



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**RECUPERACIÓN DE NEODIMIO A PARTIR DE DISCOS DUROS
POST CONSUMO USANDO ÁCIDOS ORGÁNICOS, INORGÁNICOS
Y BASES Y EL DISEÑO DE LIXIVIACIÓN**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR:

BRYAN FELIPE ONOFRE GUILCAZO

Riobamba – Ecuador

2023



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO

**FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA**

**RECUPERACIÓN DE NEODIMIO A PARTIR DE DISCOS DUROS
POST CONSUMO USANDO ÁCIDOS ORGÁNICOS, INORGÁNICOS
Y BASES Y EL DISEÑO DE LIXIVIACIÓN**

Trabajo de Integración Curricular

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar al grado académico de:

INGENIERO QUÍMICO

AUTOR: BRYAN FELIPE ONOFRE GUILCAZO

DIRECTOR: Ing. HUGO JAVIER SÁNCHEZ MORENO, MSc.

Riobamba – Ecuador

2023

© 2023, Bryan Felipe Onofre Guilcazo

Se autoriza la reproducción total o parcial, con fines académicos, por cualquier medio o procedimiento, incluyendo la cita bibliográfica del documento, siempre y cuando se reconozca el Derecho de Autor.

Yo, Bryan Felipe Onofre Guilcazo, declaro que el presente Trabajo de Integración Curricular es de mi autoría y los resultados del mismo son auténticos. Los textos en el documento que provienen de otras fuentes están debidamente citados y referenciados.

Como autor asumo la responsabilidad legal y académica de los contenidos de este Trabajo de Integración Curricular; El patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 14 de abril del 2023

A handwritten signature in blue ink, consisting of a stylized 'B' and 'G' followed by a flourish.

Bryan Felipe Onofre Guilcazo
0803490705

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA INGENIERÍA QUÍMICA

El Tribunal del Trabajo de Integración Curricular certifica que: el Trabajo de Integración Curricular; Tipo: Proyecto de Investigación, **RECUPERACIÓN DE NEODIMIO A PARTIR DE DISCOS DUROS POST CONSUMO USANDO ÁCIDOS ORGÁNICOS, INORGÁNICOS Y BASES Y EL DISEÑO DE LIXIVIACIÓN**, realizado por el señor: **BRYAN FELIPE ONOFRE GUILCAZO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Tribunal del Trabajo de Integración Curricular, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal autoriza su presentación.

	FIRMA	FECHA
Ing. Paul Gustavo Palmay Paredes. PhD PRESIDENTE DEL TRIBUNAL		2023-04-14
Ing. Hugo Javier Sánchez Moreno. MSc. DIRECTOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-04-14
Ing. Segundo Hugo Calderón. MSc. ASESOR DEL TRABAJO DE INTEGRACIÓN CURRICULAR		2023-04-14

DEDICATORIA

El presente trabajo se lo dedico en primer lugar a Dios por darme guía y fortaleza en el transcurso de mi vida para poder salir adelante con cada reto que me he propuesto. A mis amados padres María Guilcazo y Felipe Onofre porque me han enseñado grandes valores que me han convertido en el hombre de bien que hoy en día soy, y a mi hermana Johana Onofre que me ha ayudado en cualquier situación y dándome el apoyo necesario, además de demostrarme que con esfuerzo y dedicación puedo llegar a cumplir mis sueños y por supuesto a mis amigos Jessica Llangoma y Christopher Sánchez que han estado en toda la carrera ayudándonos el uno para el otro que han hecho de esta experiencia algo muy especial y memorable.

Bryan

AGRADECIMIENTO

A Dios por prestarme salud y sabiduría para enfrentar este gran reto. A mi familia, por creer en mi capacidad, darme ánimos, aconsejarme, apoyarme económica y emocionalmente en cada paso que he dado en mi vida.

A mi director de tesis, Ing. Hugo Sánchez y a mi colaborador Ing. Hugo Calderón por haberme entregado parte de su valioso tiempo para el desarrollo del presente trabajo mediante sus asesorías y recomendaciones.

A los docentes y técnicos de laboratorio que han compartido sus conocimientos y experiencias para forjar de mí un gran profesional en la capacidad de servir a la sociedad y el país.

Finalmente agradezco a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Facultad de Ciencias, Carrera Ingeniería Química, por brindarme una educación de excelencia impartida por grandes docentes comprometidos con su labor.

Bryan

ÍNDICE DE CONTENIDO

ÍNDICE DE TABLAS.....	x
ÍNDICE DE ILUSTRACIONES.....	xi
ÍNDICE DE ANEXOS.....	xii
RESUMEN.....	xiii
ABSTRACT.....	xiv
INTRODUCCIÓN.....	1

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	2
1.1 Identificación del problema.....	2
1.2 Limitaciones y Delimitaciones.....	3
1.3 Problema General de la investigación.....	3
1.4 Problemas Específicos de la investigación.....	3
1.5 Objetivos.....	3
1.5.1 General.....	3
1.5.2 Específicos.....	3
1.6 Justificación.....	4
1.6.1 Justificación Teórica.....	4
1.6.2 Justificación Metodológica.....	5
1.6.3 Justificación Práctica.....	5
1.7 Hipótesis.....	5

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO.....	6
2.1 Antecedentes de investigación (investigaciones afines en artículos científicos originales o de revisión).....	6
2.2 Referencias Teóricas.....	7
2.2.1 Minería.....	7
2.2.2 Nivel de reciclaje y valorización de tierras raras de RAEE.....	7
2.2.3 Unidades de disco duro (HDD).....	8
2.2.4 Efectos al medioambiente.....	8
2.2.5 Aplicaciones de los imanes de NdFeB.....	9

2.2.6	<i>Fabricación y aplicaciones de imanes NdFeB</i>	9
2.2.7	<i>Minería de REE</i>	10
2.2.7.1	<i>Proceso productivo</i>	10
2.2.7.2	<i>Hidrometalurgia</i>	10
2.2.8	<i>Características físicas y químicas de las tierras raras</i>	11
2.2.8.1	<i>Estados de Oxidación</i>	11
2.2.8.2	<i>Propiedades magnéticas</i>	12
2.2.8.3	<i>Estado natural y separación</i>	12
2.2.8.4	<i>Ligantes de oxígeno</i>	12
2.2.8.5	<i>Ligantes de nitrógeno</i>	12
2.2.9	<i>Aplicación De Tierras Raras</i>	12
2.2.9.1	<i>Procesos De Recuperación De Tierras Raras</i>	14

CAPÍTULO III

3.	MARCO METODOLÓGICO	16
3.1	Enfoque de investigación	16
3.2	Nivel de Investigación	16
3.3	Diseño de investigación	16
3.3.1	<i>Según la manipulación o no de la variable independiente)</i>	16
3.4	Tipo de estudio	17
3.5	Población y Planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra	17
3.5.1	<i>Población y planificación</i>	17
3.5.2	<i>Selección de la muestra</i>	17
3.6	Métodos, técnicas e instrumentos de investigación	18
3.6.1	<i>Caracterización física de los magnetos o imanes de discos duros.</i>	18
3.6.1.1	<i>Densidad aparente de los magnetos de discos duros.</i>	18
3.6.1.2	<i>Densidad real de los magnetos de discos duros.</i>	18
3.6.2	<i>Caracterización química del magneto de discos duros</i>	18
3.6.3	<i>Influencia del Agente de lixiviación</i>	19
3.6.4	<i>Proceso de lixiviación ácida en base al agente de lixiviación.</i>	21
3.6.5	<i>Evaluación de la lixiviación ácida a diferente concentración.</i>	21
3.6.6	<i>Evaluación de la influencia del tiempo de lixiviación.</i>	21
3.6.7	<i>Evaluación de la influencia del porcentaje de sólidos en la lixiviación ácida</i>	22

CAPÍTULO IV

4.	MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN	23
4.1	Deducciones de la caracterización física del magneto de disco duro.	23
4.1.1	<i>Resultados de la caracterización física del magneto de disco duro</i>	23
4.1.2	<i>Resultado de la densidad aparente del magneto de disco duro</i>	23
4.1.3	<i>Resultado de la densidad real del magneto de disco duro.</i>	24
4.2	Resultado de la caracterización química de la muestra del magneto de disco duro	24
4.2.1	<i>Análisis de la Espectroscopia Infrarroja (IR) del Magneto de Disco Duro</i>	25
4.3	Resultado, interpretación y análisis de la influencia del Agente Lixivante	27
4.4	Resultados de la evaluación de la lixiviación ácida	33
4.4.1	<i>Resultado, interpretación y análisis de la evaluación de la lixiviación ácida a diferente concentración</i>	33
4.4.2	<i>Resultado, interpretación y análisis de la evaluación de la influencia del tiempo de lixiviación</i>	34
4.5	Discusión de Resultados	36

CAPÍTULO V

5.	MARCO PROPOSITIVO	39
5.1	Objetivos	39
5.1.1	<i>Objetivo General</i>	39
5.1.2	<i>Objetivos Específicos</i>	39
5.2	Justificación	39
5.3	Propuesta	40

