica y así aumentando la eficiencia del motor.

Para el caso de los vehículos de motor eléctrico, los cuales han generado de manera exponencial gran popularidad en la sociedad en cuanto al transporte sostenible. Estos imanes permanentes generan campos magnéticos fuertes y no dejan de ser livianos, por lo tanto, son los más adecuados para su utilización en los vehículos eléctricos los cuales van priorizando el ahorro de combustible y una gran ventaja para el impacto ambiental. Los motores eléctricos convierten la energía eléctrica en energía mecánica para fines de conducción.

En la Figura 1, se muestra la evolución temporal de los imanes respecto a su característica más importante, el producto de energía (BHmax) y una comparativa del volumen requerido de cada tipo de imán para obtener la misma energía magnética.

Puede apreciarse el destacado rendimiento de los imanes NdFeB respecto del resto (Abad & Sagredo, 2018).

Figura 1. Evolución y proceso de fabricación de imanes “NEO” aplicados a motores de vehículos eléctricos.



Fuente: “Productos de energía típicos de los distintos tipos de imanes” (Keisan, 2016).

Aplicaciones del neodimio en vehículos eléctricos

Numerosos fabricantes de vehículos eléctricos han adoptado imanes de neodimio en sus sistemas de motor para mejorar el rendimiento y la eficiencia. Por ejemplo, el Model S de Tesla utiliza motores basados en imanes de neodimio, lo que contribuye a sus impresionantes capacidades de aceleración y autonomía. De manera similar, otros modelos de vehículos eléctricos, incluidos los de BMW, Nissan y Chevrolet, aprovechan los imanes de neodimio para lograr un rendimiento y una eficiencia energética óptimos (ALB Magnets, s.f.)

El neodimio y otros metales de las tierras raras hacen posibles motores eléctricos con altas densidades de potencia y par. Gracias a los metales de las tierras raras, los motores eléctricos de imanes permanentes alcanzan densidades de potencia y par muy elevadas, algo que, a su vez, aumenta la eficiencia de todo el sistema”, dijo el Dr. Rafał

Piotuch, ingeniero de proyectos de motores eléctricos de Porsche Engineering. (Porsche Newsroom, 2023).

a. Aplicaciones en sensores de vehículos eléctricos

Santana Hernández (2022) utilizó sensores QMC5883L para caracterizar el flujo magnético de imanes de neodimio N35, evaluando distancias de detección y estabilidad del campo magnético. Este enfoque experimental resulta relevante para esta investigación, donde la interacción precisa entre los imanes y los sensores es crucial para garantizar el rendimiento del sistema.

Los sensores y actuadores juegan roles fundamentales en los sistemas de control y monitoreo de los vehículos, y muchos de ellos utilizan imanes. Por ejemplo, los sensores de efecto Hall, que miden la velocidad de las ruedas y otros componentes giratorios, dependen de imanes para detectar cambios en el campo magnético. Esta información se convierte en señales eléctricas que los sistemas de control del vehículo utilizan para tomar decisiones precisas (Magnet Plastic., 2024).

En sensores de temperatura, la temperatura de la batería es un factor de alta prioridad en la gestión del motor, ya que una temperatura extremadamente alta o baja puede afectar el rendimiento y la durabilidad de la batería en el vehículo. Para este caso los imanes de neodimio ayudan a garantizar una precisión y confiabilidad de este tipo de sensores. Estos sensores están montados con un potente imán de boro y neodimio. Se encuentran adaptados para su uso en superficies ferrosas e incluso se puede utilizar en piezas redondas, como tubos (Alutal, s.f.).

b. Aplicación en actuadores de frenos eléctricos

Los imanes de neodimio se utilizan en los actuadores de frenos eléctricos, que controlan la fuerza de frenado aplicada a las ruedas del vehículo. Estos imanes permiten una actuación precisa y sensible de los frenos, lo que mejora la seguridad y el rendimiento, a la vez que reduce los requisitos de mantenimiento en comparación con los sistemas de frenos hidráulicos tradicionales (ALB Magnets, s.f.).

c. Aplicación de dirección asistida eléctrica (EPS)

Los imanes de neodimio se utilizan principalmente en motores de dirección asistida eléctrica en sistemas EPS de automóviles, y sus poderosas propiedades magnéticas pueden mejorar efectivamente la eficiencia y la velocidad de respuesta de los motores, de modo que los conductores se sientan más relajados y cómodos al maniobrar el automóvil (Innorise Magnets, s.f.).

Los sistemas de dirección asistida eléctrica (EPS) utilizan motores eléctricos para ayudar al conductor a girar las ruedas, mejorando la eficiencia del combustible y reduciendo las emisiones de carbono (TY Magnets., s.f.).

La dirección asistida de tipo eléctrica reemplaza los sistemas hidráulicos tradicionales por un sistema controlado electrónicamente, lo cual es más eficiente y preciso en la ejecución. En relación con este contexto, el neodimio se utiliza en:

- Freno regenerativo: Aprovecha la energía cinética perdida durante el frenado y la convierte en energía eléctrica, que se puede almacenar en la batería del vehículo (TY Magnets, s.f.). En un motor eléctrico el cual se encuentra equipado con imanes de neodimio, este puede actuar como un generador durante el frenado. Se puede apreciar de la siguiente forma, cuando el conductor suelta el acelerador o aplica el freno, este sistema de frenado regenerativo, invierte en el funcionamiento del motor, lo cual utiliza la energía cinética del vehículo para la generación de la electricidad. En los vehículos híbridos y eléctricos, los imanes también se pueden utilizar en los sistemas de frenado regenerativo, los cuales convierten la energía cinética en energía eléctrica durante el proceso de frenado. En este caso, el motor actúa como generador y los imanes desempeñan un papel fundamental en la producción de la corriente eléctrica que recarga la batería.
- Frenado eléctrico: Los sistemas de frenos de vehículos eléctricos de vanguardia aprovechan la potencia de los imanes de neodimio para ofrecer soluciones de frenado eficaces. Los imanes de neodimio se encuentran habitualmente en frenos electromagnéticos que utilizan campos magnéticos para crear fricción que frena los vehículos; estos frenos ofrecen un control eficaz, duradero y sensible con capacidades de control precisas para ambas capacidades de frenado regenerativo (Rochester Magnet, 2023).

- Reducción de calor en frenos mecánicos: Al realizar la acción de frenado, los frenos de tipo mecánicos generan calor, esto debido a la fricción, el uso del frenado regenerativo en motores de neodimio reduce la cantidad de calor que se genera. Además, hay que enfatizar que el calor de manera excesiva provoca un desgaste más prematuro de los frenos mecánicos y con el tiempo disminuye su eficacia.

d. Aplicación en la gestión de baterías

Una batería funciona como un dispositivo que almacena energía en forma química, la cual se convierte en electricidad cuando se necesita. Es como un pequeño reactor químico, donde una reacción produce electrones que están listos para moverse a través de un circuito externo, generando energía.

Esto debido a la gestión térmica eficiente es crucial para prolongar la vida útil de la batería y garantizar un funcionamiento seguro. Los imanes de neodimio se utilizan en los sistemas de refrigeración para asegurar las piezas de refrigeración en su lugar. Esto evita el desplazamiento de las piezas de refrigeración, lo que permite un mejor control de la temperatura (TY Magnets, s.f.).

Ventajas de los imanes de neodimio en aplicaciones de vehículos eléctricos

El uso de imanes de neodimio en motores de vehículos eléctricos ofrece varias ventajas:

- Eficiencia Energética: Los motores con imanes permanentes convierten la energía eléctrica en mecánica de manera más eficiente, permitiendo que los vehículos recorran mayores distancias con una sola carga de batería. Esto aumenta la autonomía y reduce la frecuencia de recarga. (Magnet Plastic, 2024).
- Mantenimiento Reducido: Sin la necesidad de escobillas para el conmutador, los motores de imanes permanentes tienen menos partes móviles que se desgasten, lo que resulta en una mayor durabilidad y menores costos de mantenimiento a lo largo del tiempo. (Magnet Plastic, 2024).

- Rendimiento Mejorado: Los motores basados en imanes proporcionan una aceleración más rápida y un rendimiento más consistente en diversas condiciones de conducción, lo cual es crucial para que los VE compitan con los vehículos tradicionales en términos de experiencia de manejo (Magnet Plastic, 2024).

7.1.2 Dispositivos médicos

En equipos del área de la medicina, tal como las resonancias magnéticas, en este caso los imanes de neodimio ofrecen una gran potencia magnética para la obtención de imágenes con alta resolución y así como resultado mejorar la calidad de diagnóstico y precisión de resultados.

Es muy apreciado por sus aplicaciones. Se usa en láseres de neodimio que son YAG (Itrium Aluminium Garnet) dopados con hasta un 1,5 % de Nd³⁺ (Nd:YAG), que se usan en cirugía, para operaciones de cataratas, o en depilación láser (Fernández Garbayo, 2019).

VACUUMSCHMELZE GmbH & Co. KG (VAC), empresa representada en España y Portugal por Anatron, S.A., anuncia la disponibilidad de su gama VACODYM de materiales magnéticos permanentes basados en neodimio que están especialmente indicados en aplicaciones de tecnología médica (Anatron, 2021).

Los imanes permanentes los cuales se encuentran basados en neodimio también están diseñados para llevarlo a cabo en aplicaciones médicas, estos destacan por su alta densidad de energía a temperatura ambiente, también su notable fuerza coercitiva, y su excelente resistencia a la desmagnetización bajo la influencia de campos que son de tipo externos.

La combinación de una elevada densidad de flujo remanente, junto con la máxima calidad tanto del imán como de su revestimiento, y un posicionamiento preciso de los imanes individuales, permite que la gama VACODYM cumpla con los exigentes requisitos de una amplia gama de aplicaciones en sistemas magnéticos.

a. Capsulotomía con láser de Nd: YAG

La cirugía de catarata consiste en extraer la lente natural del ojo o “cristalino” opacificado sin dañar el “saco capsular” dentro del cual se encuentra localizado. El tratamiento consiste en devolver la transparencia a la capsula posterior realizando una abertura en la misma mediante la aplicación de un láser Nd: YAG sin la necesidad de incisiones (Clínica Barraquer, s.f.). En esta capsulotomía se encuentra lo siguiente:

- Los láseres Nd: Los láser Nd-YAG se encuentran entre los dispositivos láser de mayor empleo, aplicándose en el tratamiento oftalmológico de la opacificación capsular tras cirugía de cataratas, o en la realización de una iridotomía como tratamiento preventivo o curativo del glaucoma agudo (Clínica Oftalmológica Nebro, s.f.).

Según Cairo Williams (2017), Este es el procedimiento ideal que da cumplimiento al término de microcirugía no invasiva ocular, dado que, no requiere hospitalización ni preparación preoperatoria del paciente, no es necesario la incisión ni la lesión quirúrgica de diversas estructuras anatómicas para abordar la indicada, no hace falta la anestesia, es imposible la infección, el sangramiento está ausente o es mínimo y la mejoría de la agudeza visual (AV) es rápida, por lo que el paciente puede hacer su vida normal en poco tiempo. Además, se ha demostrado la utilidad de su indicación principal que es la capsulotomía posterior, para solucionar complicaciones relacionadas con la cirugía de catarata y cuya técnica de aplicación es muy similar pues solo varía en el enfoque del objetivo

El láser Nd está compuesto por un cristal de granate de aluminio e itrio (YAG) que ha sido dopado con iones de neodimio (Nd^{3+}). Este cristal actúa como el medio activo del láser. Cuando se excita, el neodimio emite luz con una longitud de onda específica, generalmente en el rango de 1064 nanómetros (nm), en el infrarrojo cercano. El proceso de emisión láser se basa en la amplificación de esta luz a través del cristal de Nd, produciendo un rayo láser potente y coherente, capaz de realizar cortes y tratamientos en tejidos como los del ojo, gracias a su alta energía y precisión.

- Opacidad de la cápsula posterior (OCP): Esta es una complicación que puede ocurrir después de una cirugía realizada de catarata. En otras palabras, es cuando tras una cirugía de cataratas, la parte trasera de la cápsula del cristalino se vuelve

turbia. Esto ocurre porque las células que quedan después de la cirugía comienzan a crecer y formar una capa de color opaco. Esta opacidad puede dificultar la visión y otros síntomas, similar a cómo una ventana sucia puede bloquear la luz, el paciente puede considerar someterse a un procedimiento con láser llamado capsulotomía posterior con láser Nd: YAG para solucionar dicho problema.

Según Bolívar y Castaño (2018), una vez que se ha establecido la OCP, su tratamiento consiste en la realización de una capsulotomía con láser Nd. Dicho tratamiento es efectivo, rápido y fácil de realizar. El neodimium es un láser con una longitud de onda de 1064 nm que produce una disrupción de los tejidos oculares con un pulso corto y de alta potencia.

7.1.3 Tecnología de energía renovable

En cuanto a este ámbito en lo que es la energía eólica, los imanes de neodimio desempeñan un papel fundamental en el funcionamiento de las turbinas eólicas de accionamiento directo. Estas turbinas utilizan el campo magnético generado por los imanes de neodimio para convertir eficazmente la energía cinética del viento en energía eléctrica (Eurobalt, 2024).

El sector de la energía renovable se utiliza en turbinas eólicas, lo que implica grandes parques eólicos en proyección, esto aplicado mediante generadores, sistemas de energía existentes alternativas para realizar una mejora en la generación de energía y además una mayor eficiencia en el sistema y entorno. Por otro lado, al neodimio para este contexto se le conoce como “El motor invisible de la Energía Eólica”.

Las turbinas eólicas convierten el momento rotatorio de un eje en energía eléctrica utilizando el mismo principio de inducción de Faraday que los motores eléctricos. Esta tecnología, una vez más, favorece los imanes permanentes. En 2011, la industria de la energía eólica comenzó a cambiar de los generadores síncronos de imanes permanentes (PMSG) que consumen tierras raras a otros sistemas basados en electroimanes, temerosos de futuras fluctuaciones del mercado de tierras raras como la observada en 2010 (Kim & Jariwala, 2021).

Sin embargo, los PMSG son más ligeros, producen más energía, utilizan menos piezas y requieren menos mantenimiento. A medida que se instalen nuevas turbinas eólicas en plataformas marinas y otras ubicaciones remotas, se prevé que el uso de imanes permanentes en la industria de la energía eólica aumentará una vez más. El Centro Común de Investigación (JRC) de la UE estima que, para 2030, se encontrarán imanes permanentes en más del 70% de las turbinas eólicas en uso (Dodd, 2018).

La adopción generalizada de los imanes de neodimio ofrece varias ventajas para las tecnologías de energías renovables. Su elevada fuerza magnética permite una mayor eficiencia en la generación de energía, lo que se traduce en un aumento de la producción energética y una reducción del impacto medioambiental (Eurobalt, 2024).

Los imanes permanentes se utilizan en el proceso de la generación de energía eólica ya que estos mejoran de manera significativa lo que es la producción. Estos tienen la capacidad de abaratar costes de forma significativa, y de esta forma son capaces de abaratar costes, lo que ofrece al fabricante de turbinas la capacidad para la creación de componentes de una alta eficiencia.

El uso de imanes permanentes en el sector eólico destaca también por su versatilidad, ya que estos pueden ser utilizados en sistemas con diferentes tipos de transmisión. También, son capaces de soportar altas velocidades sin perder su eficacia y sin deteriorarse de forma acelerada (Magnet Plastic, 2024).

- Turbinas eólicas

En el proceso de generación de la energía eólica, ocurre una intervención de diversos elementos, que en conjunto se les conoce como el sector eólico, los aerogeneradores y turbinas eólicas son algunos elementos partes de este conjunto.