CONCLUSIONES	41
---------------------------	----

RECOMENDACIONES	42
------------------------------	----

BIBLIOGRAFÍAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1-3: Condiciones de trabajo para los ácidos inorgánicos	20
Tabla 2-3: Condiciones de trabajo para los ácidos orgánicos.	20
Tabla 3-3: Condiciones de trabajo con los cuales se realizaron los ensayos	21
Tabla 4-3: Evaluación de la influencia del tiempo de lixiviación.....	22
Tabla 5-3: Influencia del % de sólidos en la lixiviación ácida.....	22
Tabla 1-4: Resultados de la densidad real y aparente	23
Tabla 2-4: Resultados análisis químicos del magneto de disco duro.....	25
Tabla 3-4: Espectro infrarrojo de la muestra del magneto de disco duro	26
Tabla 4-4: Preparación de las soluciones de ácidos inorgánicos de 100 ml	27
Tabla 5-4: Preparación de las soluciones ácidos orgánicos con un volumen de 100 ml.....	27

ÍNDICE DE ILUSTRACIONES

Ilustración 1-3: Selección de la muestra.....	17
Ilustración 1-4: Espectro infrarrojo de la muestra del magneto de disco duro.....	26
Ilustración 2-4: Evaluación del agente lixivante	33
Ilustración 3-4: Evaluación a diferente concentración.	34
Ilustración 4-4: Evaluación de la influencia del tiempo de lixiviación.	35
Ilustración 5-4: Evaluación de la influencia del porcentaje de sólidos.	36
Ilustración 6-4: Ácido Sulfúrico.....	37
Ilustración 7-4: Diagrama de distribución de especies para Nd^{3+} en función del pH del sistema Cl a 25°C (2,0 M Cl^- y 0,008 M Nd^{3+})	37
Ilustración 8-4: Diagrama de distribución de especies para Nd^{3+} en función del pH del sistema SO_4^{-2} a 25°C (2,0 M SO_4^{-2} y 0,008 M Nd^{3+}).....	38

ÍNDICE DE ANEXOS

ANEXO A: EXTRACCIÓN DE LOS CD DE LOS DISPOSITIVOS

ANEXO B: PROCEDIMIENTO DE MOLIENDA DE LOS CDs

ANEXO C: FICHAS TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN

ANEXO D: DISEÑO DE LIXIVIACIÓN

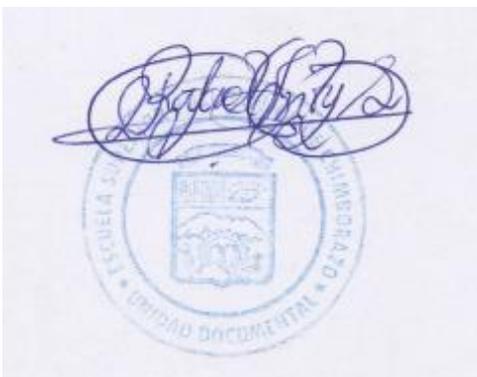
ANEXO E: HOJA DE ESPECIFICACIÓN DEL TANQUE DE LIXIVIACIÓN

RESUMEN

La contaminación ambiental está aumentando debido al alto ritmo de desarrollo industrial y al afán de la población por adquirir bienes de consumo en especial aparatos eléctricos y electrónicos, que son desechados rápidamente por lo que es necesario establecer protocolos para el manejo responsable de los mismos, por lo tanto, el objetivo de la presente investigación fue recuperar neodimio a partir de discos duros post consumo usando ácidos orgánicos, inorgánicos y bases y diseñar un proceso de lixiviación para poder minimizar la contaminación del aire y suelo que son provocados por el aumento de desechos electrónicos. La metodología implementada tuvo un enfoque cuantitativo y cualitativo, se utilizaron 5 ácidos como agentes lixiviantes tales como ácido clorhídrico, nítrico, sulfúrico, oxálico y cítrico para realizar la metodología de lixiviación ácida y de esta manera determinar el mejor agente lixiviador y las mejores condiciones de trabajo (concentración, tiempo y porcentaje de sólidos) por medio de soluciones y valores constantes. Mediante esta metodología se logró determinar que el mejor agente lixiviante para recuperar neodimio fue el ácido sulfúrico, con una concentración de 3 M, un tiempo de 24h y un porcentaje de sólidos de 0.1%. En este contexto se concluye que al tratar con ácido oxálico a concentraciones altas no proporciona buena recuperación de neodimio debido a su baja solubilidad, en cambio con el ácido sulfúrico si recupera a altas concentraciones dándonos la mayor recuperación de neodimio de 72.72% con un sistema de tanque de lixiviación de turbina rushton y una tapa toriesférica, para de esta manera reducir la contaminación ambiental.

Palabras clave: <LIXIVIACIÓN>, <NEODIMIO>, <AGENTES LIXIVIANTE>, <CONCENTRACIÓN>, <RECUPERACIÓN>, <DISCO DURO>.

0743-DBRA-UTP-2023



ABSTRACT

Environmental pollution is increasing due to the high rate of industrial development and the eagerness of the population to acquire consumer goods, especially electrical and electronic devices, which are quickly discarded, so it is necessary to establish protocols for the responsible management of them; therefore, the objective of this research was to recover neodymium from post consumption hard drives using organic and inorganic acids and bases and designing a leaching process to minimize air and soil pollution caused by the increase of electronic waste. The methodology implemented had a quantitative and qualitative approach, 5 acids were used as leaching agents such as hydrochloric, nitric, sulfuric, oxalic and citric acid to perform the acid leaching methodology and thus determine the best leaching agent and the best working conditions (concentration, time and percentage of solids) by means of solutions and constant values. Through this methodology it was possible to determine that the best leaching agent to recover neodymium was sulfuric acid, with a concentration of 3 M, a time of 24h and a solids percentage of 0.1%. In this context it is concluded that treating with oxalic acid at high concentrations does not provide good neodymium recovery due to its low solubility; on the other hand, with sulfuric acid it does recover at high concentrations yielding the highest neodymium recovery of 72.72% with a rushton turbine leaching tank system and a torispherical lid, thus reducing environmental pollution.

Keywords: <LEACHING>, <NEODYMIUM>, <LEACHING AGENTS>, <CONCENTRATION>, <RECOVERY>, <HARD DISC>.



Abg. Ana Gabriela Reinoso. Mgs.

Ced: 1103696132

INTRODUCCIÓN

El neodimio se utiliza en una amplia gama de componentes de equipos electrónicos, incluidos los imanes permanentes de neodimio-hierro-boro (NdFeB) empleados en aplicaciones que requieren alta energía y fuerza coercitiva. Además de los imanes permanentes, los elementos de tierras raras se utilizan en muchos otros productos industriales, como baterías recargables, catalizadores, polvos de pulido, pantallas de cristal líquido (LCD), diodos emisores de luz (LED) y lámparas fluorescentes. La demanda de tierras raras ha aumentado como resultado de su uso en tecnologías de energía verde, como turbinas eólicas y vehículos eléctricos e híbridos.

Como consecuencia, el neodimio se ha incluido en la lista de materias primas críticas en muchos países y regiones, incluidos los Estados Unidos y la Unión Europea, debido a la vulnerabilidad de la cadena de suministro (Lie y Liu 2021). Sin embargo, el reciclaje de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos es aún muy bajo, en torno al 12,5% de su potencial. La extracción de tierras raras a partir de minerales, así como su recuperación a partir de fuentes secundarias, se realiza mediante técnicas mecánicas, pirometalúrgicas e hidrometalúrgicas. Algunos de los procesos hidrometalúrgicos para la recuperación de tierras raras emplean un paso de tostado previo para obtener los óxidos metálicos correspondientes. El objetivo de este paso de tostado es aumentar tanto la selectividad como la eficiencia de lixiviación.

La adaptación de procesos hidrometalúrgicos para el uso de ácidos orgánicos es una alternativa ambientalmente más segura que genera efluentes fácilmente degradables y tiene la ventaja de no emitir gases tóxicos a la atmósfera. En contraste con el fuerte ácidos inorgánicos (H_2SO_4 , HCl y HNO_3) normalmente utilizados en procesos convencionales (Ciro et al. 2019).

CAPÍTULO I

1. PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1 Identificación del problema

La rápida innovación tecnológica, junto con un mayor uso de productos eléctricos y electrónicos, ha generado grandes preocupaciones relacionadas con el manejo de los desechos sólidos asociados. Primero se buscaron soluciones para los problemas más urgentes, relacionados con los desechos sólidos urbanos y los desechos industriales (Niskanen, Lahtinen y Perämäki 2022). Sin embargo, debido al alto ritmo de desarrollo industrial, especialmente equipos eléctricos y electrónicos, estos dispositivos son desechados rápidamente, lo que genera la necesidad de establecer protocolos para el manejo responsable de estos residuos. La estructura de los residuos de instrumentos electrónicos y eléctricos incluye muchas sustancias como los metales, que tienen un alto potencial contaminante (Liu et al. 2020). En 2016, la producción mundial de aparatos electrónicos y eléctricos alcanzó los 44,7 millones de toneladas, de las cuales el 8,7 % consistía en pequeños equipos de telecomunicaciones, incluidos teléfonos móviles y ordenadores personales. Se esperaba que la producción de residuos de aparatos electrónicos y eléctricos alcanzara los 52,2 millones de toneladas en 2018 (Shahbaz 2022).

En China e India, aumenta la generación de residuos del 98% y 145% para 2020 (Liu et al. 2020). En la actualidad hay un gran interés por el beneficio de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE), ya que este material contiene tanto metales ferrosos como no ferrosos que suponen aproximadamente el 60% de la masa de los residuos (Sui, Cui y Huang 2022). Además de los metales, otros componentes importantes de los RAEE son los plásticos y el vidrio (Kumar Parhi, Kumari Misra y Kumar Jyothi 2023). En las unidades de disco duro (HDD) de las computadoras, los imanes son los componentes principales que contienen cantidades de materiales valiosos (Sui, Cui y Huang 2022) presentaron un análisis de los principales dispositivos eléctricos y electrónicos y sus composiciones, destacando que alrededor de 32 kilotonnes de HDD se desechan anualmente, con una probabilidad de que este valor alcance los 60 kilotonnes hasta finales del 2022.

Este aumento se debe a las limitadas vidas útiles de los equipos, así como a la sustitución de los actuales HDD por discos de estado sólido (SSD) (Liu et al. 2020). Los principales elementos presentes en los HDD son aluminio (84,9 %), hierro (11,9 %), cobre (2,9 %) y neodimio (0,2 %), junto con cantidades más pequeñas de oro, plata, disprosio, paladio y praseodimio (Du et al. 2022). Por todo lo manifestado los discos duros de post consumo se puede reflexionar como una fuente suplente de estos metales y deben ser apreciados.

1.2 Limitaciones y delimitaciones

Mediante los análisis físicos, químicos y mineralógicos fisicoquímico se determinará el mejor agente lixivante tanto orgánico como inorgánico para la recuperación de Neodimio.

1.3 Problema general de la investigación

¿Qué tan efectivas son las medidas existentes para apoyar el desarrollo de nuevos modelos de negocios basados en la eco-innovación?

1.4 Problemas específicos de la investigación

- ¿Cómo se puede anticipar y facilitar el surgimiento de cadenas de valor basadas en la recuperación y el reciclaje de tierras raras?
- ¿Qué tan rentable es el Neodimio en aparatos electrónicos?
- ¿Cuáles son los principales impulsores de una rápida explotación industrial del reciclaje de tierras raras a partir de flujos de desechos electrónicos?
- ¿Todos los elementos de tierras raras contaminan el ambiente?

1.5 Objetivos

1.5.1 General

- Recuperar neodimio a partir de los magnetos de discos duros de computadoras post consumo utilizando ácidos orgánicos e inorgánicos y diseñar el proceso de lixiviación.

1.5.2 Específicos

- Caracterizar física y química los magnetos de discos duros de computadoras post consumo.
- Evaluar en base a las variables el proceso de lixiviación mediante ácidos inorgánicos (clorhídrico, nítrico y sulfúrico).
- Evaluar en base a las variables el proceso de lixiviación mediante ácidos orgánicos (cítrico y oxálico).

1.6 Justificación

1.6.1 Justificación teórica

El actual proyecto se enfoca en la recuperación de neodimio (Nd) obtenido de una materia prima que es el disco duro, por lo cual es un desecho no utilizado y necesita ser valorizado los magnetos. El Apartamento de Energía de los Estados Unidos (Rivera et al. 2019, pp. 162-164) informaron que los cinco elementos de tierras raras más críticos son el neodimio (Nd), el europio (Eu), el terbio (Tb), el disprosio (Dy) y el itrio (Y). Uno de los factores que hacen que las tierras raras sean materias primas críticas es que más del 90 % de su producción se encuentra en China, a pesar de que el país posee menos del 40 % de las reservas mundiales comprobadas. China ha adquirido conocimientos especializados en la página 5 de 7 extracción de tierras raras, así como en la separación de los minerales individuales (Makarava et al., 2022, p. 107).

El neodimio en su forma de aleación se utiliza en la fabricación de la mayoría de los imanes permanentes de alta energía con aplicaciones en diversas industrias, como la electrónica. Se utiliza en la fabricación de electrodomésticos como televisores en color, lámparas fluorescentes y cristalería. También se utiliza para eliminar el color azul causado por los contaminantes de hierro (Omodara et al., 2019, p. 119). El precio del neodimio se duplicó en el tercer trimestre de 2017 a 76 dólares el kilo en comparación con el comienzo del año. Por lo tanto, el neodimio registró el mayor aumento de precio entre los 15 metales de tierras raras más importantes en el último año. El precio ha subido a poco menos de 100 euros el kilo (Omodara et al., 2019, p. 120). Las tierras raras se han convertido en un pilar de la manufactura de la tecnología, no solo por sus excelentes características eléctricas, magnéticas y ópticas, sino también porque representan un paso adelante en el cambio hacia una economía verde y ecológica y sus usos. Estimular la demanda y disparar los precios de los elementos de tierras raras (Wamea et al., 2022, p. 131). En la actualidad existen dos métodos principales en la recuperación de metales que son: hidrometalúrgico y pirometalúrgico (Makarava et al., 2022, 108).

Donde la presente investigación se enfocará en el hidrometalúrgico: que se disuelven los metales por lixiviación, utilizando un ácido (orgánico o inorgánico) (Karal et al. 2021). Con el presente estudio se basará principalmente en la recuperación del Neodimio a partir de lixiviación con la utilización de ácidos orgánicos e inorgánicos, donde nos permitirá demostrar la viabilidad del mejor agente lixivante en base a sus variables, además de realizar el diseño de una operación unitaria del proceso de recuperación del metal como es el caso del lixiviado (Makarova et al., 2020, 1383).

1.6.2 Justificación metodológica

Lo sugerido (Shahbaz 2022, p.23) relacionado con la caracterización de áreas geográficamente inusuales (depósitos naturales y de desechos), se da el paso de tesorería descrito. A continuación, se realiza un paso de selección de muestras, durante el cual hay un análisis la composición química y mineral como evidencia de la presencia de elementos de tierras raras en los residuos seleccionados. Finalmente, se lleva a cabo la fase de obtención de la concentración de REO y análisis de los resultados, con lo cual se logra el tercer objetivo.

1.6.3 Justificación práctica

Los beneficiarios de este proyecto de investigación serían los grupos de investigación que existen en la ESPOCH, los cuales se han dedicado a experimentar una forma de erradicar la contaminación ambiental, pero el más beneficiado es el entorno y las leyes del ambiente.

1.7 Hipótesis

Usando un 5% de los ácidos orgánicos como el cítrico y el oxálico se podrá recuperar el Neodimio para su reutilización en aparatos electrónicos y eléctricos para su mayor efectividad.

CAPÍTULO II

2. MARCO TEÓRICO

2.1 Antecedentes de investigación (investigaciones afines en artículos científicos originales o de revisión)

El término "*tierra rara*" se deriva del antiguo nombre del término óxido, que quiere decir tierra, y "rara" se refiere al inconveniente de disgregar los elementos de los minerales y sus bajas concentraciones en la naturaleza. Estos contienen un grupo de 17 elementos, incluidos el escandio, el itrio y la serie de los lantánidos (Musariri et al., 2019, pp.105-107). Químicamente iguales, se encuentran juntamente con los minerales, y operan como una sola entidad, lo que complica su separación y dificulta su producción a gran escala (Karal et al., 2021, p.135). Aunque hay algunas excepciones, los elementos de las tierras raras contienen radios iónicos y estados de oxidación idénticos. Esta propiedad les permite reemplazarse entre sí en las estructuras cristalinas de los minerales, por lo que muchos de ellos aparecen en los mismos minerales (Reisdörfer, Bertuol y Tanabe, 2019, 709). Además, Radio ion Radio Ca^{2+} , Th^{4+} y U^{4+} , para que puedan reemplazar o compartir el espacio en algunas estructuras de cristal. Por esta razón, se encuentran comúnmente en rocas y minerales que contienen estos elementos (Pitcher et al., 2022, p.1038).

Los REE son materias primas esenciales para una extensa serie de aplicaciones, adjuntando la metalurgia (refinación y aleación de metales), como catalizadores en la industria automotriz y petroquímica, para colorear vidrio/cerámica, fósforos (LED, lámparas fluorescentes compactas, pantallas planas), láseres, baterías recargables de estado sólido, fibra óptica y otros. Los REE también son elementos vitales en los depósitos de combustible de estado sólido, los superconductores, el enfriamiento magnético, el almacenamiento de hidrógeno y los imanes permanentes de alto rendimiento. Los imanes permanentes juegan un papel crucial en una serie de aplicaciones de alta tecnología y energía verde, incluidas las turbinas eólicas, los automóviles híbridos, las unidades de disco duro, los parlantes de los teléfonos móviles y los micrófonos. En el cuadro siguiente se resumen los distintos usos de las REE y la cuota de demanda en 2010 (Niam et al., 2019, pp.305-307).