Las turbinas eólicas convierten la energía cinética del viento en energía mecánica. Dentro de las denominadas energías renovables, la energía eólica representa la forma más viable y desarrollada de producir energía (López Rodríguez, 2021). Para las turbinas eólicas la media de neodimio que tienen los imanes permanentes es de un 28,5%, además de otras tierras raras. Se están desarrollando otros imanes o máquinas para que no haya tanta dependencia de estos materiales, pero, por el momento, no son tan eficientes ni se están usando (López Rodríguez, 2021).

Los imanes de neodimio se utilizan en los generadores de imanes permanentes, estos generadores se caracterizan por ser más eficientes que los generadores electromagnéticos tradicionales, ya que estos no requieren de una fuente externa de electricidad para la generación del campo magnético necesario para lo que es la producción de energía. Los imanes de neodimio por la alta densidad de tipo magnética permiten que las turbinas eólicas sean de características compactas y livianas, y esto así facilita la instalación, rendimiento y mantenimiento. Cabe destacar que disminuyen las pérdidas por fricción y mejoramiento de la conversión de energía cinética del viento en la electricidad.

Se conoce es una fuente de energía que se genera a partir del aprovechamiento a partir del viento. Este tipo de energía se basa en la conversión de la energía cinética presente en las corrientes de aire en energía eléctrica, este es un proceso que se lleva a cabo mediante una serie de dispositivos y tecnologías las cuales se encuentran diseñadas para esta finalidad.

El principal medio para obtenerla son los aerogeneradores, correspondientes a “molinos de viento” de tamaño variable que transforman con sus aspas la energía cinética del viento en energía mecánica. La energía del viento puede obtenerse instalando los aerogeneradores tanto en suelo firme como en el suelo marino (Generadoras de Chile, s. f.).

Esta energía no solo se limita a convertir el viento en electricidad, sino que involucra un complejo ecosistema de tecnologías, infraestructuras, y procesos industriales que ellos en conjunto, permiten el aprovechamiento de manera eficiente y sostenible uno de los recursos naturales más abundantes y limpios de nuestro planeta, para este caso, el viento.

8.1 INGENIERÍA 5.0 Y APLICACIONES

La Ingeniería 5.0 es conocida como la evolución del enfoque tradicional de la ingeniería, se encuentra influenciada con la llegada de la Industria 5.0.

El neodimio es un metal de tierras raras, que son elementos químicos esenciales en muchas de las tecnologías de hoy en día, desde teléfonos inteligentes hasta pantallas de televisores. El neodimio se utiliza, entre otras cosas, para hacer imanes que hacen funcionar los motores de los vehículos eléctricos (BBC News Mundo, 2020)

Su objetivo principal es hacer que las tecnologías avanzadas y la automatización aumenten la productividad, y además fortalezcan la conexión entre humanos y máquinas, la cual se ve enfocada en valores tales como la sostenibilidad, el bienestar social y la mejora de la calidad de vida. Esta fase 5.0 en el desarrollo de la ingeniería, busca combinar lo mejor de las capacidades humanas con el poder de las tecnologías avanzadas. Se trata de un concepto basado en los avances de la Industria 4.0, donde hacía hincapié en la integración de los sistemas robóticos, el Internet de las Cosas (*IoT*) y el uso de análisis de grandes volúmenes de datos (*Big Data*) para mejorar los procesos de fabricación. Sin embargo, la Industria 5.0 va un paso más allá al destacar la importancia de la participación y la interacción humana en los procesos de fabricación (ATRIA Innovation, s.f.).

a. Enfoque centrado en el ser humano (Human-centric Engineering)

En este enfoque el ser humano se encuentra en el centro del diseño y la implementación de nuevas tecnologías. Se intenta realizar la creación de un entorno de trabajo donde la tecnología se encuentre principalmente al servicio del bienestar del ser humano. En lugar de reemplazar a los humanos con máquinas, se busca facilitar la colaboración entre ambos, permitiendo que las habilidades humanas se complementen con la eficiencia y precisión de la tecnología. El neodimio se utiliza en motores eléctricos de robots colaborativos, que trabajan junto a humanos para tareas seguras y eficientes; en sistemas de generación limpia, promoviendo sostenibilidad y entornos saludables; y en vehículos eléctricos y maquinaria industrial, que reducen ruido y esfuerzo físico.

b. Colaboración máquinas y humanos

Una de las principales diferencias entre la Industria 4.0 y 5.0 es que, en la última, los robots y la inteligencia artificial trabajan de manera colaborativa con las personas. En la nueva Ingeniería 5.0, los robots no son autónomos ni sustituyen a los seres humanos; en cambio, trabajan en equipo con los ingenieros y técnicos para mejorar la productividad y la innovación. Lo cual implica la integración de robots (cobots) y tecnologías que se adapten a las capacidades de los seres humanos.

c. Sostenibilidad y responsabilidad ambiental

Uso de nuevas tecnologías las cuales respeten el medio ambiente. El neodimio contribuye a la sostenibilidad al ser clave en tecnologías como turbinas eólicas y vehículos eléctricos, reduciendo emisiones y promoviendo la energía limpia. Su reciclaje fomenta la economía circular, y su uso en maquinaria eléctrica mejora la eficiencia y disminuye el impacto ambiental en minería. Esto lo posiciona como un recurso esencial responsables con el medio ambiente.

d. Conectividad avanzada y automatización inteligente

En este caso se utiliza tal como el Internet de las Cosas (IoT), la inteligencia artificial y el Big Data, pero va un paso más allá al integrar estas tecnologías con una visión de manera más amplia y humana. En este sentido, la inteligencia artificial se convierte en un socio estratégico para los ingenieros, lo cual ayuda en la toma de decisiones de una manera más informada y concisa basadas en datos ocurridos en tiempo real.

e. Manufactura avanzada

Las fábricas inteligentes operan de manera eficiente gracias a la automatización y los robots colaborativos, además, incorporan un nivel de personalización masiva que permite adaptarse a las necesidades específicas que presentan los consumidores sin sacrificar lo que es la productividad. Los robots colaborativos conocidos como cobots, trabajan al mismo tiempo con los humanos en líneas de producción, combinando la capacidad de las máquinas para realizar tareas repetitivas y precisas con la creatividad y la capacidad de toma de decisiones de las personas.

Llevando esto al contexto de la Ingeniería 5.0, la personalización masiva que ofrece la manufactura avanzada se ve beneficiada por el uso de motores compactos y eficientes que dependen de los imanes de neodimio. Estos motores son clave en sistemas robóticos, incluyendo robots colaborativos, conocidos como, cobots, que trabajan en conjunto con humanos en fábricas inteligentes.

f. Salud

La Ingeniería 5.0 tiene un impacto significativo en el diagnóstico y tratamiento de enfermedades, así como en la mejora de la calidad de vida de los pacientes en cuestión. Por ejemplo, los sistemas de apoyo basados en inteligencia artificial pueden analizar grandes volúmenes de datos médicos, permitiendo a los profesionales de la salud tomar decisiones de una manera más rápida y precisa en diagnósticos y tratamientos de cada paciente. Otro avance clave en esta área es el uso de dispositivos portátiles inteligentes que monitorean la salud del paciente en tiempo real, lo que permite a los médicos ajustar tratamientos de manera proactiva para sus pacientes ya sea en cualquier etapa que se encuentren.

Los imanes de Neodimio se utilizan en una variedad de dispositivos médicos y tecnologías las cuales son innovadoras. Un ejemplo claro, es el uso en máquinas de resonancia magnética (MRI), donde los imanes potentes y estables son muy necesarios para generar imágenes detalladas del cuerpo humano eficientes y sin radiación ionizante. En la Ingeniería 5.0, la integración de estos dispositivos avanzados con inteligencia artificial mejora la capacidad en lo que es el diagnóstico para el paciente.

Los imanes de Neodimio se utilizan en dispositivos portátiles de monitoreo en el área de la salud, tal como, sensores implantables y audífonos, donde se requiere precisión, miniaturización y fiabilidad eficaz.

g. Automotriz

Este es otro campo que se está observando una transformación de manera significativa gracias a lo que es la Ingeniería 5.0. Los vehículos autónomos y vehículos eléctricos inteligentes no solo están diseñados para ser más eficientes y también sostenibles, sino que también integran sistemas avanzados de comunicación. Los vehículos autónomos utilizan inteligencia artificial y sensores avanzados para la toma de decisiones en tiempo

real, así interactuando con su entorno de manera segura y eficiente. Además, los sistemas de advertencia de colisión y otras tecnologías en la seguridad permiten que los humanos mantengan el control mientras los sistemas automáticos ayudan en la prevención de accidentes. La personalización de forma masiva en el diseño de automóviles también permite que los consumidores puedan realizar una adaptación de sus vehículos a las preferencias personales y necesidades, tanto en funcionalidad como en diseño. El Neodimio juega un papel crucial en lo que es la industria automotriz, especialmente en el desarrollo de vehículos eléctricos futuros (EVs) y sistemas de conducción autónoma, elementos centrales en la transformación hacia la sostenibilidad dentro de la Ingeniería 5.0.

Los motores de este tipo de vehículos eléctricos dependen de los imanes de neodimio para proporcionar alta eficiencia energética en un espacio compacto, en esto se aprecia la mejora en la autonomía del vehículo y también reduce la huella de carbono. Asimismo, los sistemas avanzados de detección y sensores de proximidad en vehículos autónomos, que ayudan a prevenir accidentes e incidentes, y dependen de tecnologías basadas en imanes de Neodimio para su posterior funcionamiento.

h. Energía y sostenibilidad

En la Ingeniería 5.0 está impulsando la transición hacia un modelo eficiente y más sostenible. Se incluye la integración de energías renovables como la solar, eólica y geotérmica. Los sistemas de gestión energética utilizan inteligencia artificial y el análisis de datos para optimizar el consumo de energía en tiempo real, reduciendo el desperdicio y mejorando la eficiencia operativa de las infraestructuras energéticas.

Los imanes de neodimio son fundamentales en la transición para las energías renovables, ya que se utilizan en generadores de turbinas eólicas y otros sistemas de generación de una energía más limpia. Los imanes que se utilizan en esta energía presentan una alta eficiencia y la capacidad para soportar grandes cargas y generar fuertes campos magnéticos los cuales hacen que este tipo de imanes sean ideales para maximizar la generación de electricidad en este tipo de sistemas.

i. Construcción y urbanismo

La Ingeniería 5.0 se encuentra en la ayuda para la creación de ciudades inteligentes y edificios más sostenibles. Se permite a los ingenieros y arquitectos modelar digitalmente infraestructuras antes de ser construidas, lo que mejora la eficiencia en el diseño y la gestión de proyectos asociados a la construcción. Los modelos digitales se utilizan para gestionar edificios inteligentes, en los cuales los sensores y sistemas automatizados optimizan el uso de energía, agua y otros recursos en tiempo real.

Por otro lado, los materiales de construcción avanzados son desarrollados a partir de nanotecnología y biomateriales, ellos permiten la construcción de estructuras ligeras, resistentes y sostenibles.

En la construcción de edificios inteligentes y en la creación de ciudades inteligentes, los sensores magnéticos basados en imanes de Neodimio son una tecnología de forma clave. Los sensores se aplican en sistemas de control de acceso, monitoreo de infraestructura y automatización en las construcciones. Los sensores mencionados con anterioridad permiten realizar un monitoreo en tiempo constante en el funcionamiento de la infraestructura y ajustarlos para maximizar la eficiencia energética y la comodidad del ser humano. Por otro lado, se tienen, los motores eléctricos eficientes, estos basados en imanes de neodimio, y son críticos en sistemas de ventilación, elevación y climatización en la construcción de edificios sostenibles.

j. Agricultura y alimentación

El sector agrícola se encuentra en ejecución de tecnologías de la Ingeniería 5.0 para enfrentar desafíos como el crecimiento de la población y lo que es el cambio climático.

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) es una de las hortalizas de hoja más producidas a nivel mundial. Se le cultiva de manera intensiva a cielo abierto, en invernadero o en sistemas hidropónicos. El cambio climático afecta negativamente la producción de esta hortaliza, lo que hace necesaria la búsqueda de alternativas que mejoren su cultivo. El neodimio (Nd) es un metal que pertenece al grupo de los lantánidos y a los elementos de las tierras raras; su aplicación es especies cultivadas puede mejorar indicadores de crecimiento y producción (TecNM, 2020).

El uso del neodimio en este sector agrícola es menos directo, pero las tecnologías derivadas de los imanes de neodimio se utilizan en sistemas de separación magnética para la limpieza de semillas, la eliminación de impurezas en la producción de alimentos agrícolas.

La lechuga (*Lactuca sativa* L.) se produce de manera intensiva y se considera una de las plantas más importantes del grupo de hortalizas de hoja, debido a su fácil empleo en la alimentación humana, su sabor y características nutricionales que contribuyen a incrementar la nutrición en las personas (Santos-Filho et al., 2009).

k. Educación

Para este caso, la Ingeniería 5.0 promueve un enfoque personalizado y colaborativo en la educación y enseñanza. Las plataformas de aprendizaje que se encuentran basadas en la inteligencia artificial permiten adaptar los contenidos a las necesidades individuales de cada estudiante, ya sea de manera individual o colectiva, facilitando un aprendizaje más efectivo. Además, la realidad virtual (VR) y la realidad aumentada (AR) ofrecen experiencias de aprendizaje distintas, ayuda a los estudiantes en la interacción con entornos simulados para mejorar su comprensión de conceptos complejos y asignaturas más difíciles de procesar. Estas tecnologías son valiosas en todo nivel Educativo, tal como formación de ingenieros, médicos y otros profesionales, permitiendo la simulación de escenarios reales en un entorno seguro y ayudando en su buena, clara y completa formación.

Los imanes de Neodimio se utilizan en herramientas de enseñanza, como los robots y dispositivos electromagnéticos para prácticas en laboratorios de área de la salud e ingeniería. Los robots permiten a los estudiantes comprender mejor el funcionamiento de los motores, esenciales en la tecnología 5.0. Además, en simulaciones educativas que emplean realidad virtual y aumentada, las tecnologías de control de movimiento y los sistemas hápticos pueden depender de imanes de Neodimio para ofrecer experiencias educativas inmersivas. El Neodimio tiene variadas aplicaciones educativas, especialmente a través de sus imanes. En clases de física e ingeniería, los imanes de neodimio se usan en kits para armar motores eléctricos, hacer experimentos de levitación magnética y mostrar principios como la inducción electromagnética o el frenado magnético. Además, sus sensores magnéticos se utilizan en simulaciones educativas, como laboratorios virtuales y tecnologías de realidad virtual, donde los estudiantes pueden interactuar con objetos digitales. También son clave en la robótica

educativa, permitiendo a los estudiantes trabajar con motores y sensores, y en la enseñanza sobre energías renovables, ya que estos imanes son fundamentales en tecnologías como los generadores eólicos.

I. Supervisión humana en procesos automatizados con tecnología de neodimio

En una planta industrial, los motores eléctricos con imanes de neodimio manejan la maquinaria de forma automatizada, pero los operadores humanos pueden intervenir cuando es necesario. Pueden ajustar los parámetros, corregir cualquier error o adaptar las máquinas a nuevas necesidades de producción. Esto garantiza que, aunque la automatización haga gran parte del trabajo, las decisiones importantes siguen estando a cargo de las personas.

En la Ingeniería 5.0, la intervención humana es esencial para equilibrar la eficiencia de los sistemas automatizados. Los imanes de Neodimio, fundamentales en los motores de robots y máquinas industriales de forma automatizadas, permiten que las tareas repetitivas o de alta precisión se realicen de forma eficiente y segura. Se deja en claro que siempre se requiere la intervención humana para ajustar o corregir los procesos según el contexto de la operación que se asigne.