2.2 Referencias Teóricas

2.2.1 Minería

La explotación minera es una importante actividad económica regional consistente en la extracción de minerales que se acumulan en el suelo en forma de sedimentos (Jeon et al., 2021, pp-106-108). La minería es de interés para los geomorfólogos debido a los tipos únicos de accidentes geográficos y paisajes excavados y acumulados que son vulnerables a las amenazas geomórficas. La minería es extensa en todo el mundo. Produce más sedimentos que la construcción de carreteras pavimentadas, la construcción de viviendas o la agricultura. La minería está asociada con una mayor vulnerabilidad a los derrumbes de pendientes, erosión, inundaciones, sedimentación, hundimiento y otros peligros geomórficos (Laatikainen et al., 2021, p. 1789). Comprender y aplicar con eficacia los principios geomórficos es importante para prevenir o minimizar los efectos negativos de la minería. Este capítulo analiza los tipos y la historia de las operaciones mineras y los impactos geomórficos asociados que pueden dar como resultado formas de relieve y paisajes característicos. Luego describe los peligros geomórficos relacionados con la minería y los campos emergentes de la minería sostenible y la recuperación de tierras minadas.

Todavía tenemos mucho que aprender del estudio de los paisajes mineros, con aplicaciones potenciales en la evolución del paisaje, modelos de peligros geomórficos, recuperación y geología y geomorfología del Cuaternario. Dada la creciente población mundial y la creciente demanda de recursos minerales, la necesidad de prácticas sostenibles aumentará y la aplicación inteligente del conocimiento geomórfico en los paisajes minados será cada vez más importante (Sun, Seo y Cho, 2021, p.11).

2.2.2 Nivel de reciclaje y valorización de tierras raras de RAEE

A nivel mundial el volumen de residuos de aparatos eléctricos y electrónicos (RAEE) es enorme, se estima alrededor de 50 millones de toneladas anuales. En Europa, el monto de RAEE generados es de unos 12 millones de toneladas al año. Se espera que esto aumente en las próximas décadas a una tasa de al menos un 4 % anual (Sun, Seo y Cho, 2021, p.12). Según datos de la European Electronic Recycles Association, sus 38 miembros y más de 100 filiales facturan alrededor de 900 millones de euros y tratan aproximadamente de 2,2 millones de toneladas de RAEE al año. Sullivan calculó los ingresos del mercado de reciclaje de RAEE en Europa en alrededor de 1 000 millones EUR, y se espera que alcance los 1 500 millones EUR para 2020. La manufactura del reciclaje de RAEE se caracteriza por una estructura piramidal, con un número muy pequeño (<10) de empresas muy grandes centradas en la refinación y fundición de metales, un número mayor

(100 o 1000) en el desmantelamiento y preprocesamiento y un número mucho mayor en la recolección inicial (Behera et al., 2019, p.506).

2.2.3 Unidades de disco duro (HDD)

Varias marcas y modelos de HDD se obtuvieron de talleres de reparación de computadoras en diferentes municipios de la región de Vale do Taquari de Brasil. Los discos duros se desmontaron manualmente para quitar los imanes, después de lo cual se volvieron a montar antes de enviar a reciclar los demás componentes. En el siguiente paso, los imanes se desmagnetizaron y trituraron. La desmagnetización se logró por el método de calentamiento, utilizando diferentes temperaturas y tiempos. La eliminación del magnetismo fue evaluada por medidas de campo magnético utilizando un gaussímetro (Modelo EM 8000), con valores dados en mGs. Las temperaturas ensayadas fueron 300, 350 y 400 °C, con tiempos de 15, 30, 45 y 60 min. Finalmente, los imanes permanentes de NdFeB desmagnetizados fueron triturados en un molino de bolas durante 1 h a 90 rpm, con el fin de obtener partículas menores a 400 µm, las cuales fueron separadas por tamizado (Kumar Parhi, Kumari Misra y Kumar Jyothi, 2023, p. 1390).

2.2.4 Efectos al medioambiente

Como muchas actividades, la explotación minera plantea serios contratiempos al ambiente, debido a la extracción (extracción y trituración de materiales) y sus procesos químicos. Estos efectos pueden incluir la erosión, la pérdida de biodiversidad, la infección de las aguas subterráneas y la contaminación del suelo. En algunos casos, la deforestación alrededor de la mina se incluye como un componente adicional, con el objetivo de crear suficiente espacio para las instalaciones precisas para operar la mina y almacenar desechos. Por otra parte, la contaminación provocada por las fugas de productos químicos impacta de manera directa a la población local, si no está suficientemente controlada. En varios países, con el objetivo de disminuir su impacto en el medio ambiente y evitar posibles problemas para las comunidades vecinas, las empresas deben adherirse a normas estrictas de protección ambiental. Estas reglas requieren que las empresas mineras realicen una evaluación de impacto ambiental (EIA), desarrollen un plan de gestión ambiental, programen el cierre de minas y realicen un monitoreo ambiental durante las operaciones y después del cierre. En general, los desechos o desechos almacenados en presas, por una mala planificación y construcción, pueden presentar serios riesgos para su entorno, tales como derrumbe por falla de muros de contención, desechos acumulados bajo la influencia de la lluvia, filtros de agua en el ambiente y fugas. debajo de tanques, y acarrear multas por movimiento de viento, entre otros (Hammache et al., 2020, p.104).

2.2.5 Aplicaciones de los imanes de NdFeB

La producción mundial anual de REE permaneció bastante constante en alrededor de 120 000 toneladas (contadas como óxidos-REO) durante 2005–2015, excepto por dos años pico de 2006 y 2009 (*137 000 toneladas) según el Anuario de minerales de tierras raras del USGS publicado anualmente durante 2010–2016. Aunque hay muy pocas estadísticas públicas disponibles para la producción individual de REE en los últimos años, el USGS informaron sobre un análisis exhaustivo de la distribución global del consumo de óxido de tierras raras por sectores del mercado para el año 2008 (Ciro et al., 2019, pp. 98-99).

Aproximadamente 26 000 toneladas de REE (contadas como REO) se utilizan por año en imanes permanentes de NdFeB, que forman las aplicaciones más grandes entre todos los REE tanto en tonelaje como en valor de mercado (Niskanen, Lahtinen y Perämäki, 2022, p.35). Sin embargo, es muy difícil obtener cifras de producción de REE precisas y confiables para el uso de los imanes de NdFeB en las diferentes aplicaciones y, por lo tanto, muchas estadísticas se basan en estimaciones de diferentes fuentes y pueden diferir significativamente de una fuente a otra (Liu et al, 2020, 98).

A la gran versatilidad de las aplicaciones de los imanes REE contribuye también el hecho de que afinando su composición química añadiendo algo de Dy, Tb, Gd, Nb, Co, Cu, Ga y Al se pueden modificar algunas de las propiedades físicas y magnéticas para satisfacer amplias necesidades de aplicación. Dy y Tb se usan para aumentar la anisotropía y la coercitividad del imán, lo cual es importante para que los imanes se usen a temperaturas más altas, pero también disminuyen la remanencia y el producto energético. La adición de Gd mejora el coeficiente de temperatura. Se agregan Cu y Al para mejorar la sinterización de la aleación magnética, mientras que se agrega Nb para refinar el grano. Ga mejora la coercitividad intrínseca y la trabajabilidad en caliente de la aleación. Se agrega Co para aumentar la temperatura de Curie, y algunos imanes de NdFeB pueden contener hasta un 5 % en peso de Co. En 2008, se usaron alrededor de 26 300 toneladas de REE, incluidos Nd, Pr, Dy, Gd y Tb, contados como óxidos, para imanes. producción a nivel mundial. Para las 26 300 toneladas de REO anteriores, alrededor del 76 % de neodimio (18 200 frente a 23 900 toneladas), 70 % de praseodimio (Shahbaz, 2022, pp.1397-1400).

2.2.6 Fabricación y aplicaciones de imanes NdFeB

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. Como consecuencia de la Crisis de las Tierras Raras de 2018/2019, la investigación también se ha visto impulsada por la búsqueda de materiales de imanes permanentes

sin o con una cantidad reducida de metales críticos de tierras raras. Hay un cambio en la manera en que se aborda este problema de investigación: mientras que hasta ahora los impresionantes avances en la investigación de imanes permanentes han sido impulsados casi exclusivamente por la investigación experimental en ciencia de materiales, hoy en día, el modelado de nuevos sistemas de materiales gana más importancia (Brião, da Silva y Vieira, 2022, p.3098).

La fabricación de un imán permanente se rige por los siguientes dos principios principales: primero, elegir el material de partida adecuado que comprenda buenas propiedades intrínsecas, es decir, magnetización de saturación, temperatura de Curie y anisotropía magnetocristalina; en segundo lugar, traducir estas propiedades intrínsecas en propiedades extrínsecas funcionales, lo que es más importante, una alta magnetización remanente y coercitividad (histéresis) (Makarava et al., 2022, p.14). Esto se logra procesando los materiales apropiadamente y ajustando las respectivas microestructuras (Rivera et al., 2019, p. 169).

2.2.7 Minería de REE

2.2.7.1 Proceso productivo

El primer punto en cualquier o alguna cadena de producción de minerales es la exploración geológica, entendida como la técnica de identificación de yacimientos, determinando la rentabilidad en función de la concentración del elemento o elementos de interés. Características del contenido, escala y ubicación geográfica a alcanzar (Omodara et al., 2019, p.121).

2.2.7.2 Hidrometalurgia

El tratamiento hidrometalúrgico pertenece a la tecnología de extracción de minerales de materiales que los contienen, por medio de un medio acuoso a baja temperatura. Esto se desarrolló en sus propios pasos secuenciales (Karal et al., 2021, p.112).

- **Lixiviación:** También nombrada disolución selectiva, es un paso esencial en el desarrollo de hidrometalurgia que consiste en disolver el metal a recuperar a través de materia prima sólida, en una disolución acuosa, por el acto de los agentes químicos. Coincidentemente, un agente exterior que puede actuar como agente oxidante o reductor y participar en la solución del metal en cuestión puede intervenir modulando el potencial redox de la solución lixivante (Musariri et al., 2019, p.176).

- El Material lixiviado: La restauración de metales de los materiales lixiviados sigue en gran medida la matriz mineral, considerando tanto las especies valiosas como los grupos relacionados (Karal et al., 2021, p.78).
- PH de Operación: El pH activo es una de las medidas más fundamentales en la lixiviación de sustancias, de modo que determina la distribución de especies en el medio acuático y al manipularlo se logra la selectividad cuantitativa de las operaciones mineras hidrometalúrgicas (Rho, Sun y Cho, 2020, pp. 798-790).
- Entendimiento sólido y líquido: Una solución acuosa más grande que contiene los reactivos de lixiviación aumenta el número de reactivos disponibles, lo que perfecciona la reacción (Kumar Parhi, Kumari Misra y Kumar Jyothi, 2023, p.1388). Una proporción de líquido más alta mejora la eficacia de la extracción; no obstante, se debe considerar la carga y la manipulación de masivos volúmenes de líquido al diseñar los dispositivos de circuito y la economía del proceso.
- Tiempo: Desempeña un papel con la recuperación y el costo, con el tiempo, la solución metálica se incrementa a un cierto nivel de recuperación y, por lo tanto, el efecto varias veces (Quartarolli et al., 2022, p.13).

2.2.8 Características físicas y químicas de las tierras raras

Entre estos factores, el factor que afecta sus propiedades es el radio iónico, a diferencia de los otros factores de la organización periódicamente, y disminuyó al aumentar el número de átomos, debido al aumento de los protones continuos en el núcleo. El electrón en el extranjero. Los orbitales no cambian el número de electrones, y esta naturaleza ocurre en la serie de los lantánidos (Karal et al., 2021m p.14).

2.2.8.1 Estados de Oxidación

Aunque las familias de los lantánidos contienen una paridad variable, la mayoría de ellas son de trío, con altas propiedades cinéticas, constituyen sencillamente iones en óxidos, ya que estas son moléculas muy extensas, o en la instrucción de ácidos o reglas, tienen un grado muy alto de oxidación. Cuando lo son, interactúa con agua y el aire reorganiza su composición electromagnética. Varios oxidantes tienen un efecto básico en la separación de elementos (Reisdörfer, Bertuol y Tanabe, 2019, p.67).

2.2.8.2 *Propiedades magnéticas*

Por la configuración electrónica, los iones de lantano pertenecen al grupo 4f y por ello, ante factores externos, Está protegido por una capa 5s² 5p⁶, dando lugar a diferentes conformaciones 4fn, y estabilizando la cifra de electrones en el orbital f se obtienen 0 electrones (f⁰), 7 electrones (f⁷) o 14 electrones (f¹⁴) (Kumar Parhi, Kumari Misra y Kumar Jyothi, 2023, p. 1387).

2.2.8.3 *Estado natural y separación*

Los elementos química de la familia de los lantánidos se denominan elementos de tierras raras porque se encuentran en mixturas de óxidos. Su actividad de intercambio iónico está basada principalmente por el radio de iones acuosos intermoleculares, es decir, el lantano estará muy relacionado con el lutecio, por lo que la periodicidad de elución es de lutecio a lantano. Esta reacción se enfatiza con el uso de agentes complejos y pH apropiados: en ese marco, los iones de radio más bajos forman estructuras mucho más rígidas, lo que aumenta la selección de la fase acuosa (Hammache et al., 2020, p.105).

2.2.8.4 *Ligantes de oxígeno*

Entre los lantánidos, la estructura más común y estable es la que contiene el quelato de oxígeno. El uso de aniones e hidroxácidos tipo EDTA, como Tartárico, la formación de complejos de agua soluble es necesaria para separar el intercambio de iones (Makarava et al., 2022, p.110).

2.2.8.5 *Ligantes de nitrógeno*

El tiocianato utilizado en soluciones acuosas parece complejo y el anión nombrado como tiocianato (SCN) puede ser útil como fluente en la escisión por cambio iónico. Por su naturaleza, se clasifica en dos grupos. Las linternas ligeras o de cerio incluyen la serie de europio y las linternas pesadas de itrio, que van desde el gadolinio hasta el lutecio (Du et al., 2022, pp-23-29).

2.2.9 *Aplicación de tierras raras*

Digno a su rareza, los elementos de tierras raras se manifiestan ampliamente distribuidas en toda corteza terrestre, formando depósitos con mínimas concentraciones de minerales extraídos. Por otro lado, minerales como el zinc, el plomo, el cobre e incluso la plata, aunque escasos en la corteza terrestre, forman yacimientos más concentrados. Existen yacimientos que se encuentran dispersos por todo el mundo (Liu et al., 2020, p.69). Prácticamente todos contienen procesos activos

de extracción, separación y purificación de minerales debido a su composición química. Tanto es así que recién en la mitad del siglo XX la manufactura logra separar estos elementos e introducirlos en distintos procesos productivos (Ciro et al., 2019, p.545).

Se están avanzado varios métodos para preparar y separar elementos de los elementos de los lantánidos. Como en ensayos de (Kumar Parhi, Kumari Misra y Kumar Jyothi, 2023, p. 1390) se informa que estos metales interactúan con fluoruro u óxido, manejando calcio o cloruro como agente reductor, cuando se calientan por electrólisis, generalmente linternas térmicas. Se procesa para dividir los hidróxidos, oxalatos o fosfatos insolubles y, luego al final, se purifica mediante intercambio iónico (Van Loy et al., 2020, p.110).

Los lantánidos siguen siendo en gran parte descuidados para aplicaciones industriales. Solo en las últimas décadas los desarrollos científicos han hecho posible encontrar nuevas aplicaciones en las tecnologías modernas. Especialmente en las industrias de electrónica, comunicaciones, esto ha creado una gran calidad estratégica para las minas de tierras raras del planeta. Por el momento, el monopolio minero y de depósitos de China genera preocupación en los países industrializados. China gestiona el 97% de elementos de tierras raras por medio de una política activa de alteración de minas mineras en su territorio, autorizaciones mineras en diferentes países (Sui, Cui y Huang, 2022, pp.98-102).

En la actualidad, los elementos de los lantánidos se presentan en diferentes aparatos domésticos e industriales como: pantallas de televisión, teléfonos móviles, computadoras, luces fluorescentes, automóviles, celdas de combustible, láseres y electrodomésticos, insistentes en enlaces de transferencia de fibra óptica, los imanes, etc (Lie y Liu, 2021, p.67). Es por esto que la extracción de elementos de tierras raras de fuentes sustitutas es esencial, eliminando los costos iniciales de minería y revalorizando los residuos que los contienen (Qiu et al., 2022, p.56).

Según la Sociedad Geológica de Norteamérica, el disprosio, el neodimio, el praseodimio, tienen aplicaciones específicas en teléfonos móviles, tabletas, DHH, así como en la fabricación de energía eólica turbinas y desarrollo de alta energía. Imanes de energía indestructibles utilizados en generadores. Este tipo de imán se utiliza en generadores de alta eficiencia y motores de automóviles híbridos, lo que significa que existe un gran mercado para estos artículos. El itrio y el europio se utilizan en la producción de parabrisas de automóviles, por otra parte, el lantano y el cerio se utilizan en fabricación de baterías que reducen las emisiones contaminantes (Du et al., 2022, p.23).

Existen otras áreas, los lantánidos se utilizan en lámparas de baja potencia (europio y terbio) y relés de fibra óptica (erbio y europio), en medicina para el uso de dispositivos de alto contenido tecnológico, en el tratamiento del cáncer, resonancia magnética (Rivera et al., 2019, p. 171).

Hay que recalcar la importancia militar estratégica de las tierras raras, ya que se utiliza comúnmente en la fabricación de armas, algunos ejemplos de su uso son aleaciones para aviones y armas), bombas invisibles (samario), sonar (terbium), gafas de visión nocturna (lantano), luminiscencia en pantallas, computadora (europio), sistemas de armas (itrio, europio, terbio), ampliación de señales de notificación (neodimio, itrio, lantano, terbio). A nivel militar, también es fundamental destacar el uso de imanes de generación nueva, de los cuales reportan dos: samarios con cobalto por otro lado el neodimio con hierro; Los iniciales se caracterizan por su capacidad de conservar sus propiedades a altas temperaturas, haciéndolos ideales para sistemas de guiado de misiles, bombas inteligentes y aeronaves, mientras que los segundos son, en la actualidad, los más potentes y utilizados para sistemas de armas (Makarava et al., 2022, p.112).