9.1 LA IMPORTANCIA DEL NEODIMIO EN LA CADENA GLOBAL DE TIERRAS RARAS

El neodimio no se encuentra comúnmente en la naturaleza en su forma pura o como un elemento libre. Se encuentra principalmente como parte de minerales, como la Bastnasita y la Monacita, que son ricos en las tierras raras. Estos minerales contienen una mezcla de varios metales de tierras raras, de los cuales el Neodimio es solo una fracción. Su extracción y procesamiento requieren técnicas especializadas para separar el neodimio de otros elementos presente. Por otro lado, debido a su alta demanda en aplicaciones tecnológicas e industriales, el proceso de purificación del neodimio es clave para asegurar su disponibilidad en el mercado global.

Si bien se estima que las reservas mundiales de neodimio ascienden a 8 millones de toneladas, la extracción, difícil y potencialmente perjudicial para el medio ambiente, hace que este metal estratégico sea tan valioso (Strategic Metals Invest, 2024).

El neodimio es el material magnético permanente más fuerte descubierto hasta ahora. Se utiliza ampliamente en micrófonos, altavoces profesionales, auriculares, discos duros de computadoras, motores eléctricos y generadores. Es un mineral de tierras raras principalmente extraído en China, Estados Unidos, Brasil, India, Sri Lanka y Australia (Trading Economics, 2024).

En cuanto a la minería de tierras raras, Chile no es reconocido como un productor a nivel mundial, ya que históricamente es China, el mayor productor mundial de este tipo de elementos, contando con importantes reservas. China actualmente produce el 90% de la oferta mundial de Neodimio. La posición dominante de China en la producción de tierras raras se considera a los orientales como un actor clave en el mercado global de tierras raras y ha ejercido una influencia significativa en los precios y suministros. En el continente americano, Estados Unidos tiene varios yacimientos, aunque actualmente su producción ha disminuido considerablemente, y ahora es más dependiente de las importaciones. Un caso singular es Australia, con importantes yacimientos en el área occidental y que ha comenzado a aumentar su producción. Otro ejemplo, lo constituye

Rusia, con grandes reservas y una importante participación en el mercado mundial. Entre los elementos pertenecientes al grupo de las tierras raras, uno de los que mayor demanda presenta es el neodimio (Nd). Otra de las características que hacen interesante el uso de este tipo de elementos, es que permite fabricar imanes muy compactos, livianos y con una alta fuerza magnética (González C., 2024).

Entre los elementos pertenecientes al grupo de las tierras raras, uno de los que mayor demanda presenta es el Neodimio (Nd) (Brovelli Sepúlveda, 2023).

10.1 COMPORTAMIENTO HISTÓRICO DEL MERCADO GLOBAL: NEODIMIO

El Neodimio es una de las tierras raras más importantes en términos respecto a demanda. Según el informe entregado por Cochilco (2016), en el año 2014, la demanda global en cuanto neodimio fue de 21,000 toneladas, con una proyección de aumento a 36,500 toneladas para el año 2020 (Comisión Chilena del Cobre (Cochilco, 2016).

La importancia de este material radica en su gran capacidad para la formación de imanes extremadamente potentes, es decir, más fuertes que los tradicionales que son de ferrita o alnico. El 60% de la utilización del neodimio se encuentra presente en la fabricación de imanes permanentes, en especial para vehículos eléctricos e híbridos, y en la generación de energía limpia, como turbinas eólicas (Cochilco, 2016).

En el ámbito de la energía verde, el neodimio juega un papel crucial en cuanto a la energía eólica y la aplicación en vehículos híbridos. En el sector eólico, los imanes de neodimio se utilizan en los generadores de turbinas, esto lleva a permitir una mayor eficiencia y generación de energía. En los vehículos híbridos, el neodimio se emplea en motores eléctricos y generadores para optimizar tanto el rendimiento como también la eficiencia energética.

En cuanto a los bienes de uso diario, el neodimio se utiliza en una gran variedad de aplicaciones. Entre ellas, imágenes de resonancia magnética (IRM), donde los imanes de neodimio contribuyen a obtener imágenes de alta resolución para diagnósticos en el área de la salud. Además, el neodimio se encuentra en fuentes de energía sin cable, tales como cargadores inalámbricos para tabletas y celulares, proporcionando una carga eficiente y también conveniente.

Finalmente, en el ámbito de la defensa, el neodimio se aplica en dispositivos de orientación y control, así como en sistemas de vigilancia y protección. Los imanes de neodimio mejoran la precisión y la capacidad de los sistemas de navegación y control, así como la eficacia en los equipos de vigilancia.

10.1.1 Movimiento histórico del precio del Neodimio

El neodimio, cuyo precio actual es de 97,24 dólares por kg, ha sufrido una pérdida del -14,10% desde principios de 2024. Ha perdido un -53,54% desde enero del año pasado. En comparación con su precio de 109,70 dólares por kg el 1 de enero de 2021, ha sufrido una pérdida del -11,36% en valor. Si nos remontamos al 1 de enero de 2018, cuando el coste del neodimio era de 70,04 dólares por kg, este metal de tierras raras ha ganado un +38,83% .

China, con el 85% de la producción mundial en 2015, ha mantenido su liderazgo en el mercado (Cochilco, 2016).

Tabla 2. Precios históricos y cambios de valores del Neodimio.

Fecha	Precio del Neodimio (US\$/kg)	Cambiar % al día de hoy	Cambio anual %
Diciembre 09/2024	99.33		
Enero 1/2024	113.20	-12.25	
Enero 1/2023	209.30	- 52.54	-45.91
Enero 1/2022	222.80	- 55.42	-6.06
Enero 1/2021	109.70	- 9.45	+103.10
Enero 1/2020	65.00	+52.82	+68.77
Enero 1/2019	66.05	-1.59	-1.59
Enero 1/2018	70.04	+41.82	-5.70

Fuente: Strategic Metals Invest (2024). Elaboración propia.

11.1 FACTIBILIDAD ECONÓMICA

La viabilidad económica del neodimio se basa en el análisis de los costos, la demanda del mercado y el posible retorno de inversión (ROI). Es fundamental examinar todos estos factores en gran detalle para evaluar la viabilidad de proyectos que incorporen el neodimio en sus aplicaciones y procesos de tipo industrial.

El mercado de neodimio ha demostrado fluctuaciones significativas en su precio. Entre el año 2006 y 2011, el valor del Óxido de Neodimio, subió de 23.75 US\$/kg a 396.75 US\$/kg, esto, principalmente debido a las restricciones de exportación China durante el año 2010. Tras una desaceleración económica, el precio se estabilizó a 39.5 US\$/kg en el año 2016 (Cochilco, 2016).

11.1.1 Demanda

Las tecnologías de energía limpia representan diferentes porcentajes de la demanda total de los distintos elementos. El neodimio es el 7% de la demanda para las turbinas eólicas (López Rodríguez, 2021).

Los costos de producción juegan un papel crucial en la viabilidad económica del Neodimio. En este caso se presenta el costo de materia prima, en el cual el neodimio, es un elemento de las tierras raras, y se caracteriza por su escasez y por ser crucial en la fabricación de imanes permanentes con una alta potencia.

Para 2030, la demanda de imanes permanentes podría crecer de 50 kt a 225 kt por año, con 180 kt provenientes de vehículos eléctricos y 50 kt de turbinas eólicas (Ma y Henderson, 2021).

Si esto resulta cierto, el déficit de suministro de imanes NdFeB podría alcanzar 135 kt para 2030, impulsado en gran medida por el crecimiento de las industrias de vehículos eléctricos y turbinas eólicas (Ma y Henderson, 2021). La demanda combinada de vehículos eléctricos y turbinas eólicas podría duplicar la demanda de los REE utilizados en imanes permanentes entre ahora y 2030 (Gielen & Lyons, 2022).

El neodimio forma hasta un 18% del metal Misch, un material que es usado para hacer piedras de mecheros. El neodimio también es un componente del cristal didimio, que se usa para hacer ciertos tipos de gafas protectoras para soldadores y sopladores de vidrio (Lenntech, s.f.).

Los imanes de tierras raras están presentes en varios componentes de los automóviles (Fears, 2021), pero los motores representan la mayor parte de su uso (Gielen & Lyons, 2022). Solo los vehículos eléctricos (EV) se espera que representen alrededor del 25 % del consumo de imanes de neodimio-hierro-boro (NdFeB) en 2030 (Adamas Intelligence, 2021). Los motores de tracción para vehículos (incluidas bicicletas eléctricas, scooters y motocicletas) capturarán el 23 % del mercado (Gielen & Lyons, 2022).

Al combinar las proyecciones de ventas de vehículos eléctricos con las previsiones sobre el uso continuado de imanes permanentes, se obtiene una proyección de hasta 225 kilotoneladas (kt) en la posible demanda de imanes NdFeB para 2030 (Ma y Henderson, 2021).

Según el último informe de investigación de Transparency Market Research sobre el mercado global de neodimio para el año histórico 2020 y el período de pronóstico 2021 a 2031 , el aumento en el uso de neodimio en tecnologías de energía verde e imanes permanentes son factores clave que se espera que impulsen el mercado global de neodimio durante el período de pronóstico. En términos de ingresos, se espera que el mercado mundial de neodimio alcance los 3,400 millones de dólares estadounidenses para 2031 , con una CAGR del 8 % durante el período de pronóstico (Transparency Market Research, 2024).

En general, la actividad de patentes en imanes NdFeB subraya la importancia estratégica de estos materiales en tecnologías clave como los vehículos eléctricos, las turbinas eólicas y otros sistemas de energía renovable. A medida que la demanda global de imanes permanentes continúe creciendo, es probable que la competencia por la innovación tecnológica en este campo también aumente (Gielen & Lyons, 2022).

11.1.2 Oferta

Sin embargo, la demanda de REE en China es tan alta que ha superado consistentemente la oferta doméstica durante los últimos cinco años, lo que ha llevado a un aumento en las importaciones (Gielen & Lyons, 2022).

Mientras que China representó aproximadamente el 58 % de la minería, en 2020 fue responsable del 85 % del procesamiento. Además de las operaciones chinas, alrededor de 24 kilotoneladas (kt) de mineral de Australia fueron procesadas en Malasia en 2020 (aproximadamente el 10 % de la producción mundial), mientras que el resto fue procesado en Estonia (Gielen & Lyons, 2022).

Los precios de las REE son difíciles de rastrear en tiempo real porque, a diferencia del oro y la plata, no son materias primas que se comercializan en bolsas públicas globales. Sin embargo, firmas comerciales como Argus publican evaluaciones de precios regulares, basadas en encuestas a participantes del mercado que monitorean las tendencias de las REE y los productos en los que se utilizan. Firmas de análisis y foros de precios, como Adamas Intelligence, ISE, Stormcrow Capital, Technology Metals Research y Asian Metal, también incluyen pronósticos de precios en sus informes (Pistilli, 2021).

Según el USGS (2021), Groenlandia posee las mayores reservas de depósitos de tierras raras no explotados, en particular de neodimio (Gielen & Lyons, 2022).

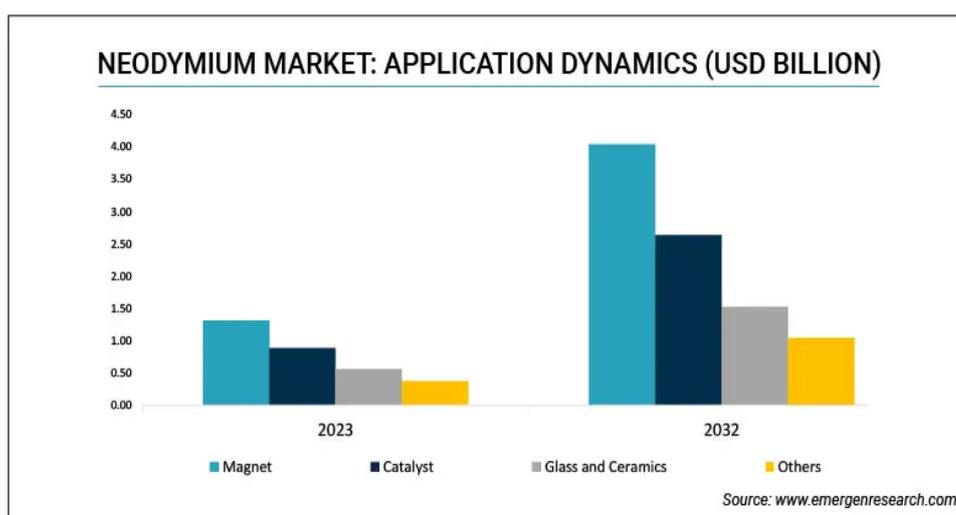
Reservas globales de este elemento se estima en 8 Mt, lo que lo convierte en el segundo REE más abundante después del cerio. Aunque las reservas son suficiente, aumentar la oferta a corto y medio plazo puede resultar difícil (Gielen & Lyons, 2022).

11.1.3 Producción global

En el año 2022, la producción mundial de Neodimio se estimó en aproximadamente 22,000 toneladas de contenido de Neodimio, con China siendo su mayor productor, representando alrededor del 80% de la producción a nivel global. “El tamaño global del mercado de neodimio fue de USD 2.83 millones en 2022 y se espera que registre una tasa compuesta anual de ingresos rápida del 12,3 % durante el período pronóstico. Creciente popularidad de Vehículos Eléctricos (VE), rápida expansión del sector de las energías renovables, especialmente en energía eólica, y la creciente adopción de

imanes de neodimio-Hierro-Boro (NdFeB) en electrónica, automoción y aeroespacial las industrias son factores importantes que impulsan el crecimiento de los ingresos del mercado” (Emergen Research, 2023).

Gráfica 3. Dinámica del mercado del neodimio en términos de aplicaciones principales 2023-2032



Fuente: Emergen Research (2024).

Sobre la base del uso final, el mercado mundial de neodimio se segmenta en automoción, electricidad y electrónica, energía eólica y otros. Se espera que el segmento automotriz registre la tasa de crecimiento de ingresos más rápida en el mercado mundial de neodimio durante el período pronóstico. Esto se atribuye a la creciente demanda de vehículos eléctricos debido a las crecientes preocupaciones ambientales y los incentivos gubernamentales (Emergen Research, 2023).

En la gráfica 3, se muestra la evolución del mercado del neodimio entre 2023-2032, destacando cuatro aplicaciones clave: magnetos, catalizadores, vidrio y cerámicas, y otros. En 2023, los magnetos lideran el mercado con 1.5 mil millones de dólares, seguidos de los catalizadores y el vidrio/cerámicas, mientras que el segmento "Otros" es el menos significativo. Para 2032, se proyecta que los magnetos continúen dominando, alcanzando 4 mil millones de dólares, impulsados por la electrificación y las energías renovables.

12.1 MERCADO MUNDIAL DE NEODIMIO

Gráfica 4. Neodimio - Contrato de Futuros – Precios (2023-2024).



Fuente: Trading Economics (2024).

La gráfica 4, muestra la evolución del precio del neodimio en el mercado con fecha desde noviembre del año 2023 hasta septiembre del año 2024. Se visualiza una caída en los precios del neodimio entre noviembre de 2023 y marzo de 2024, seguida de una ligera recuperación entre abril y junio. A partir de julio, los precios aumentan significativamente, impulsados por la mayor demanda en energías renovables y vehículos eléctricos. Después de alcanzar su nivel más alto en septiembre, los precios se estabilizan, reflejando un ajuste a nuevas condiciones de oferta y demanda. En general, el mercado muestra volatilidad, pero con una tendencia de recuperación hacia finales de 2024.

Gráfica 5. Mercado mundial de neodimio: tendencias de la industria y pronóstico hasta 2029.



Fuente: Data Bridge Market Research (2022).

Data Bridge Market Research analiza que el mercado de neodimio se valoró en USD 554,83 millones en 2021 y se espera que alcance los USD 783,00 millones para 2029, registrando una CAGR del 4.40% durante el período de pronóstico de 2022 a 2029 (Data Bridge Market Research, 2022).