La mitad del consumo total de todos estos elementos se utiliza para producir estas sustancias, siendo la más importante el craqueo de hidrocarburos en los gases de escape de los autos (Omodara et al., 2019, p.122). Por sus propiedades, las tierras raras se exhiben como elementos con un futuro insólito en el desarrollo de nuevos materiales con características físicas y químicas adecuadas para integrar nuevos desarrollos tecnológicos, por sus propiedades biológicas y su comportamiento, con escaso impacto sobre el medio ambiente (Rivera et al., 2019, p.174).

2.2.9.1 Procesos de recuperación de tierras raras

Todos los elementos de los lantánidos conforman fragmento de un grupo de elementos que son dificultosos de dividir por técnicas convencionales debido a que tienen propiedades químicas similares (Reisdörfer, Bertuol y Tanabe, 2020, pp.876-877) para su recuperación. Implicaciones para la metalurgia hidráulica, rama de la minería donde se científicamente interesante. y métodos y procesos económicos para la recuperación de elementos incorporados a materias primas y materiales auxiliares. Estos procesos se aplican en ambientes bajos de agua y temperatura (Karal et al., 2021, p.66).

Digno a la abundancia masiva de REE en el área de la corteza terrestre, los REE se pueden recuperar a partir de compuestos asociados con carbonatos y minerales formadores de fosfato, aunque esto implica costos operativos y las técnicas utilizadas para recuperarlos. Las Tierras raras si bien estudios recientes han demostrado que los minerales arcillosos son una fuente importante de tierras raras, y este estudio tiene como objetivo mejorar el mecanismo de separación de los elementos de tierras raras de los minerales arcillosos (Musariri et al., 2019, pp.98-99).

Todo procedimiento de recuperación constituye de 3 pasos físico-químicos diferentes, el primero es la disolución selectiva que se realiza por filtración; El segundo paso, llamado disolución, permite que las soluciones se concentren y luego se recuperen selectivamente. Para lograr buenas concentraciones se usan diferentes técnicas, las utilizadas son: hidrólisis, extracción por solventes, flotación iónica o cambio iónico y sedimentación, estos métodos se usan dependiendo del tipo de componente a recuperar y la naturaleza del componente con las impurezas a eliminar (Reisdörfer, Bertuol y Tanabe, 2019, p.83).

Rhodia Rares en sus subestructuras de La Rochelle a separado con éxito elementos de tierras raras, logrando una pureza superior al 99,98 %. Esta no es una tarea sencilla, porque tienen puntos de fusión elevados, agentes reductores y también tienen gran actividad en estado fundido, a lo que hay que sumar la alta estabilidad que se obtiene a partir del óxido R_2O_3 , como material de partida (Laatikainen et al., 2021, p.11).

CAPÍTULO III

3. MARCO METODOLÓGICO

3.1 Enfoque de investigación

El método de investigación es cualitativo y cuantitativo., constituyéndose en un trabajo mixto, en el que se va a utilizar la estadística en los análisis de la determinación de las propiedades química, física y mineralógicas. También es cuantitativo por lo que se extraen mediante fuentes bibliográficas los métodos a realizar.

3.2 Nivel de investigación

Dentro de las metas de investigación busca ofrecer aportes para solucionar los problemas de contaminación, en nuestra comunidad, la recuperación y el reciclaje completos de metales son el pre-requisito antes de que se necesiten objetivos medioambientales y de sostenibilidad en la industria metalúrgica. Con nuestro trabajo actual, queremos aplicar, modificar, mejorar y difundir técnicas afines con la transformación mineralógica, física y química de todos los materiales, así como del estudio de sistemas. Sistema a través del balance de materia y energía, en relación con los perfiles de ingeniería de posgrado.

3.3 Diseño de investigación

Para cumplir los objetivos del estudio se basará en un diseño experimental mediante la variación de la variable independiente (en este caso son los magnetos que están presentes en los discos duros) para una recuperación completa de Neodimio usando ácidos orgánicos, inorgánicos y bases y así descubrir un mejor lixivante.

3.3.1 Según la manipulación o no de la variable independiente (no experimental, casi experimental, experimental)

La presente investigación es experimental ya que identifica las propiedades físicas, químicas y mineralógicas y con ello encontrar el mejor lixivante para la recuperación de neodimio para reducir la contaminación ambiental que se presenta en la sociedad, exhibirá beneficios a la comunidad tanto académica como científica y a las grandes o pequeñas empresas que generan contaminación en sus reciclados de metales.

3.4 Tipo de estudio

Para la parte de revisión bibliográfica de los análisis y métodos que se tomarán en cuenta en este estudio se debe aplicar un estudio documental en el que se recopile la información necesaria para la fundamentación teórica del trabajo de investigación.

3.5 Población y planificación, selección y cálculo del tamaño de la muestra

3.5.1 Población y planificación

La población y la planificación de estudio hace referencia a la cantidad de materia prima de discos duros de computadoras post consumo se va emplear en la investigación, esta cantidad corresponde a 2 discos duros donde se consiguió 2 parejas de magnetos de neodimio, donde los discos duros sin vida útil se consiguieron en la ciudad de Esmeraldas, las cuales serán empleadas para una trituration y así llevar las muestras a análisis físicos, químicos y mineralógicos, se tiene como objetivo mejorar e implementar técnicas basadas en la transformación mineralógica, física y química de todos los materiales

3.5.2 Selección de la muestra

Este método que se va a ejecutar dentro del proceso de selección de la materia prima:

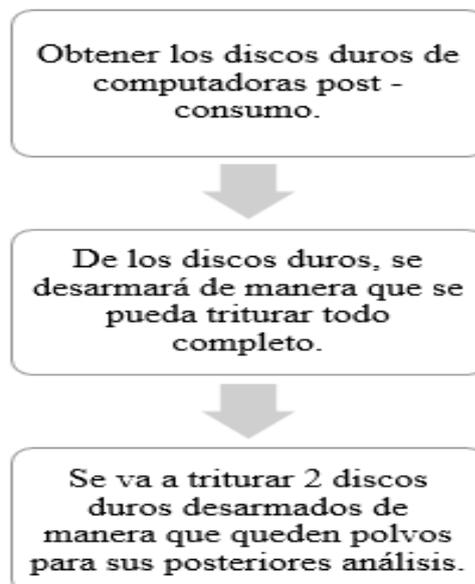


Ilustración 1-3: Selección de la muestra

Realizado por: Onofre, Bryan. 2023

3.6 Métodos, técnicas e instrumentos de investigación

La materia prima precursor que será utilizado para el desarrollo de la presente investigación corresponde a los magnetos de discos duros de computadoras post consumo, y la metodología a seguir es la siguiente:

3.6.1 Caracterización física de los magnetos o imanes de discos duros.

Las propiedades físicas de los magnetos de neodimio se determinarán mediante ensayos de: densidad aparente y real (INEN NTE 0856:2010, 2010).

3.6.1.1 Densidad aparente de los magnetos de discos duros.

Para la determinación de la densidad aparente del magneto en polvo se manipuló una probeta de 10 ml, previamente lavada, se añadió 4 ml de agua destilada en la probeta, posteriormente fue pesada 1 g de muestra con la ayuda de un vidrio reloj en la balanza analítica EXPLORER, para luego colocar la muestra en la probeta, finalmente se registró el volumen obtenido para el cálculo de la densidad aparente.

3.6.1.2 Densidad real de los magnetos de discos duros.

Para la determinación de la densidad real se realizó el ensayo mediante la metodología del picnómetro conforme la Norma INEN NTE 0856:2010, se comenzó por pesar el picnómetro en la balanza analítica EXPLORER registrando el resultado, luego se añadió 0.2g de muestra del magneto en el picnómetro y se pesó, posteriormente se añade agua al picnómetro con la muestra y nuevamente se registra su peso, luego se lavó y secó el picnómetro, finalmente se llenó el picnómetro con agua destilada al desborde y tapándolo de manera que no quede ninguna burbuja de aire, se pesó y registro el dato para el cálculo de la densidad real.

3.6.2 Caracterización química del magneto de discos duros

La cuantificación de la composición química elemental del catalizador agotado de FCC se lo determinó mediante el análisis químico de una muestra de 10g en el equipo S8 TIGER, el espectrómetro secuencial de Fluorescencia de Rayos X (XRF), utilizando el programa Spectra Pluss, donde la muestra fue analizada mediante pastilla prensada por lo cual los resultados obtenidos son semicuantitativos.

3.6.3 *Influencia del agente de lixiviación*

Para estos ensayos en el proceso de recuperación de neodimio se utilizó la metodología de lixiviación ácida según la tesis de anteriores Ingenieros sobre recuperaciones para lo cual se trabajó con los magnetos de los discos duros triturado, en primer lugar se evaluó y determinó la influencia del agente de lixiviación, para ello se prepararon soluciones ácidas estableciendo valores constantes como la concentración que se trabajó a 1M y el volumen de la solución a 100 ml, para lo cual se realizaron los cálculos respectivos con los cuales se determinó a cantidad necesaria para la preparación de las soluciones con los siguientes ácidos inorgánicos (clorhídrico, nítrico y sulfúrico) y ácidos orgánicos (cítrico, y oxálico).

Una vez ya preparadas las soluciones se procedió al proceso de lixiviación, para lo cual se estableció las condiciones de trabajo de los siguientes valores constantes: porcentaje de sólido (0.1%) y tiempo de lixiviación (6h), se trabajó con un matraz erlenmeyer de 250 ml, al cual se añadió la solución de ácido clorhídrico a 1M y al 0.1% de porcentaje de sólidos (0.1 g de catalizador agotado de FCC en 100 ml de solución), enseguida se tapó la boca del matraz con parafina de manera que no exista abertura alguna debido a que en la reacción surgen gases que puede escaparse influyendo en los resultados de la recuperación del metal de interés, posteriormente se procedió a la agitación constante durante 6h en el equipo Orbital Shaker PSU-10i a 350rpm, ya que permite el funcionamiento ininterrumpido prolongado ampliando el rendimiento en el proceso. Repitiendo el proceso con el resto de los ácidos tanto inorgánicos como orgánicos ya establecidos con anterioridad.

Una vez finalizado el tiempo de lixiviación se procedió con la filtración de las soluciones de lixiviación, para ello se ocupó el equipo de filtración al vacío como se puede observar en la siguiente Figura., además se trabajó con el papel filtro EZ PAK 081 de 0,45 μ m de abertura y 47 mm de diámetro, para una mejor filtración y buena lectura para el análisis químico en la determinación de la cantidad de neodimio.

Para la filtración se utilizó la Bomba de vacío BIOBASE VC100 (GM-1 0P) con el sistema de escape de refrigeración automática, utilizando como parámetros de vacío 1000 mbar y una presión de 0,06 MPa, gracias a la utilización de este equipo se deduce el tiempo de filtración consiguiendo un rendimiento con mayor eficacia.

Finalmente, una vez culminada la filtración nos quedó la solución fuerte, y con ello se procedió a aforar con un balón de aforo de 100 ml y agua destilada, para posterior envasar la muestra en un frasco de vidrio ámbar y sellar muy bien con la tapa de este, se repitió el procedimiento con las demás lixivaciones de los ácidos inorgánicos (HNO_3 , H_2SO_4) y orgánicos ($\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7$, $\text{C}_2\text{H}_2\text{O}_4$).

Ya las soluciones fuertes envasadas y apropiadamente etiquetas se envió al laboratorio de la Escuela Superior Politécnica Nacional para el análisis y la determinación de la cantidad de neodimio presentes en dichas soluciones mediante el equipo de Espectrometría de Absorción Atómica marca Perkin Elmer modelo Analyst 300, una vez obtenido los resultados se pudo determinar el agente de lixiviación para la recuperación de neodimio en base a la mayor cantidad de porcentaje en peso de neodimio es decir mayor rendimiento de recuperación.

En la siguientes Tablas se exponen las condiciones de trabajo que se empleó en los ensayos de lixiviación para ácidos orgánicos e inorgánicos.

Tabla 1-3: Condiciones de trabajo para los ácidos inorgánicos

Agente lixivante	Ácido Clorhídrico	Ácido Nítrico	Ácido Sulfúrico
Concentración del Agente de lixiviación (M)	1 M		
Tipo de Muestra	Magneto de disco duro		
Porcentaje de sólidos	0.1%		
Cantidad de muestra	0.1g		
Volumen de la solución	100 ml		
Tiempo de lixiviación	6 h		
Velocidad de agitación	350 rpm		

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

Tabla 2-3: Condiciones de trabajo para los ácidos orgánicos.

Agente lixivante	Ácido Cítrico	Ácido Oxálico
Concentración del Agente de lixiviación (M)	1 M	
Tipo de Muestra	Magneto de disco duro	
Porcentaje de sólidos	0.1%	
Cantidad de muestra	0.1g	
Volumen de la solución	100 ml	
Tiempo de lixiviación	6 h	
Velocidad de agitación	350 rpm	

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

3.6.4 *Proceso de lixiviación ácida en base al agente de lixiviación.*

Para la realización del proceso de lixiviación ácido con el agente de lixiviación determinado se procedió a variar los valores de la concentración, tiempo de lixiviación y porcentaje de sólidos.

3.6.5 *Evaluación de la lixiviación ácida a diferente concentración.*

En la evaluación de la lixiviación ácida a diferentes concentraciones se lo realizó de acuerdo con los resultados obtenidos, en base al mejor agente de lixiviación para la recuperación de neodimio que en este caso es el ácido sulfúrico. Se preparó las soluciones de ácido oxálico con las siguientes concentraciones: 1.0 M, 2.0 M, 3.0 M con 0.1 % de sólidos, para realizar el proceso de lixiviación utilizado previamente descrito en la Sección 3.5.3.

A continuación, se puede observar las condiciones de trabajo con las cuales se realizaron los ensayos.

Tabla 3-1: Condiciones de trabajo con las cuales se realizaron los ensayos

Agente lixivante	Ácido Sulfúrico		
Concentración del Agente de lixiviación (M)	1 M	2 M	3 M
Tipo de Muestra	Magneto de disco duro		
Porcentaje de sólidos	0.1%		
Cantidad de muestra	0.1g		
Volumen de la solución	100 ml		
Tiempo de lixiviación	24 h		
Velocidad de agitación	350 rpm		

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

3.6.6 *Evaluación de la influencia del tiempo de lixiviación.*

En la evaluación de la lixiviación ácida a diferentes concentraciones se lo realizó de acuerdo con los resultados obtenidos, en base a la mejor concentración del agente de lixivante para la recuperación de neodimio que en este caso fue la solución de 3 M de ácido sulfúrico.

Para los siguientes ensayos se emplearon diferentes tiempos de lixiviación, 6 h, 12 h y 24 h, bajo la mejor condición de concentración del ácido tartárico, trabajando con la misma metodología

descrita en la Sección 5.5.3, con el fin de determinar cuál de estos tiempos permitirá la mejor extracción de neodimio y a la vez visualizar la cinética de lixiviación.

Tabla 4-3: Evaluación de la influencia del tiempo de lixiviación

Agente lixivante	Ácido Sulfúrico		
Concentración del Agente de lixiviación (M)	3M		
Tipo de Muestra	Magneto de disco duro		
Porcentaje de sólidos	0.1%		
Cantidad de muestra	0.1g		
Volumen de la solución	100 ml		
Tiempo de lixiviación	6 h	12 h	24 h
Velocidad de agitación	350 rpm		

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

3.6.7 Evaluación de la influencia del porcentaje de sólidos en la lixiviación ácida

En la evaluación de la influencia del tiempo de lixiviación se lo realizó de acuerdo con los resultados obtenidos, en base al mejor tiempo del agente de lixivante para la recuperación de neodimio que es este caso fue de 24h.

Para los ensayos en la influencia del porcentaje de sólidos se realizó utilizando las mejores condiciones de concentración 3 M de la solución de ácido sulfúrico como agente de lixiviación y tiempo de lixiviación (24 h) de acuerdo con los ensayos realizados en la sección 3.5.4.1 y 3.5.4.2 respectivamente. El proceso de lixiviación se realizó con diferentes porcentajes de sólidos: 0.1%, 1% y 2% de acuerdo al procedimiento descrito en la Sección 5.3.3. En la Tabla se muestran las condiciones de operación establecidas para los ensayos.

Tabla 5-3: Influencia del % de sólidos en la lixiviación ácida

Agente lixivante	Ácido Sulfúrico		
Concentración del Agente de lixiviación (M)	3M		
Tipo de Muestra	Magneto de disco duro		
Porcentaje de sólidos	0.1 %	1 %	2 %
Cantidad de muestra	1g		
Volumen de la solución	100 ml		
Tiempo de lixiviación	24 h		
Velocidad de agitación	350 rpm		

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

CAPÍTULO IV

4. MARCO DE ANÁLISIS E INTERPRETACIÓN

En esta parte del trabajo se resaltan los éxitos obtenidos en la parte experimental del trabajo ejecutado en los laboratorios para la recuperación de neodimio de los imanes de discos duros post consumo.

4.1 Deducciones de la caracterización física de la muestra del imán de disco duro.

4.1.1 Resultados de la caracterización física del imán de disco duro

En la Tabla 4-1 se muestran los resultados obtenidos de la densidad aparente y densidad real de las muestras de imanes de disco duro obtenidas según el procedimiento experimental.