Industrias como la automotriz, la electrónica y la atención médica han sido testigos de la innovación y el desarrollo, impulsando la demanda de imanes de neodimio. En 2021, aproximadamente el 85% de los fabricantes de automóviles utilizaron motores de imanes permanentes incorporados en neodimio, y la demanda automotriz de tierras raras aumentó un 25% en 2022 (Mordor Intelligence, s.f.).

Gráfica 6. Mercado mundial de neodimio por productos.



Fuente: Data Bridge Market Research (2022).

12.1.1 Evolución del Precio del Neodimio entre Noviembre 2023-Septiembre 2024

Durante noviembre 2023 - marzo 2024, el precio de este elemento experimenta una clara tendencia a la baja, lo cual es un cambio positivo. A inicios del año 2024, los precios caen abruptamente, esto podría encontrarse relacionado con una sobreoferta de este elemento en el mercado, reducciones en la demanda industrial, o la implementación de políticas económicas que afectaron su comercialización. Este descenso es significativo y duradero, tocando su punto más bajo a finales de marzo del año 2024.

Por otro lado, durante el período de abril - junio 2024, el precio del neodimio se encontraba estabilizado en niveles bajos, pero con leves fluctuaciones. Este apreciado comportamiento podría deberse a la consecuencia de un equilibrio temporal entre la oferta y la demanda, y posiblemente influenciado por una estabilización en el mercado global de tecnología o energías de tipo renovables, los cuales son sectores que dependen del neodimio para sus procesos de producción e industrialización.

Finalmente, a partir de mediados de 2024, es decir, Julio - septiembre 2024, se logra la observación de una recuperación en los precios, con un incremento muy notable a partir del mes de julio de 2024. Este aumento podría encontrarse vinculado a un repunte en la demanda por parte de la industria de energías renovables y automotriz, sectores clave en la transición hacia tecnologías más limpias. El crecimiento continuo en la demanda de vehículos eléctricos y la expansión de la infraestructura de energías renovables probablemente impulsaron en esta alza. Por otra parte, hacia el mes de septiembre del año 2024, los precios comienzan con una estabilización, aunque en un nivel superior al observado durante el primer semestre del año en cuestión.

12.1.2 Causas de la variación en el precio el neodimio

- Disponibilidad de recursos

La producción de neodimio se encuentra altamente concentrada en unas pocas minas, principalmente en el país de China. Cualquier interrupción en la cadena de suministro, ya sea por huelgas, accidentes de tipo humano o natural y además problemas logísticos, podrían afectar la oferta global y, por lo tanto, verse afectado totalmente en el precio.

- Políticas de tipo gubernamental

Los gobiernos de los países productores y consumidores de neodimio pueden imponer tarifas o incentivos que impacten directamente en la oferta y la demanda. Por ejemplo, podrán imponer ciertas restricciones a las exportaciones de este elemento.

El aumento de la asistencia gubernamental para vehículos eléctricos en todo el mundo actúa como una oportunidad para el crecimiento del mercado en un futuro próximo (Mordor Intelligence, s.f.).

- Costos en el área de la producción

Los gastos de índole operativa, tal como relacionados con la extracción y procesamiento del neodimio, pueden afectar el precio final del producto. Si los

costos de mano de obra o el transporte aumentan, es probable que esto se refleje en un aumento de precios del neodimio.

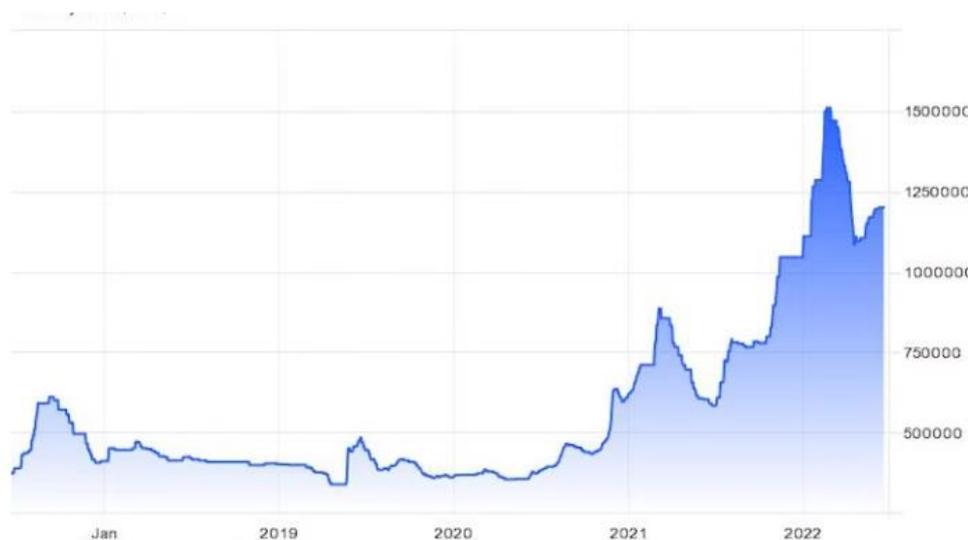
- Tecnologías desarrolladas en el reciclaje

El neodimio tiene la capacidad de reciclaje, como por ejemplo en productos en desuso, como imanes de equipos electrónicos de utilización en el hogar. Entonces un avance significativo en las técnicas de reciclaje podría disminuir la presión sobre la oferta y, por este motivo, la moderación de precios.

- Incremento en demanda de neodimio

En sectores como el de los vehículos eléctricos y la energía eólica, que requieren imanes de neodimio para sus productos, la demanda ha aumentado considerablemente. Estos esfuerzos, que apuntan a la transición energética, son algunos de los factores responsables del aumento de los precios de los imanes de neodimio (Supermagnete, 2021 - 2022).

Gráfica 7. Evolución del precio del neodimio de junio de 2017 a junio de 2022



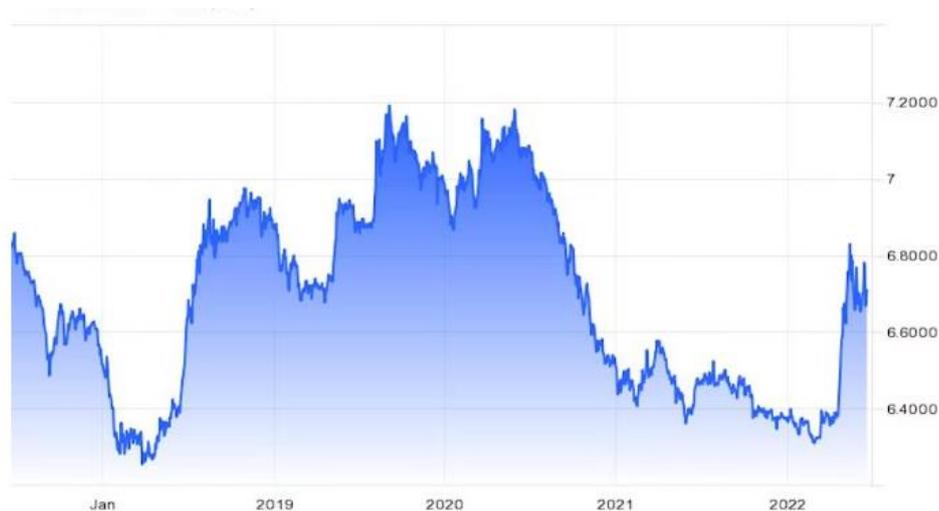
Fuente: Extraído de tradingeconomics.com (s.f.).

- Incremento de los costes de transporte

Así como ocurrió durante la pandemia COVID-19 y se vio afectada el comercio producto del transporte, en cualquier ocasión de este tipo, que se afecte de manera directa el transporte, será un factor clave para el incremento de los costes de transporte en este contexto.

El aumento repentino del comercio electrónico causado por la COVID-19 ha disparado la demanda del transporte en contenedores por barco desde China. A ello hay que añadir que, al mismo tiempo, la capacidad de carga de los aviones de pasajeros ha disminuido drásticamente debido a la falta de vuelos. Esta evolución ha resultado en el aumento de los costes de transporte (Supermagnete, 2021-2022).

Gráfica 8. Evolución de los precios USD/CNY de junio de 2017^a junio de 2022



Fuente: Extraído de tradingeconomics.com (s.f.).

- Aumento del tipo de cambio del RMB en comparación con el USD

Desde que se recuperó la economía de China tras el confinamiento de 2020, la moneda china, en este caso, el renminbi (RMB o yuan), dejó demostrado un fortalecimiento en comparación con el dólar estadounidense. Esto ha llevado a un incremento en los costos de las materias primas, ya que el cambio de divisas ha afectado significativamente los precios.

En comparación con 2020, este se encuentra a aprox. -3 % (fecha: 17 de junio de 2022) y los proveedores nos lo añaden a los precios de compra ya que ellos, a su vez, pagan los productos primarios y los costes de producción en la moneda local, que es el RMB. Desde finales de abril de 2022, el tipo de cambio del dólar estadounidense se ha recuperado frente al yuan renminbi, en parte debido al cierre de Shanghái y a la consiguiente reducción del rendimiento económico (Supermagnete, 2021 - 2022).

- Fluctuaciones en la demanda de algunos sectores específicos

Cambios en la demanda de industrias clave, como la automotriz, la electrónica de consumo o la industria de energía renovable, pueden afectar los precios. Si la adopción de autos eléctricos o tecnologías de energía eólica crece rápidamente, la demanda de neodimio también aumentará por motivos económicos que se dan en estas instancias.

A corto plazo, se espera que la creciente demanda de imanes de neodimio de las industrias de energía eólica y vehículos eléctricos impulse el crecimiento del mercado (Mordor Intelligence, s.f.).

12.1.3 Proyecciones de crecimiento y tendencias del mercado de neodimio

Este aumento esperado se debe a una combinación de variados factores económicos, tecnológicos y también ambientales, los factores se encuentran impulsando la demanda de neodimio, un metal de tierras raras que juega un papel esencial en diversas industrias clave para la industrialización global.

El mercado se vio obstaculizado por la pandemia de COVID-19, ya que los confinamientos, las distancias sociales y las sanciones comerciales provocaron interrupciones masivas en las redes de la cadena de suministro mundial. Las industrias automotrices y de transporte experimentaron una disminución debido a la interrupción de las actividades en todo el mundo. Sin embargo, la condición se recuperó en 2021, lo que ahora se espera que beneficie al mercado durante el período de pronóstico (Mordor Intelligence, s.f.).

A corto plazo, uno de los principales motores del crecimiento del mercado es la creciente demanda de imanes de neodimio en la industria de generación de energía eólica y fabricación de autos de tipo eléctrico. Los aerogeneradores modernos utilizan grandes cantidades de estos imanes para transformar la energía cinética del viento en electricidad de manera muy eficiente. A medida que en todo el mundo se intensifican los compromisos con la transición hacia fuentes de energía renovable, se espera que la demanda de estos imanes permanentes de neodimio continúe aumentando en gran medida. Cabe destacar que, la creación de los vehículos eléctricos se encuentra contribuyendo significativamente al crecimiento en el área de este mercado. Los motores eléctricos de estos vehículos requieren imanes permanentes potentes para funcionar de manera eficiente, lo que ha generado una gran demanda de neodimio, el elemento perfecto para la creación de ellos.

No obstante, a pesar de estas oportunidades de crecimiento, uno de los principales obstáculos es la disponibilidad de sustitutos más económicos para los imanes de neodimio, tal como podrían ser los imanes de ferrita. Aunque los imanes de ferrita no tienen las mismas propiedades magnéticas que los de neodimio, son considerablemente más baratos de producir, lo que los convierte en una opción atractiva para aplicaciones de menor demanda de potencia. Por lo tanto, este factor limita el crecimiento del mercado de neodimio, ya que algunas industrias optan por estos materiales más

baratos, y no es tan importantes para ellos la calidad, sino que el valor de la ferrita les es más atractivo especialmente en tiempos de incertidumbre económica.

Sin embargo, el aumento en el desarrollo y adquisición de vehículos eléctricos representa una oportunidad atractiva y significativa para el crecimiento del mercado de neodimio en los años futuros. A nivel global, los gobiernos se encuentran en la implementación de políticas para reducir las emisiones de carbono y optar por las tecnologías futuras más limpias. Este tema podría incluir incentivos de tipo fiscal y subsidios para la fabricación y compra de vehículos eléctricos, para las personas, lo que a su vez impulsa una gran demanda de imanes de neodimio, un componente como ya se sabe, clave en la creación de los motores de estos vehículos, y así obtener un aire mucho y vida mucho más sustentable.

Geográficamente, la región de Asia-Pacífico ha dominado históricamente el mercado de neodimio y se espera que continúe liderando durante el período de pronosticado. Países tal como, China e India son los principales consumidores de este metal, impulsados por el rápido crecimiento de las industrias de transporte y manufactura en sus países. De forma particular en China, la demanda de neodimio ha sido impulsada por su posición como líder global en la producción de vehículos eléctricos y energías de tipo renovables. Además, este país cuenta con abundantes reservas de neodimio y entre ellas otros elementos de las tierras raras, lo que hace una fortaleza aún más en su papel dominante en lo que es el mercado global.

El mercado de neodimio se encuentra en camino para registrar un fuerte crecimiento durante los años futuros, impulsado principalmente por la creciente demanda de la fabricación de imanes de neodimio en sectores clave como la energía eólica, los vehículos eléctricos, el área de la medicina y electrodomésticos utilizados en el hogar.

Aunque el neodimio enfrenta varios desafíos, como la competencia de minerales más económicos, cumpliendo una función similar, las oportunidades de crecimiento impulsadas por la transición hacia una economía baja en carbono y el apoyo gubernamental a las tecnologías limpias son factores que se espera que impulsen el mercado en un futuro próximo. Además, el dominio en Asia-Pacífico, con su firme infraestructura industrial y abundantes reservas presentes de neodimio, continuará siendo un factor determinante en la evolución del mercado mundial.

- Segmento automotriz

La aleación de neodimio, hierro y boro se utiliza para fabricar el imán permanente conocido como NdFeB. En 2022, la demanda mundial de imanes permanentes de neodimio-hierro-boro (NdFeB) alcanzó las 16.100 toneladas. Se prevé que la demanda mundial de elementos de tierras raras para imanes permanentes que se utilizarán en aplicaciones industriales aumente a 7.000 toneladas métricas en 2025. Para 2035, se espera que la producción de tierras raras se duplique con creces y agregue alrededor de 300.000 toneladas métricas, en comparación con el volumen producido en 2021. El neodimio también se utiliza en la fabricación de neumáticos como caucho de butadieno de alto rendimiento a base de neodimio. Según Top Tire Review, en 2021, la industria de los neumáticos se valoró en 130,54 mil millones de dólares. Las tres principales empresas, Michelin, Bridgestone y Goodyear representaron aproximadamente el 50% de los ingresos totales de la industria de neumáticos (Mordor Intelligence, s.f.).

Principales actores que operan en el mercado del neodimio son:

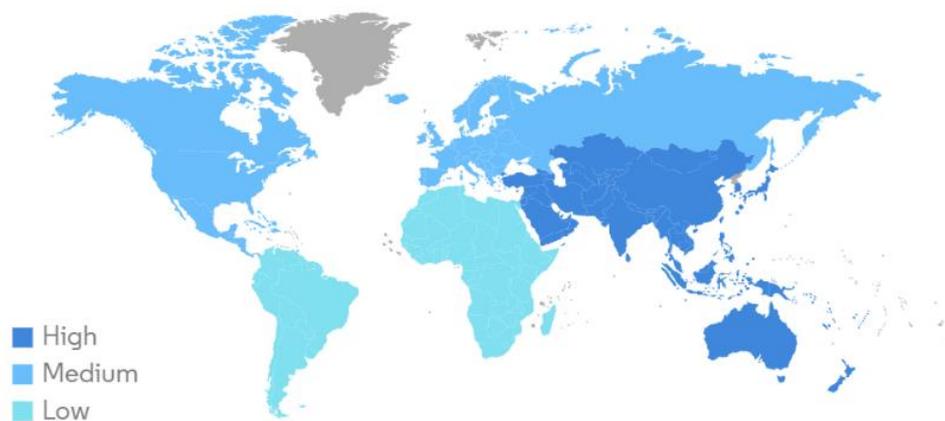
Tabla 3. Principales actores que operan en el mercado de neodimio.

Empresa	País
Lynas Rare Earth Ltd.	Australia
Recursos de Arafura.	Australia
Metall Tierras Raras Limited	China
HEFA Rare Earth Canada Co. Ltd.	Canadá
Alkane Resources Ltd	Australia
Neo Performance Materials Inc.	Canadá
China Minmetals Rare Earth Co. Ltd.	China
Lenntech BV	Países Bajos
NSEROS KLAUS NONNENMACHER GmbH	Alemania
Materiales estratégicos australianos Ltd.	Australia
Elementos americanos	EE. UU
Noah Chemicals	EE. UU
Avalon Advanced Materials, Inc	Canadá
Lotus Resources Limited	Australia
Corporación Canadiense de Tierras Raras	Canadá
Rainbow Rare Earths Limited	Alemania
Groenlandia Minerals Ltd	Australia
Alkane Resources Ltd	Australia
GanZhouQianDong Rare Earths Group Co., Ltd.	China

Fuente: Data Bridge Market Research (2022).

13.1 ASIA – PACÍFICO: SE CONSOLIDARÁ COMO LÍDER DEL MERCADO

Figura 2. Tasa de crecimiento del mercado de neodimio por región.



Fuente: Extraído de Mordor Intelligence Trading (s.f.).

La región de Asia-Pacífico domina el mercado del neodimio en términos de ingresos y participación de mercado durante el período de pronóstico. Esto se debe a la creciente demanda de neodimio en esta región. La región de Asia-Pacífico lidera el mercado del neodimio, con China a la cabeza en términos de producción de imanes permanentes, aumento en las instalaciones de energía eólica, crecimiento de la industria de vehículos eléctricos y producción de gran volumen de productos electrónicos, que son algunos de los factores que promueven el crecimiento del mercado del neodimio en esta región (Data Bridge Market Research, 2022).

La región de Asia-Pacífico tiene la mayor participación en el mercado debido a que China y Japón son los dos mercados importantes de la región, y ambos países se encuentran entre los mayores productores de imanes permanentes del mundo (Mordor Intelligence, s.f.).

Tales países mencionados se encuentran entre los mayores productores mundiales de este elemento perteneciente a las tierras raras, este se destaca principalmente por su alta demanda y manufactura de imanes de neodimio-hierro-boro (NdFeB), destacando que estos se prefieren en múltiples aplicaciones debido a su alto rendimiento y capacidad para generar un campo magnético fuerte en volúmenes pequeños y ligeros, pero destacando además por su alto costo.

El neodimio, es conocido como el metal más fuerte que se encuentra presente dentro de las tierras raras, y es crucial en la fabricación de los imanes permanentes y su utilidad se refleja en sectores tecnológicos que poseen una alta demanda, tal como la energía renovable, la electrónica, la industria automotriz y área de la salud.

En 2021, China tuvo la mayor producción minera de tierras raras en la región de Asia-Pacífico. El país produjo un estimado de 168 mil toneladas métricas de óxido de tierras raras (REO) ese año. (Mordor Intelligence, s.f.).

El neodimio es el metal de tierras raras más fuerte, por lo que es el más utilizado en los imanes permanentes. Los imanes de neodimio-hierro-boro son los preferidos para la mayoría de las aplicaciones debido a su rendimiento superior en el volumen más pequeño (Mordor Intelligence, s.f.).

Esta alta producción no solo satisface las necesidades a nivel país de China, sino que además respalda la cadena de suministro mundial de las tierras raras, las cuales se utilizan en diversos sectores que son parte de la industria. China mantiene una ventaja competitiva al controlar buena parte de la oferta mundial de estos elementos, lo cual le otorga una posición estratégica en el comercio global de imanes permanentes y otros productos derivados.

Las tierras raras aportan un valor total de casi 200,000 millones de dólares a la economía india. India tiene la quinta reserva más grande del mundo de elementos de tierras raras, aproximadamente el doble que Austria (Mordor Intelligence, s.f.). El neodimio, un elemento clave para India, se utiliza en la producción de turbinas eólicas, apoyando la transición del país hacia fuentes de energía limpias y sostenibles.

La zona de Asia-Pacífico, es líder en proyectos en cuanto a la energía eólica, los cuales muchos de ellos comenzaron durante el año 2022, esto para reducir las emisiones de carbono y promover fuentes de tipo energía renovables.

El Proyecto Integrado de Energía Renovable de Pinnapuram (Pinnapuram Integrated Renewable Energy Project, IREP), que se está desarrollando en Andhra Pradesh, es un proyecto combinado de energía hidroeléctrica solar, eólica y de almacenamiento por bombeo, que suministrará energía bajo demanda en toda la India (Seequent, 2024).

Otros proyectos, como el parque eólico MacIntyre Wind Farm en Queensland, Australia, están igualmente enfocados en expandir la capacidad de generación eólica en la región. El parque eólico MacIntyre, que una vez completado será el mayor del hemisferio sur - asegura la energética en un comunicado, estará formado por 162 turbinas Nordex Delta4000 de última generación, cada una de ellas con una capacidad de 5,7 MW. Acciona afirma que la construcción de este parque eólico ha generado cientos de empleos y ha estimulado significativamente la economía local. De media, entre 400 y 500 personas han trabajado en el proyecto durante esta fase de construcción, con más de 1.000 trabajadores empleados en su momento de mayor actividad (Energías Renovables, 2024).

Por otro lado, Corea del Sur también ha manifestado un compromiso importante en el ámbito de las energías renovables.

En febrero de 2021, Corea del Sur anunció una inversión de 43,200 millones de dólares para la construcción de parques eólicos marinos para 2030. Esta iniciativa ayudaría al país a ser neutro en carbono para 2050 (Mordor Intelligence, n.d). KF Wind, un proyecto eólico marino flotante de 1,125 MW que Ocean Winds y Mainstream Renewable Power están desarrollando frente a la costa de Ulsan, ha obtenido la aprobación de la Evaluación de Impacto Ambiental (EIA) del Ministerio de Medio Ambiente para la totalidad del proyecto de dos fases. La concesión de la EIA es un hito clave para el desarrollo del proyecto eólico marino flotante de dos fases, que avanza hacia la construcción (EVWind, 2024).

Figura 3. Corea del Sur, aprueba Proyecto eólico flotante.



Fuente: REVE (2024).

Todos estos avances en el sector de energía renovable y las crecientes demandas de imanes permanentes en industrias tecnológicas avanzadas tienen un efecto que crece en la demanda de neodimio y así también en otros elementos presentes en las tierras raras en Asia-Pacífico, y esta región continuará consolidándose como un mercado clave y estratégico para estos minerales en los años futuros. El uso de imanes de neodimio en turbinas eólicas se ha vuelto común debido a su alta eficiencia y densidad de energía, lo que permite diseñar generadores más compactos y ligeros, optimizando así el rendimiento general de las turbinas.

14.1 MERCADO DEL NEODIMIO: DESAFÍOS

Julio de 2022 Arafura Resources Limited y GE Renewable Energy firmaron un memorando de entendimiento (MoU) no vinculante para cooperar conjuntamente en el establecimiento de una cadena de suministro sostenible de neodimio y praseodimio (NdPr), que es fundamental para la transición energética (Mordor Intelligence, s.f.).

El memorando de entendimiento reconoce la naturaleza estratégica del NdPr, un mineral fundamental necesario para la fabricación de imanes permanentes de NdFeB de alto rendimiento, y traza un camino para que GE y Arafura cooperen conjuntamente en el establecimiento de una cadena de suministro diversificada y sostenible. El compromiso entre GE y Arafura ayudará a fortalecer el suministro de materiales sostenibles fundamentales para los objetivos de transición energética de los clientes de GE en la UE, EE. UU. y Australia (GE Vernova, 2022).

Este acuerdo reconoce la creciente importancia del neodimio y praseodimio (NdPr) en la transición energética global, en este la demanda de tecnologías limpias y sostenibles se encuentra en constante aumento. El compromiso entre Arafura y GE no solo busca diversificar la cadena de suministro, sino que también garantizar que se utilicen prácticas de manera sostenibles en la extracción y procesamiento de estos minerales.

14.1.1 Arafura Resources Ltd. Con Hatch

Arafura Resources Ltd. ha designado a Hatch como el gestor líder de los estudios de ingeniería para llevar a cabo el estudio de viabilidad definitivo (DFS, por sus siglas en inglés) de su proyecto de Neodimio-Praseodimio (NdPr) de Nolans, en el territorio del norte australiano. El depósito de Nolans Bore, el activo máspreciado del proyecto, es uno de los depósitos de tierras raras más intensamente explorado del mundo (Hatch, 2018).

A tan solo 135 kilómetros del norte de la ciudad de Alice Springs, el proyecto Nolans permitirá que Arafura se posicione como proveedor seguro a largo plazo de NdPr para

el sector permanente de los imanes. De acuerdo con Arafura, el proyecto podría tolerar operaciones de minería y procesamiento durante 30 a 35 años, o más (Hatch, 2018).

14.1.2 Arafura Resources Limited

Por otro lado, en, noviembre de 2022 Arafura Resources Limited firmó un acuerdo de suministro con Hyundai Motor Co. de Corea del Sur y su unidad Kia Corp. para suministrar hasta 1,500 toneladas métricas de óxido de neodimio-praseodimio (NdPr) al año. Según el acuerdo, la compañía suministrará cantidades contractuales de óxido NdPr durante siete años (Mordor Intelligence, s.f.).

Arafura venderá anualmente 600 toneladas de óxido de neodimio y el praseodimio, o sus equivalentes en metal de estos minerales raros, a estas empresas cuando el proyecto de minería Nolans comience a operar en el año 2025, de acuerdo al comunicado enviado a la bolsa australiana de valores. Arafura espera que el proyecto Nolans, situado en el Territorio Norte en medio del desierto central australiano, llegue a producir en 2027 unas 4,440 toneladas anuales de estos minerales raros (Swissinfo, 2022).

14.1.3 MP Materials y Sumitomo Corporation

Febrero de 2023 MP Materials y Sumitomo Corporation firmaron un acuerdo para diversificar y fortalecer el suministro de tierras raras en Japón. En virtud del acuerdo, Sumitomo Corporation se convierte en el distribuidor exclusivo del óxido de neodimio y praseodimio (NdPr) producido por MP Materials (Mordor Intelligence, s.f.).

SC tiene una larga trayectoria en la industria de tierras raras. SC fue pionera en el comercio y la distribución de materiales de tierras raras en la década de 1980. Para ayudar a establecer una cadena de suministro global estable para tierras raras, SC se ha involucrado en actividades de exploración, desarrollo, producción y comercialización de tierras raras a nivel mundial (Sumitomo Corporation & MP Materials Corp, 2023).

Por otro lado, La planta Mountain Pass de MP Materials es la mayor fuente de producción de tierras raras del hemisferio occidental. Mountain Pass es una planta de circuito cerrado, sin descargas, con un proceso de relaves secos que opera bajo

estrictas normas ambientales de Estados Unidos y California mundial (Sumitomo Corporation & MP Materials Corp, 2023).

Para Japón, representa una estrategia frente a las tierras raras en un menor número de países que son productores, esto promueve una gran estabilidad en la cadena de suministro de estos elementos críticos y reducción de los riesgos que se encuentran asociados a la dependencia de importaciones. A medida que la demanda de neodimio en este caso aumenta, acuerdos de este tipo son cruciales para asegurar el suministro constante que el que permite la producción continua de tecnologías limpias y de eficiencia energética en este país, Japón.

15.1 IMPACTO AMBIENTAL DEL NEODIMIO

Para reciclar el neodimio, primero es necesario separar los imanes permanentes de otros materiales y colocarlos en el contenedor adecuado es esencial para su correcto reciclaje (Organitza'l Orgànica, s.f.).

En el caso de los generadores de turbinas eólicas, los imanes permanentes de tierras raras, una vez que han llegado al final de su vida útil, todavía se pueden desmontar manualmente y reutilizar o recuperar con mucha más facilidad debido a su gran tamaño (250–600 kg/MW de potencia). En el caso de los automóviles convencionales, hay alrededor de 40 imanes en pequeños motores y actuadores y 20 sensores en un automóvil típico, y en promedio hay alrededor de 250 g de imanes de NdFeB y 10–20 g de imanes de SmCo. Estos pequeños imanes permanentes no se desmontan previamente antes de la trituradora del automóvil, y se pierden en chatarra ferrosa o no ferrosa de forma similar a los imanes de la electrónica de consumo. Los imanes permanentes de tierras raras en los motores eléctricos de los vehículos eléctricos e híbridos eléctricos son relativamente más grandes que en los automóviles normales (en promedio 1,25 kg, pero siguen siendo difíciles de desmontar manualmente. Dependiendo del valor de mercado, el desmontaje manual de los componentes que contienen imanes de tierras raras en los principales productos de consumo podría ser una opción para una mayor recuperación mecánica y metalúrgica en el futuro (Yang et al., 2017).

El proceso de minería puede causar daño ambiental si se realiza de manera incorrecta o sin manejar cuidadosamente los productos químicos utilizados en el proceso. Además, la fabricación de imanes de neodimio puede liberar sustancias químicas peligrosas al medio ambiente. La minería ilegal de neodimio es un problema continuo y puede causar un daño ambiental significativo. Este tipo de minería no regulada a menudo se lleva a cabo en áreas remotas con pocas regulaciones y salvaguardas, lo que genera una mayor contaminación tanto del proceso minero como de la eliminación no regulada de desechos (GreatMag Tech, 2023).

Desafortunadamente, los imanes también son una parte importante de la contaminación ambiental y del cambio climático, y la contaminación es un problema en todo el mundo. Los imanes se pueden fabricar a partir de recursos no renovables, como los metales (GreatMag Tech, 2023).

Durante el proceso de extracción, se liberan desechos tóxicos y materiales radiactivos, lo que afecta negativamente la fauna, la flora y las aguas subterráneas, lo que lo convierte en un problema crítico de salud pública (Paramérica Minera, 2024).

A pesar de todas estas aplicaciones útiles, es importante tener en cuenta que el neodimio es un elemento escaso y su extracción puede tener un impacto negativo en el medio ambiente. La minería de neodimio puede causar la degradación del suelo y el agua, así como la contaminación del aire debido a la liberación de productos químicos tóxicos (Detectando, s.f.).

En la actualidad, China es la fuente del 85% del suministro mundial de tierras raras refinadas, un hecho que ha suscitado preocupación en Estados Unidos, dada la creciente tensión diplomática chino-estadounidense y la creciente demanda de tecnologías de energía limpia. Cualquier interrupción futura en el suministro de los metales, similar a la que experimentó Japón hace una década, podría tener un efecto paralizante sobre el desarrollo de la energía limpia en Estados Unidos y en otros lugares (Kleinman Center for Energy Policy, 2021).

Los principales minerales objetivos del reciclaje de REE son el disprosio y el neodimio ya que se espera que su demanda aumente en 700 y 2600% respectivamente en los próximos 25 años (estimado por Alonso y otros, 2012) y son esenciales para el desarrollo de las energías limpias.

El reciclaje de tierras raras no es un proceso sencillo como el reciclaje de plástico o de vidrio, esto debido a que el contenido de elementos de tierras raras en los productos siempre es bajo y extraerlos de ellos se hace a través de procesos complejos de muchas etapas. Otra dificultad para el reciclaje de tierras raras es la disminución del tamaño de los equipos tecnológicos que usan REE los últimos años (smartphones, laptops, etc), que produce una disminución en los volúmenes de material disponible para el reciclaje. Sumado a esto, no existen campañas significativas de recolección de chatarra electrónica, por lo que el suministro de material no está asegurado para las compañías

que realizan esta labor. Una buena opción para el reciclaje de materiales con REE son los magnetos utilizados en las turbinas eólicas, ricas en disprosio y neodimio, ya que representan una fuente de grandes volúmenes en un solo lugar, lo que asegura el suministro de material. Como las turbinas eólicas tienen una vida útil de 20-30 años, en la actualidad aún no hay material disponible para hacerlo, pero es importante tener en cuenta a futuro (Cochilco, 2026).

Resulta irónico que las tierras raras, valoradas en gran medida por su papel en la creación de tecnologías limpias, estén asociadas a un historial considerable de prácticas que entran en conflicto con la preservación ambiental durante su extracción. Este proceso incluye la minería inicial, los métodos de refinamiento y la gestión de los desechos generados; cada una de estas fases tiene características específicas que, si no se manejan adecuadamente, pueden causar un impacto negativo en el medio ambiente (Biblioteca del Congreso Nacional de Chile, 2021, p.8).

Los imanes permanentes, que contienen elementos críticos de neodimio, praseodimio, terbio y disprosio, se utilizan ampliamente en los motores de los vehículos eléctricos y en los generadores de energía de las turbinas eólicas. A medida que se consolide el uso de elementos de tierras raras en estas aplicaciones magnéticas, los imanes al final de su vida útil se convertirán en una fuente alternativa clave de materiales críticos de tierras raras a las fuentes minerales primarias. IDTechEx predice que en 2045 se recuperarán 1.200 millones de dólares de elementos críticos de tierras raras de fuentes secundarias como los motores de imanes permanentes (Howley, J.,s.f.).

IDTechEx prevé que en 2045 podrán recuperarse anualmente de fuentes secundarias elementos críticos de tierras raras por valor de 1.200 millones de dólares, y se espera que el valor de los elementos de tierras raras recuperables crezca a una TCAC del 14,9%. Aún no se ha decidido si son más adecuadas las estrategias de recuperación de ciclo largo o corto. Uno de los objetivos actuales de las empresas emergentes de reciclaje de tierras raras es desarrollar modelos de negocio sostenibles hasta que se disponga de volúmenes significativos de material al final de su vida útil para su recuperación. En este sentido, los procesadores de ciclo largo están bien posicionados, ya que los principales actores complementan actualmente las materias primas con residuos mineros y otros minerales primarios procedentes de minas junior de Norteamérica, Australia y África central (Howley, J.,s.f.).

16.1 MERCADO CHILENO: NEODIMIO

Actualmente, Chile no produce tierras raras ni es considerado un actor relevante en este mercado. Sin embargo, el proyecto Biolantánidos en la comuna de Penco, que se encuentra en etapa de calificación ambiental, tiene el potencial de colocar al país en el escenario mundial. Este proyecto busca producir tierras raras a partir de arcillas mediante una operación sin tronaduras ni rajo, lo que reduce los riesgos socioambientales (Relaves con Valor, 2021).

Por otro lado, los relaves son una fuente clave en la recuperación de recursos valiosos. El Programa Relaves con Valor se dedicó a identificar elementos de valor en estos depósitos y para la adaptación o desarrollo de tecnologías para su extracción. Su principal resultado fue la recuperación de tierras raras de los depósitos ubicados en la franja ferrífera, en las regiones de Atacama y Coquimbo (Relaves con Valor, 2021).

En lo que respecta a las tierras raras, el estado del arte en Chile es más bien reciente e incipiente. A pesar de su experiencia en la extracción de minerales, la explotación y producción de tierras raras, se encuentra en una fase inicial de desarrollo en el país y su potencial en este campo está empezando a ser explorado, en la medida que las demandas globales y la importancia estratégica de estos elementos aumentan en la industria tecnológica y energética (Pozo Morales, 2023, p. 116).

Las tierras raras representan una oportunidad y a la vez un desafío para el Estado chileno respecto al desarrollo una industria o de manera sólida y sustentable, generando las condiciones para impulsar la economía y el crecimiento asociado, mientras simultáneamente se promueve una transición hacia energías renovables y se fomenta la innovación y el desarrollo tecnológico en el país (Pozo Morales, 2023, p. 118).

Según el secretario de Estado, el 90% del uso de las tierras raras se destina a electromovilidad y generación de energías renovables. Los autos llevan 10 veces más tierras raras que los autos convencionales, y las turbinas eólicas son grandes consumidores de dicho material. Chile posee prospectos y proyectos importantes para la extracción de estos elementos en Atacama y Bío Bío (Reyes, 2020).

Las tierras raras son elementos que se encuentran en muchas partes del mundo. En el caso chileno se encuentran entre Maule y Angol. En la Cordillera de la Costa se han encontrado zonas con tierras raras presentes en las arcillas iónicas, que son posibles de explotar de manera ambientalmente compatible, de manera sostenible. Porque con un simple intercambio iónico estas arcillas pueden liberar estos elementos, concentrarse y producirse. A diferencia de otras partes del mundo, donde están en modo de roca que requiere la minería tradicional de molienda de procesos de lixiviación mucho más agresivos, cuando se les tiene en modo arcillas iónicas es que se puede usar un proceso que lo hace de alguna manera sostenible, más fácil de explotar y que en este caso en particular además lo puede hacer en un ciclo cerrado del agua, es decir, tiene una serie de virtudes medioambientales que lo hacen especiales, que lo hacen difícil también a veces homologar con la minería convencional (Sonami, 2023, p.12).

En síntesis, Chile, que fue una economía pobre en términos de las energías del pasado, como petróleo y gas natural, es rico en las energías del futuro, tales como la energía solar, eólica y el hidrogeno verde, en donde la electromovilidad es la transformación mas sustancial, ostentando nuestro país recursos como cobre, litio y tierras raras, que son insumos esenciales para este proceso, generándose así una nueva riqueza para Chile (Columnista, 2023).

16.1.1 Proyecto Aclara en Penco

La comuna de Penco posee un yacimiento superficial de arcillas que permite extraer de manera sostenible las tierras raras, elementos claves para el desarrollo de energías limpias que luchan contra el cambio climático. Esto significa un cambio de paradigma en la industria de las tierras raras, considerando que los mayores productores de estos elementos han sido duramente cuestionados por operar con procesos poco amigables con el medio ambiente. China y Myanmar proporcionan más del 70% de las tierras raras al mundo, sin embargo, para mantener una producción constante a precios bajos, lo han hecho a un costo ambiental y social muy alto. Para revertir esta situación y aportar tierras raras limpias, trazables e independientes desde Biobío al mundo, Aclara desarrolló un proceso exclusivo que permite rescatar y procesar estos elementos de forma responsable con el entorno. Este método, llamado Cosecha Circular de Minerales y desarrollado en conjunto con la academia local y la Universidad de Toronto (Canadá), produce estos elementos de forma simple, limpia y con un proyecto de baja escala (Aclara, s.f.).

Este nuevo proyecto le otorga una importante oportunidad a Chile: la producción sustentable de tierras raras, sumada a la de litio, cobre e hidrógeno verde, convierte al país en un actor clave en la lucha global contra el cambio climático (Sonami, 2023, p.14).

En la actualidad el proyecto con mayor avance e investigación es la planta de tierras raras ubicada en Penco, Región del Biobío en el sur de Chile. Por otra parte el Informe de Tierras Raras (2023) de la Universidad Bernardo O'Higgins da cuenta del proyecto llevado por la empresa minera Aclara Resource, que desde este año 2023 está desarrollando en el Módulo Penco, a 15 kilómetros de Concepción, en una superficie de 600 hectáreas (con 200 mil hectáreas más para futuras exploraciones de tierras raras), la producción de óxidos de tierras raras de calidad procedentes de yacimientos de arcilla iónica (tierras raras pesadas), con el fin de convertirse en un proveedor líder para las empresas de tecnologías limpias (Pozo Morales, 2023, p. 116-117).

El ejecutivo de Aclara, expresa "No utilizaremos explosivos, ni haremos molienda. Además, operaremos con agua reciclada de fuentes domiciliarias tratadas y recircularemos el 95% del agua que usemos, en nuestro proyecto extraeremos las tierras raras desde arcillas iónicas a un nivel superficial, hasta los primeros 30 - 40 metros de profundidad. Luego devolveremos el material procesado al terreno para posteriormente revegetar con especies nativas. Además, nuestro proceso de circuito cerrado nos permite obtener un producto que no contiene elementos radiactivos. Realmente, esto se ve como algo novedoso, único, en el contexto de cómo se desarrollan los procesos mineros en Chile", (Reporte Minero, 2023).

Hochschild Mining - empresa origen peruano que transa en la bolsa de Londres anunció la adquisición del 93,8% del proyecto BioLantánidos, a la chilena Minera Activa, brazo minero del Grupo LarraínVial (Minería Chilena, 2019).

Por concepto de exploración, la empresa ha invertido a la fecha cerca de US\$12 millones (Avendaño Corvalán, 2017, p. 10).

En términos de inversión y producción, se van a estar procesando hasta 324 toneladas de arcillas iónicas por hora y vamos a estar operando ahí por 17 años. La inversión de la planta es de 130 millones de dólares, una inversión bastante acotada para generar tierras raras que permitan el desarrollo de cerca de 180 millones de autos eléctricos. En

el desarrollo del proyecto ya se han invertido 100 millones de dólares (Sonami, 2023, p.14).

El proyecto de Aclara en Penco se destaca por usar aguas 100% recicladas, aportar más de 100 hectáreas de bosque nativo y generar más de 2,000 empleos directos e indirectos. A pesar de ser un proyecto de menor tamaño, mantiene su inversión y recibió amplia Participación Ciudadana Temprana. La empresa firmó un acuerdo estratégico con el Grupo CAP para desarrollar este y otros proyectos, fortaleciendo su vínculo con la Región del Biobío y su compromiso con la descarbonización. Presentó el Estudio de Impacto Ambiental (EIA) para su proyecto de extracción de tierras raras, optimizado para cumplir con los requisitos ambientales y sociales. Este es el primer proyecto en Chile dedicado a estos minerales críticos, esenciales para la electromovilidad y energías limpias. La empresa, junto con el apoyo del Grupo CAP, avanzará en la obtención de permisos y continuará colaborando con la comunidad de Penco. Este proyecto incluye el compromiso de proteger el bosque nativo y revegetar más de 100 hectáreas con especies autóctonas. También se garantizó el uso de agua reciclada para satisfacer las necesidades hídricas del proyecto. Durante el proceso de Participación Ciudadana Temprana, más de 1,000 personas de la comunidad de Penco participaron, lo que resultó en 303 comentarios y más de 400 visitas al Centro Demostrativo de Tierras Raras de Aclara (CAP., s.f.).

El proceso innovador de extracción de Aclara, conocido como "Cosecha Circular de Minerales", utiliza aguas recicladas, no emplea explosivos ni genera residuos industriales líquidos, lo que reduce el consumo energético. Además, la empresa mantiene alianzas con universidades para fomentar la investigación en la industria de las tierras raras. También espera que el EIA pase por un período de evaluación de 18 meses, y Aclara continuará trabajando con la comunidad y las autoridades. El proyecto es visto como una gran oportunidad para Penco, Chile y la transición energética global (CAP., s.f.).

Actualmente, el proyecto de Aclara se encuentra en la fase de obtención de permisos ambientales, con el objetivo de comenzar su operación en 2025. La empresa está trabajando en la aprobación de su Estudio de Impacto Ambiental (EIA) y se espera que este proceso permita avanzar hacia la implementación de su innovadora producción limpia de tierras raras. El proyecto promete posicionar a Chile como un líder en la producción de estos materiales esenciales para la transición energética global.

16.1.2 Tierras raras en relaves

Chile posee un gran potencial para la recuperación de elementos de valor no tradicionales (EVNT), como tierras raras, a partir de los relaves mineros. A través de programas de investigación y desarrollo, se ha demostrado la viabilidad de recuperar metales críticos desde los residuos mineros, contribuyendo a la economía circular. Este enfoque no solo busca mejorar la eficiencia minera, sino también generar beneficios económicos, sociales y ambientales al aprovechar recursos secundarios para la industria tecnológica. Chile tiene un gran potencial para recuperar elementos de valor no tradicionales (EVNT) a partir de los relaves, especialmente tierras raras. Se proyecta que, para 2050, el país pueda ser un actor clave en la minería secundaria, aprovechando los residuos mineros para suministrar metales esenciales para la transición energética y la industria tecnológica. Este enfoque podría contribuir significativamente a la sostenibilidad y a la economía circular, posicionando a Chile como líder en la recuperación de estos recursos críticos (Guía Minera, s.f.).

Otra fuente importante son los relaves. El Programa Relaves con Valor tuvo como objetivo identificar elementos valiosos presentes en los relaves y desarrollar o adaptar tecnologías para su recuperación. Uno de los resultados más destacados de esta iniciativa fue el enfoque en la recuperación de tierras raras desde depósitos ubicados en la franja ferrífera de las regiones de Atacama y Coquimbo. El proyecto se centró en diseñar una secuencia de operaciones y procesos que permitieran la recuperación de tierras raras de manera técnica y económicamente viable, lo que dio lugar al desarrollo de un proceso polimetálico (Relaves con Valor, 2021).

Estudios recientes realizados por la empresa de ingeniería especializada JRI y organizaciones e instituciones como CAMCHAL-BGR y SERNAGEOMIN confirman la presencia de estos elementos de tierras raras en relaves de cobre chilenos, tanto activos, inactivos, así como abandonados. La evidencia de dichos estudios ha generado que los relaves conciten la atención de las autoridades como potenciales nuevos negocios para Chile, lo que traería consigo desarrollo tecnológico e innovación, tanto en los procesos de extracción como en la disposición de estos pasivos ambientales (Minnovex, s.f.).

En línea con la necesidad de recuperar la riqueza de lo que tradicionalmente se conoce como un residuo y buscar alternativas sustentables para estos depósitos, surge el proyecto Corfo “Investigación y Desarrollo para la Recuperación de Elementos de Valor

desde Relaves” cuyo desarrollo es liderado por el consorcio JRI Ingeniería y Ecometales, que busca principalmente definir metodologías para identificar y cuantificar en relaves, la existencia de minerales que contengan este tipo de elementos de alto valor y definir los tipos de procesos necesarios para una extracción técnico-económica factible (Minnovex, s.f.).

Esto, permitirá generar beneficios en distintos sectores y aspectos: productividad de los yacimientos, medio ambiente, implementación de nuevas tecnologías (innovación tecnológica), optimización de recursos mineros, generación de nuevas líneas de desarrollo y empleo, generación de recursos que ayuden a financiar los planes de cierre de faenas, orientaciones para la toma de decisiones respecto al tratamiento de residuos mineros masivos en estado de “abandono” o “incertidumbre”. Además, incidirá en la imagen de la minería nacional positivamente, pudiendo generar “know how” exportable a distintos países con procesos metalúrgicos similares (Minnovex, s.f.).

En este contexto, el proyecto desarrollado en la comuna de Taltal constituye un avance significativo hacia la valorización de los relaves mineros. Este programa, liderado por JRI Ingeniería en colaboración con ENAMI, se centra en la recuperación de tierras raras, cobre y hierro desde los depósitos históricos de Punta Morado. Mediante estudios detallados de caracterización mineralógica, la implementación de una planta piloto móvil y un análisis económico preliminar, se busca demostrar la viabilidad técnica y económica de este modelo sostenible de minería circular (Portal Minero, 2024).

17.1 CONCLUSIONES

El análisis del neodimio y su uso en sectores tal como vehículos eléctricos, turbinas eólicas y proyectos de energía renovable resalta su papel fundamental en la transición hacia un modelo energético de forma sostenible. Esta investigación también profundizó en el comportamiento del mercado del neodimio, evidenciando tanto su potencial como los desafíos asociados a su creciente relevancia en el ámbito global.

En el ámbito de los vehículos eléctricos, los motores que emplean imanes de neodimio han resultado ser esenciales para la eficiencia y la autonomía de estos. Las propiedades únicas de este material permiten diseñar motores más compactos, livianos y con una mayor potencia, alineándose con las metas globales de reducir las emisiones de carbono. A medida que la electrificación del transporte avanza de manera acelerada, la demanda de imanes de neodimio seguirá en aumento, consolidando su importancia en el sector automotriz.

En el caso de las energías de tipo renovables, el neodimio desempeña un rol crucial en la fabricación de generadores para turbinas eólicas. Su capacidad de imanes permanentes de alta potencia mejora significativamente la eficiencia de estas instalaciones, permitiendo el desarrollo de turbinas más grandes y rentables. Esto favorece la expansión de proyectos eólicos en diferentes regiones, tanto en tierra como en el mar, consolidando a esta fuente de energía como una de las más competitivas y sostenibles en el panorama global.

El estudio de mercado también reflejó cómo la creciente electrificación y la expansión de las energías renovables influyen directamente en el valor del neodimio. Para mitigar los riesgos asociados a su alta demanda, se destacó la importancia de diversificar las fuentes de suministro y fomentar tecnologías de reciclaje que permitan recuperar este material de dispositivos en desuso. Este enfoque no solo contribuiría a estabilizar el mercado, sino que también reduciría los impactos ambientales relacionados con su extracción.

Un aspecto destacado de esta investigación fue el análisis del mercado del neodimio, que permitió comprender las dinámicas económicas y estratégicas asociadas a este

recurso. La creciente demanda de neodimio, impulsada por su uso en tecnologías clave, contrasta con su oferta limitada debido a la concentración de su producción, mayoritariamente en China. Esto genera desafíos relacionados con la estabilidad del mercado, los precios y la seguridad del suministro. Además, se analizaron las proyecciones para proyectos futuros, especialmente en el sector eólico.

En resumen, el neodimio se consolida como un recurso esencial para el desarrollo de tecnologías avanzadas que son clave en la transición energética. Su papel en la industria automotriz y en las energías renovables lo convierte en un pilar estratégico para reducir las emisiones de carbono y promover un desarrollo más responsable. Sin embargo, su creciente relevancia plantea importantes desafíos, como asegurar su disponibilidad futura, mitigar los impactos ambientales de su extracción y gestionar los riesgos asociados a la concentración de su producción.

El análisis de mercado realizado en la presente investigación permitió dimensionar la importancia económica del neodimio en sectores tecnológicos y energéticos, así como identificar oportunidades para mejorar su gestión y garantizar su sostenibilidad. En definitiva, este recurso tiene el potencial de seguir impulsando la innovación y contribuyendo al desarrollo de un modelo energético más limpio y accesible, siempre que se adopten medidas que prioricen su uso responsable y sostenible.

En el contexto chileno, la exploración de proyectos emergentes, como los depósitos de tierras raras en relaves, ofrece una oportunidad para posicionar al país como un actor relevante en el mercado global de neodimio. Esto, combinado con un enfoque en la innovación tecnológica y la cooperación internacional, puede encontrar el camino hacia un futuro más sostenible.

17.2 RECOMENDACIONES

Se recomienda fomentar el desarrollo de materiales sustitutos para aplicaciones clave como los imanes de motores eléctricos y turbinas eólicas, con el objetivo de reducir la dependencia del neodimio.

Inversión en tecnologías de reciclaje eficientes para recuperar el neodimio de dispositivos que se encuentran en desuso, contribuyendo a la sostenibilidad y reduciendo el impacto ambiental de su extracción.

Reducir la dependencia de un solo proveedor y fortaleciendo la estabilidad del mercado.

Por otro lado, se recomienda implementar mejores prácticas ambientales y sociales en la minería del neodimio, garantizando la restauración de ecosistemas y el respeto a los derechos de las comunidades locales.

Continuar con la innovación en la mejora de la eficiencia de motores eléctricos y turbinas eólicas, optimizando el uso del neodimio y reduciendo el impacto ambiental que es causado.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- **Abad, V., & Sagredo, J. (2018).** *Evolución y proceso de fabricación de imanes “NEO” aplicados a motores de vehículos eléctricos.* Revista de Metalurgia. Enviado el 9 de junio de 2017; aceptado el 21 de junio de 2018; publicado en línea el 13 de septiembre de 2018. Recuperado de <https://revistademetalurgia.revistas.csic.es/index.php/revistademetalurgia/article/view/1441/1718>.
- **Aclara. (s.f.).** *Proyecto. Somos Aclara.* Recuperado de <https://somosaclara.cl/proyecto/>.
- **Adamas Intelligence (2021).** *Rare Earth Magnet Market Outlook to 2030,* Adamas Intelligence, Toronto and Amsterdam. Recuperado de www.adamasintel.com/report/rare-earth-magnet-market-outlook-to-2030.
- **ALB Magnets. (s.f.).** *Ten applications of neodymium magnets in electric motor vehicles.* Recuperado de <https://www.albmagnets.com/content/23-ten-applications-of-neodymium-magnets-in-electric-motor-vehicles>.
- **Alutal. (s.f.).** *Termopar termorresistencia: Sensor de temperatura con fijación magnética (MAG sensor).* Recuperado de <https://www.alutal.com.br/es/produto/termopar-termorresistencia-sensor-de-temperatura-com-fixacao-magnetica-mag-sensor/>.

- **Anatronic. (2021, 6 de abril).** *Imanes permanentes de neodimio para aplicaciones médicas.* Anatronic. Recuperado de <https://anatronic.com/iman-permanentes-de-neodimio-para-aplicaciones-medicas/>.
- **ANSYS. (2021).** *Vehículos eléctricos: sostenibilidad y ecodiseño.* Recuperado de <https://www.ansys.com/content/dam/amp/2021/august/webpage-requests/education-resources-dam-upload-batch-5/vehiculos-electricos-sostenibilidad-y-ecodiseno-CASESEES22.pdf>.
- **ATRIA Innovation. (s.f).** *Industria 5.0: ¿Qué es?* ATRIA Innovation. Recuperado de <https://atriainnovation.com/blog/industria-5-0-que-es/>.
- **Avendaño Corvalán, P. J. (2017).** *Evaluación de factibilidad técnico-ambiental de una planta de extracción de tierras raras en Chile* [Memoria para optar al título de Ingeniero Civil Químico, Universidad de Chile]. Repositorio Académico UChile. Recuperado de <https://repositorio.uchile.cl/bitstream/handle/2250/150686/Evaluacion-de-factibilidad-tecnico-ambiental-de-una-planta-de-extraccion-de-tierras-raras-en-Chile.pdf?sequence=1>.
- **BBC News Mundo. (2020, 11 de junio).** *Neodimio, el valioso mineral raro que se esconde en tu vieja computadora.* BBC. Recuperado de <https://www.bbc.com/mundo/noticias-53002815>.

- **Bermúdez Jáuregui, J. A., & Pedraza Soler, J. J. (s.f.).** *Prototipo de generación de energía a partir de investigación y desarrollo tecnológico en tecnologías alternativas.* Recuperado de https://bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/9675/599-formato-articulos-iman.es.pdf.
- **Bermúdez Jáuregui, J. A., & Pedraza Soler, J. J. (2022, noviembre).** *Prototipo de generación de energía a partir de investigación y desarrollo tecnológico en tecnologías alternativas.* SENA Regional Arauca. Recuperado de https://tesisenfermeria.bdigital.uncu.edu.ar/objetos_digitales/9675/599-formato-articulos-iman.es.pdf.
- **Biblioteca del Congreso Nacional de Chile. (2021).** *Tierras raras: Importancia estratégica y sostenibilidad en su producción* (p. 8). Recuperado de <https://obtienearchivo.bcn.cl/obtienearchivo?id=repositorio/10221/23720/2/Informe%20Tierras%20Raras.pdf>.
- **Bolívar, G., & Castaño, B. (2018).** *Protocolo de capsulotomía Nd:YAG. Indicaciones y técnica. Pautas de seguimiento y tratamiento.* Boletín de la Sociedad Oftalmológica de Madrid, 58. Recuperado de <https://sociedadoftalmologicademadrid.com/revistas/revista-2018/m2018-13a.html>.
- **Bombgardner, Melody M. (2018).** *“New Toyota Magnet Cuts Rare-Earth Use.”* *Chemical & Engineering News.* Recuperado de <https://cen.acs.org/content/cen/articles/96/i9/New-Toyota-magnet-cuts-rare.html>.

- **Brovelli Sepúlveda, F. (2023, 1 de agosto).** *Aplicaciones tecnológicas de las tierras raras (parte 2).* Universidad de Concepción. Recuperado de <https://losangeles.udec.cl/opinion/aplicaciones-tecnologicas-de-las-tierras-raras-parte-2/>.
- **Brovelli Sepúlveda, F. (2023, 18 de julio).** *Importancia tecnológica de las tierras raras.* Universidad de Concepción. Recuperado de <https://losangeles.udec.cl/opinion/importancia-tecnologica-de-las-tierras-raras/>
- **BYJU'S. (s.f.).** *Neodymium - Properties, uses, and health effects.* Recuperado de <https://byjus.com/chemistry/neodymium/>
- **Cairo Williams, V. E. (2017).** *Pupilooplastia con láser neodimio YAG: reporte de dos casos.* Revista Archivo Médico de Camagüey, 21(3), 393-399. Editorial Ciencias Médicas Camagüey. Recuperado de <https://www.redalyc.org/journal/2111/211151177011/html/>
- **CAP. (s.f.).** *Aclara ingresa a evaluación ambiental proyecto optimizado de tierras raras en Penco.* Recuperado de <https://www.cap.cl/cap/sala-de-prensa/noticia/aclara-ingresa-a-evaluacion-ambiental-proyecto-optimizado-de-tierras/2024-06-19/154754.html>
- **Clínica Barraquer. (s.f.).** Capsulotomía con YAG láser. Clínica Barraquer. Recuperado de <https://www.barraquer.com/tratamiento/capsulotomia-con-yag-laser>.

- **Clínica Oftalmológica Nebro. (s.f.). Láser YAG. Clínica Oftalmológica Nebro.** Recuperado de <https://clinicaoftalmologicanebro.com/laser-yag/#:~:text=Los%20l%C3%A1ser%20Nd%2DYAG%20se,o%20curativo%20de%20glaucoma%20agudo%20>.
- **Comisión Chilena del Cobre (Cochilco). (2016). Exploración.** Recuperado de <https://www.cochilco.cl/web/exploracion/>.
- **Consejo Superior de Investigaciones Científicas (CSIC). (2023, 18 de octubre). Hacia nuevos imanes industriales más eficientes y sostenibles. CSIC.** Recuperado de <https://www.csic.es/es/actualidad-del-csic/hacia-nuevos-iman-es-industriales-mas-eficientes-y-sostenibles>.
- **Columnista. (2023, mayo 23). Tierras raras, una nueva riqueza para Chile.** Diario Financiero. Recuperado de <https://www.df.cl/opinion/columnistas/tierras-raras-una-nueva-riqueza-para-chile>.
- **Data Bridge Market Research. (2022, junio). Mercado mundial de neodimio: tendencias de la industria y pronóstico hasta 2029.** Recuperado de <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-neodymium-market>.
- **Detectando. (s.f.). ¿Qué es el neodimio y cómo se utiliza en la industria? Detectando.** Recuperado de <https://detectando.com/que-es-el-neodimio-y-como-se-utiliza-en-la-industria>.

- **Dodd, Jan. (2018).** *“Rethinking the Use of Rare-Earth Elements.”* *Windpower Monthly.* *Windpower Monthly.* Recuperado de <https://ammoniaindustry.com/urea-production-is-not-carbon-sequestration/#:~:text=To%20make%20urea%2C%20fertilizer%20producers,through%20the%20production%20of%20urea.>
- **El Periódico de la Energía. (2024, noviembre 22).** *Corea del Sur sigue los pasos de Japón y anuncia su compromiso de neutralidad en carbono para 2050.* Recuperado de <https://elperiodicodelaenergia.com/corea-del-sur-sigue-los-pasos-de-japon-y-anuncia-su-compromiso-de-neutralidad-en-carbono-para-2050.>
- **Emergen Research. (2023, noviembre).** *Mercado de Neodimio, Por Tipo (Metal y Compuesto), Por Aplicación (Imán, Catalizador, Vidrio y Cerámica, y Otros), Por Uso final (Automotriz, Electrónica y Eléctrica, Energía Eólica, y Otros), y por Pronóstico Regional hasta 2032.* Emergen Research. Recuperado de <https://www.emergenresearch.com/es/industry-report/mercado-del-neodimio.>
- **Energías Renovables. (2024, octubre 4).** *Los primeros 27 aerogeneradores del parque eólico MacIntyre comienzan a entregar energía a la red australiana.* *Energías Renovables.* Recuperado de <https://www.energias-renovables.com/eolica/los-primeros-27-aerogeneradores-del-parque-eolico-20241004.>
- **Epoch, E. (2018).** *Diseño de un motor de imanes permanentes de neodimio para una bicicleta eléctrica.* [Tesis de maestría, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo]. Repositorio Institucional de la ESPOL. Recuperado de <http://dspace.epoch.edu.ec/bitstream/123456789/20281/1/96T00889.pdf.>

- **Eurobalt. (2024, 20 de febrero).** *Imanes de neodimio: Revolucionando las energías renovables.* Recuperado de <https://eurobalt.net/es/blog/2024/02/20/iman-es-de-neodimio/#:~:text=En%20el%20%C3%A1mbito%20de%20la,del%20viento%20en%20energ%C3%ADa%20el%C3%A9ctrica.>
- **EVWind. (2024, agosto 29).** *El proyecto de eólica flotante Mainstream Renewable Power y Ocean Winds obtiene la Evaluación de Impacto Ambiental para un parque eólico marino de 1,1 GW en Corea del Sur.* Recuperado de <https://www.evwind.com/2024/08/29/el-proyecto-de-eolica-flotante-mainstream-renewable-power-y-ocean-winds-obtiene-la-evaluacion-de-impacto-ambiental-para-un-parque-eolico-marino-de-11-gw-en-corea-del-sur/>.
- **Fears, P. (2021).** *Rare earth magnets in electric vehicle motors.* Bunting. Recuperado de www.buntingeurope.com/rareearth-magnets-in-electric-vehicle-motors.
- **Fernández Garbayo, E. J. (2019).** *Z = 60, neodimio, Nd. El nuevo gemelo más "atractivo".* Anales de Química de la RSEQ, 115(2), 122CE. Recuperado de <https://analesdequimica.es/index.php/AnalesQuimica/article/view/1439/2014>.
- **Generadoras de Chile. (s.f.).** *Energía eólica.* Recuperado de <https://generadoras.cl/tipos-energia/energia-eolica>.

- **GE Vernova. (2022).** *GE Renewable Energy and Arafura Resources sign Memorandum of Understanding (MoU) on Neodymium and Praseodymium (NdPr) Rare Earths.* Recuperado de <https://www.gevernova.com/news/press-releases/ge-renewable-energy-and-arafura-resources-mou-on-neodymium-praseodymium-rare-earths>.
- **Gielen, D., & Lyons, M. (2022).** *Critical materials for the energy transition: Rare earth elements.* International Renewable Energy Agency (IRENA). Recuperado de <https://www.irena.org>.
- **González, C. (2024).** *Aplicaciones tecnológicas de las tierras raras – Parte 2.* Universidad de Concepción. Recuperado de <https://losangeles.udec.cl/opinion/aplicaciones-tecnologicas-de-las-tierras-raras-parte-2/>.
- **GreatMag Tech. (2023, 7 de abril).** El impacto ambiental de los imanes de neodimio. Recuperado de <https://es.greatmagtech.com/info/the-environmental-impact-of-neodymium-magnets-82068684.html>.
- **Guarín-Zapata, N., & Velásquez, Á. (2009).** *Caracterización de imanes para aplicación en sistemas de sensado de posición.* Revista Colombiana de Física, volumen 42, No. 1 de 2010 [6]. (PDF) Caracterización de Imanes para aplicación en sistemas de sensado de posición.
- **Guía Minera. (s.f.).** *Chile tiene un inmenso potencial para recuperación de EVNT a partir de los relaves.* Guía Minera de Chile. Recuperado de <https://www.guiaminera.cl/fernando-vera-chile-tiene-un-inmenso-potencial-para-recuperacion-de-evnt-a-partir-de-los-relaves/>.

- **Hatch. (2018, diciembre 31).** *La empresa australiana Arafura suministrará minerales raros a Hyundai y Kia.* Recuperado de <https://www.hatch.com/es-CL/About-Us/News-And-Media/2018/04/Arafura-Resources-engages-Hatch-for-Nolans-rare-earths-project>.
- **Howley, J. (s.f.).** *Cómo los imanes están reconfigurando la oferta, la demanda y la recuperación de las tierras raras.* Convertronic. Recuperado de <https://convertronic.net/noticias/tecnologia/12745-como-los-imanes-estan-reconfigurando-la-oferta-la-demanda-y-la-recuperacion-de-las-tierras-raras.html>
- **Ibacache, A. (s.f.).** *Presentación neodimio.* Academia.edu. Recuperado de https://www.academia.edu/36386996/Presentacion_neodimio.
- **Innorise Magnets. (s.f.).** *Imanes de neodimio para EPS automotriz.* Recuperado de <https://www.innorisemags.com/es/neodymium-magnets-for-automotive-eps-product/>.
- **Jin Magnets. (s.f.).** *Imanes de NdFeB de tierras raras.* Recuperado de <http://www.jinmagnets.com/Spain/product/product01.asp>.
- **Kim, H.-M., & Jariwala, D. (2021, 23 de septiembre).** *The not-so-rare earth elements: A question of supply and demand.* Kleinman Center for Energy Policy. Recuperado de <https://kleinmanenergy.upenn.edu/research/publications/the-not-so-rare-earth-elements-a-question-of-supply-and-demand/>.

- **Kim, H.-M., & Jariwala, D. (2021, septiembre 23).** *Los elementos de tierras no tan raras: una cuestión de oferta y demanda.* Kleinman Center for Energy Policy. Recuperado de <https://kleinmanenergy.upenn.edu/research/publications/the-not-so-rare-earth-elements-a-question-of-supply-and-demand/>.
- **Kleinman Center for Energy Policy. (2021, 15 de julio).** *Rare earth elements pose environmental, economic risks for clean energy.* Universidad de Pennsylvania. Recuperado de <https://kleinmanenergy.upenn.edu/commentary/podcast/rare-earth-elements-pose-environmental-economic-risks-for-clean-energy>.
- **Lenntech. (s.f.).** *Neodimio (Nd) - Propiedades químicas y efectos sobre la salud y el medio ambiente.* Lenntech. Recuperado de <https://www.lenntech.es/periodica/elementos/nd.htm>.
- **López Rodríguez, N. (2021, septiembre).** *Estudio del impacto ambiental y del flujo del neodimio presente en los imanes permanentes* [Trabajo de Fin de Máster, Universidad Politécnica de Madrid]. Archivo Digital UPM. Recuperado de https://oa.upm.es/68875/1/TFM_Noelia_Lopez_Rodriguez.pdf.
- **Magnet Plastic. (2024, 28 de mayo).** *El uso de imanes en la automoción eléctrica.* Recuperado de <https://magnetplastic.com/imanenes/el-uso-de-imanenes-en-la-automocion-electrica/>.

- **Ma, J., & Henderson, J. (2021).** *“The impermanence of permanent magnets: A case study on industry, Chinese production, and supply constraints.”* Recuperado de <https://macropolo.org/analysis/permanent-magnets-casestudy-industry-chinese-production-supply/>.
- **Minería Chilena. (2019).** *Hochschild adquiere proyecto BioLantánidos de tierras raras.* Minería Chilena. Recuperado de <https://www.mch.cl/negocios-industria/hochschild-adquiere-938-de-propiedad-en-proyecto-biolantanidos/>.
- **Minnovex. (s.f.).** *JRI S.A.: Investigación y desarrollo para la recuperación de elementos de valor desde relaves.* Minnovex. Recuperado de <https://minnovex.cl/jri-s-a-investigacion-y-desarrollo-para-la-recuperacion-de-elementos-de-valor-desde-relaves/>.
- **Mordor Intelligence. (s.f.).** *Neodymium market - Growth, trends, COVID-19 impact, and forecasts (2023 - 2028).* Mordor Intelligence. Recuperado de <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/neodymium-market>.
- **Onstad, E. (2021).** *China frictions steer electric automakers away from rare earth magnets.* Recuperado de <https://www.reuters.com/business/autos-transportation/china-frictions-steer-electric-automakers-away-rare-earthmagnets-2021-07-19>.
- **Organitza'l Orgànica. (s.f.).** *Cómo reciclar imanes de neodimio de manera eficiente.* Recuperado de <https://organitzalorganica.es/reciclar-iman-es-de-neodimio/>.

- **Paramérica Minera. (2024, 01 de febrero).** *Neodimio, un metal crucial en la era de la tecnología sostenible.* Recuperado de <https://paramericaminera.com.ar/2024/02/01/neodimio-metal-crucial-en-tecnologia-sostenible/>.
- **Periodic Table One. (s.f.).** *Neodimio (Nd).* Recuperado de <https://www.periodictable.one/es/elemento/60>.
- **Pimienta Posso, J. W. (2014).** *Un breve vistazo a la tabla periódica de los elementos.* Academia.edu. Recuperado de https://www.academia.edu/12727567/UN_BREVE_VISTAZO_A_LA_TABLA_PERIODICA_DE_LOS_ELEMENTOS.
- **Pistilli, M. (2021).** *Rare earth elements prices 101.* Recuperado de <https://investingnews.com/daily/resource-investing/critical-metals-investing/rare-earth-investing/rare-earth-metals-prices/>.
- **Porsche Newsroom. (2023).** *Metales de tierras raras para la electromovilidad: Neodimio en autos deportivos eléctricos.* Recuperado de <https://newsroom.porsche.com/es/2023/tecnologia/PLA-porsche-engineering-metales-tierras-raras-electromovilidad-neodimio-autos-coches-carros-deportivos-electricos--32153.html>.
- **Portal Minero. (2024, 2 de septiembre).** *Avanza proyecto para recuperar tierras raras desde relaves en la comuna de Taltal.* Portal Minero. Recuperado de <https://www.portalminero.com/wp/avanza-proyecto-para-recuperar-tierras-raras-desde-relaves-en-la-comuna-de-taltal/>.

- **Pozo Morales, N. (2023).** *Tierras raras en Chile: recursos estratégicos para esta nueva era. Escenarios Actuales, 28(3), 109-120.* Centro de Estudios e Investigaciones Militares. Santiago de Chile. Recuperado de <https://www.cesim.cl/wp-content/uploads/2023/12/Revista-Escenarios-Actuales-nov-2023-111-122.pdf>.
- **RCC Industrial. (2024, 8 de mayo).** *Imanes de neodimio (NdFeB) sinterizado.* Recuperado de <http://rccindustrial.com/iman-es-de-neodimio-ndfeb-sinterizado/>.
- **Relaves con Valor. (2021, enero 21).** *Tierras raras en Chile: La necesidad de fortalecer el conocimiento.* Relaves con Valor. Recuperado de <https://relavesconvalor.cl/2021/01/25/tierras-raras-en-chile-la-necesidad-de-fortalecer-el-conocimiento/>.
- **Reporte Minero. (2023, agosto 28).** *Proyecto en Biobío sería el primero en producir Tierras Raras de forma limpia.* Recuperado de <https://www.reporteminero.cl/noticia/noticias/2023/08/proyecto-biobio-tierras-raras>.
- **Reyes, V. (2020, October 4).** *Tierras raras en Bío Bío y Atacama: La potencial caja de ahorro de Chile.* Mining Press. Recuperado de <https://miningpress.com/nota/332618/tierras-raras-en-bio-bio-y-atacama-la-potencial-caja-de-ahorro-de-chile>.
- **Rochester Magnet. (2023, July 3).** *7 aplicaciones de los imanes de neodimio envehículos eléctricos.* Recuperado de <https://rochestermagnet.com/blog/entry/applications-of-neodymium-magnets-in-electric-motor-vehicles/>.

- **Santos Filho, B. G., Lobato, A. K. S., Silva, R. B., Schmidt, D., Costa, R. C. L., Alves, G. A. R., & Neto, C. O. (2009).** *Growth of lettuce (Lactuca sativa L.) in protected cultivation and open field. Journal of Applied Sciences Research*, 5(5), 529-533. Recuperado de <https://doi.org/10.17660/ActaHortic.2018.1205.108>.
- **Seequent. (2024, septiembre 30).** *India diseña el primer y mayor proyecto integrado de energía renovable del mundo.* Recuperado de <https://www.seequent.com/es/india-disena-el-primer-y-mayor-proyecto-integrado-de-energia-renovable-del-mundo/>.
- **Sonami. (2023, julio).** *Boletín N° 1.371: Minero aclara impulsa el primer proyecto de tierras raras del país.* Sociedad Nacional de Minería. Recuperado de https://www.sonami.cl/v2/wp-content/uploads/2023/08/1371_2023_08.pdf.
- **Strategic Metals Invest. (2024, noviembre 22).** *Neodymium prices.* Recuperado de <https://strategicmetalsinvest.com/neodymium-prices/>.
- **Sumitomo Corporation, & MP Materials Corp. (2023, febrero 22).** *MP Materials y Sumitomo Corporation fortalecen el suministro de tierras raras en Japón.* Sumitomo Corporation. Recuperado de <https://www.sumitomocorp.com/en/jp/news/topics/2023/group/20230222>.
- **Supermagnete. (2021-2022).** *¿Cómo evoluciona el precio de los imanes de neodimio?* Recuperado de <https://www.supermagnete.es/faq/Como-evolucionael-precio-de-los-imanes-de-neodimio>.

- **Swissinfo. (2022, 07 de noviembre).** *La empresa australiana Arafura suministrará minerales raros a Hyundai y Kia.* Swissinfo. Recuperado de <https://www.swissinfo.ch/spa/la-empresa-australiana-arafura-suministrar%C3%A1-minerales-raros-a-hyundai-y-kia/48035736>.
- **TecNM. (2020).** *La lechuga (Lactuca sativa L.) y su relación con el neodimio para mejorar su cultivo.* Congreso Nacional de Investigación, 1, 84-80. Recuperado de <https://ojs.valladolid.tecnm.mx/index.php/CongresoNacional/article/view/84/80>.
- **Trading Economics. (2024).** *Neodimio - contrato de futuros - precios.* Recuperado de <https://es.tradingeconomics.com/commodity/neodymium>.
- **Transparency Market Research. (2024).** *Neodymium market - global industry analysis, size, share, growth, trends, and forecast 2021–2031.* Transparency MarketResearch .Recuperado de <https://www.transparencymarketresearch.com/neodymium-market.html>.
- **TY Magnets. (s.f.).** *Imanes de neodimio-hierro-boro en vehículos eléctricos.* Recuperado de <https://tymagnets.com/es/iman-es-de-neodimio-hierro-boro-en-veh%C3%ADculos-el%C3%A9ctricos/>.
- **Yang, Y., Walton, A., Sheridan, R., Güth, K., Gauß, R., Gutfleisch, O., Buchert, M., Steenari, B.-M., Van Gerven, T., Jones, P.T., & Binnemans, K. (2017).** *REE Recovery from End-of-Life NdFeB Permanent Magnet Scrap: A Critical Review.* *J. Sustain. Metall.*, 3(1), 122–149. Recuperado de <https://link.springer.com/article/10.1007/s40831-016-0090-4>.

- **Zamora, A. (2024).** *Exploración de aplicaciones industriales del neodimio en tecnologías sostenibles.* Recuperado de <https://example.com/neodimio-industrias-sostenibles>.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE GRÁFICAS

- **Reimer, M., Yang, Y., & Binnemans, K. (2017).** *REE recovery from end-of-life NdFeB permanent magnet scrap: A critical review.* *Journal of Sustainable Metallurgy*, 3(1), 122–149. <https://doi.org/10.1007/s40831-016-0090-4>.
- **Bukold, S. (s.f.).** *Elektromobilität: Ein globaler Überblick.* EnergyComment. Recuperado de <https://www.energycomment.de/elektromobilitaet-ein-globaler-ueberblick/>.
- **Trading Economics. (2012-2024).** *Neodymium.* Recuperado de <https://es.tradingeconomics.com/commodity/neodymium>.
- **Data Bridge Market Research. (2022, junio).** *Mercado mundial de neodimio: tendencias de la industria y pronóstico hasta 2029.* Recuperado de <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-neodymium-market>.
- **Supermagnete. (s.f.).** *¿Cómo evoluciona el precio de los imanes de neodimio?* Recuperado de <https://www.supermagnete.es/faq/Como-evolucion-a-el-precio-de-los-iman-es-de-neodimio>.
- **Mordor Intelligence. (s.f.).** *Neodymium market - Growth, trends, COVID-19 impact, and forecasts (2023 - 2028).* Mordor Intelligence. <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/neodymium-market>.

- **Emergen Research. (s.f).** *Neodymium market size, share, industry forecast by 2032.* Recuperado de <https://www.emergenresearch.com/industry-report/neodymium-market>.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE FIGURAS

- **Keisan, R. (2016).** *Productos de energía típicos de los distintos tipos de imanes.* ResearchGate. Recuperado de https://www.researchgate.net/figure/Figura-1-Productos-de-energia-tipicos-de-los-distintos-tipos-de-imanen-Keisan-2016_fig1_327641397.
- **Mordor Intelligence. (s.f).** *Neodymium market - Growth, trends, COVID-19 impact, and forecasts (2023 - 2028).* Mordor Intelligence. Recuperado de <https://www.mordorintelligence.com/es/industry-reports/neodymium-market>.
- **REVE. (2024, agosto 29).** *El proyecto de eólica flotante de Mainstream Renewable Power y Ocean Winds obtiene la evaluación de impacto ambiental para un parque eólico marino de 1,1 GW en Corea del Sur.* Actualidad del sector eólico en España y en el mundo. Recuperado de <https://www.evwind.com/2024/08/29/el-proyecto-de-eolica-flotante-mainstream-renewable-power-y-ocean-winds-obtiene-la-evaluacion-de-impacto-ambiental-para-un-parque-eolico-marino-de-11-gw-en-corea-del-sur/>.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS DE TABLAS

- **Álvarez Quicaño, D. C. (2018).** *Las tierras raras y los actínidos: Estado natural, propiedades físicas, importancia en tecnología de punta, aplicaciones, impactos sobre la biodiversidad.* Lima, Perú: Repositorio UNE.
Recuperado de <https://repositorio.une.edu.pe/server/api/core/bitstreams/f7ff8f26-58b0-4f2e-a80c-65034777e55c/content>.
- **Data Bridge Market Research. (2022, junio).** *Mercado mundial de neodimio: tendencias de la industria y pronóstico hasta 2029.* Recuperado de <https://www.databridgemarketresearch.com/reports/global-neodymium-market>.
- **Strategic Metals Invest. (2024, diciembre 06).** *Neodymium prices.* Recuperado de <https://strategicmetalsinvest.com/neodymium-prices/>.