Tabla 1-4: Resultados de la densidad real y aparente

PROPIEDAD FÍSICA	VALOR
Densidad aparente	0,99 g/ml
Densidad real	1,03 g/ml

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

4.1.2 Resultado de la densidad aparente del imán de disco duro

Para el cálculo de la densidad aparente se utilizó la siguiente ecuación:

$$\hat{\rho}_{aparente} = \frac{m(g)}{V_f - V_i(ml)}$$

Donde:

$\hat{\rho}_{aparente}$ = densidad aparente en (g/ml) ; m = masa de la muestra en (g)

V_f = Volumen final en (ml) ; V_i = Volumen inicial en (ml)

Datos:

Volumen inicial = 4 ml

Muestra = 1,1891g

Volumen final = 5,20 ml

Reemplazando los datos se obtiene:

$$\rho_{aparente} = \frac{1,1891 (g)}{5,20-4 (ml)}$$

$$\rho_{aparente} = \frac{1,1891 (g)}{1,20 (ml)}$$

$$\rho_{aparente} = 0,99 (ml)$$

4.1.3 Resultado de la densidad real del magneto de disco duro.

Para el cálculo de la densidad real se utilizó la siguiente ecuación:

$$\rho_{real} = \frac{1}{1 + \left(\frac{W_{p+a} - W_{p+m+a}}{W_{p+m} + W_p} \right)} \left[\frac{g}{ml} \right]$$

Donde:

ρ_{real} = densidad real en (g/ml) ; W_p = peso del picnómetro (g)

W_{p+a} = peso del picnómetro + agua (g) ; W_{p+m} = peso del picnómetro + masa de la muestra (g)

W_{p+m+a} = peso del picnómetro + masa de la muestra + agua (g)

Datos:

$$W_p = 13,757g$$

$$W_{p+m} = 13,954g$$

$$W_{p+m+a} = 24,445g$$

$$W_{p+a} = 24,359g$$

Reemplazando los datos se obtiene:

$$\rho_{real} = \frac{1}{1 + \left(\frac{24,359 - 24,445}{13,954 + 13,757} \right)} \left[\frac{g}{ml} \right]$$

$$\rho_{real} = 1,033 \left[\frac{g}{ml} \right]$$

4.2 Resultado de la caracterización química de la muestra del magneto de disco duro

En la tabla 6.2 se presenta la composición química del imán de neodimio en polvo, obteniendo los siguientes resultados.

Tabla 2-4: Resultados análisis químicos del magneto de disco duro

Elemento	Muestra 1
	Contenido (%)
Nd	11,43
Fe	10,28
B	10,03
Al	4,80
Cr	0,93
Mg	0,75
Ni	0,50
P	0,35
K	0,01
Pb	0,01

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

Los porcentajes en peso del neodimio fue el más alto según se muestra en la Tabla 6.2, con 11,43% debido que el imán de neodimio es una aleación por lo que están compuesto con neodimio, hierro y boro, aunque en la tabla podemos observar pequeños porcentajes de aluminio, cromo, magnesio, níquel, fósforo, potasio y plomo, estos dos últimos teniendo un 0.01%, cabe indicar que la muestra fue analizada mediante pastilla prensada, por lo cual los resultados son semi-cuantitativos.

También se puede expresar los resultados obtenidos de la siguiente forma: Nd 11,43 g/kg, Fe 10,28 g/Kg, B 10,03 g/Kg de muestra del magneto, etc., por lo que son valores representativos para la recuperación eficiente del metal de interés.

4.2.1 Análisis de la Espectroscopia Infrarroja (IR) de la muestra del Magneto de Disco Duro

La espectroscopia infrarroja (IR) se basa en el hecho de que la mayoría de las moléculas absorben la luz en la región infrarroja del espectro electromagnético, mide la absorción de radiación infrarroja por parte de una muestra y proporciona información sobre los grupos funcionales presentes.

Tabla 3-4: Espectro infrarrojo de la muestra del

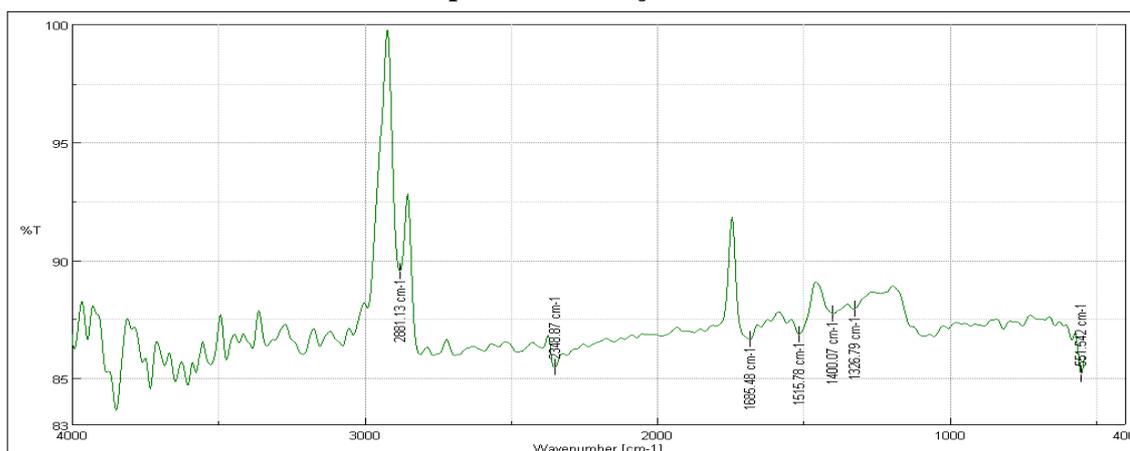


Ilustración 1-4: Espectro infrarrojo de la muestra del magneto de disco duro

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

magneto de disco duro

Número de onda [cm-1]	%T
2881.13	89.5221
2348.87	85.4331
1685.48	86.6244
1515.78	86.8434
1400.07	87.7094
1326.79	87.9292
551.542	85.1222

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

El espectro infrarrojo que se muestra en la Figura 1, nos indica las bandas de absorción de los grupos funcionales que contiene la muestra del magneto de disco duro, el espectro que se observa posee un número de onda en un rango de 530 a 4000 cm^{-1} . La banda de absorción de 2881.13 cm^{-1} es característica del grupo funcional (OH) de alcoholes, es decir que nos indican un estiramiento muy ancho y una intensidad fuerte debido a su enlace (OH). Por otro lado, la banda de absorción de 2348.87 cm^{-1} es característica del grupo funcional de los alquinos, nos indica la presencia de un triple enlace ($\text{C} \equiv \text{N}$), es decir que por su mayor momento dipolar se desplaza a frecuencias más altas y su absorción es también más aguda más notoria. La banda de absorción de 1685.48 cm^{-1} y 1515.78 cm^{-1} , nos indica la presencia de un doble enlace ($\text{C}=\text{N}$, $\text{C}=\text{O}$, $\text{C}=\text{C}$), debido a que presenta una intensidad débil, se puede considerar que pertenece a un grupo de iminas y oximas ($\text{C}=\text{C}$). La banda de absorción de 1400.07 cm^{-1} y 1326.79 cm^{-1} , corresponde a un enlace simple ($\text{C}-\text{N}$, $\text{C}-\text{O}$, $\text{C}-\text{C}$), el cual representa al grupo funcional ($\text{C}-\text{C}$), ya que muestra una intensidad débil. Finalmente, la banda absorción de 551.542 cm^{-1} representan al grupo funcional cloruro ($\text{C}-\text{Cl}$), el cual representa una señal débil.

4.3 Resultado, interpretación y análisis de la influencia del Agente Lixivante

Para este análisis se utilizaron como agentes de lixiviación los ácidos inorgánicos: ácido clorhídrico (HCl), ácido nítrico (HNO₃) y ácido sulfúrico (H₂SO₄), y ácidos orgánicos: ácido cítrico (C₆H₈O₇) y ácido oxálico (C₂H₂O₄), los ensayos de lixiviación se realizaron a concentraciones de 1 M con un tiempo de 6 h, se operó con un porcentaje de sólidos del 0.1 %, donde se evaluó la recuperación de neodimio determinando así que ácido da mejores recuperaciones, para elegir el agente lixivante más efectivo.

En la Tabla 4-4 y 4-5 se muestran los datos con los que se trabajó para la preparación de las soluciones ácidas con un volumen de 100 ml y el porcentaje de sólidos reales utilizados.

Tabla 4-1: Preparación de las soluciones de ácidos inorgánicos con un volumen de 100 ml

Agente de Lixiviación	PM (g/mol)	ρ (g/ml)	Pureza (%)	V (ml)	[M] de la solución en 100 ml	Magneto de disco duro (g)
Ácido Clorhídrico	36.458	1.19	38	16.12	1	0,122
Ácido Nítrico	63.01	1.42	70	12.68	1	0.101
Ácido Sulfúrico	98.079	1.83	98	10.94	1	0.134

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

Tabla 5-4: Preparación de las soluciones ácidos orgánicos con un volumen de 100 ml

Agente de Lixiviación	PM (g/mol)	Pureza (%)	m (g)	[M] de la solución en 100 ml	Catalizador Agotado (g)
Ácido Cítrico	210.14	97	43.3287	1.00	0.131
Ácido Oxálico	126.07	99	25.4687	1.00	0.102

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

Para lo cual también se hizo los cálculos para las soluciones posteriores:

1. **Ácido Clorhídrico:** $V=100\text{ml}=0,1(\text{L})$ $\%P=37$; $\rho= 1,19$ g/ml; $PM= 36,458$ g/mol
 - $[\text{HCl}]= 1$ M

$$\#moles_{HCl} = 1 \left(\frac{mol}{L} \right) * 0,1(L)$$

$$\#moles_{HCl} = 0,1 mol$$

$$m_{HCl} = 0,1 (mol) * 36,458 \left(\frac{g}{mol} \right)$$

$$m_{HCl} = 3,6458 (g) * \frac{100(g)}{37 (g)}$$

$$m_{HCl} = 9,8535 g$$

$$V_{HCl} = \frac{9,8535 (g)}{1,19 (g/ml)}$$

$$V_{HCl} = 8,2803 (ml) \rightarrow V_{HCl} = \mathbf{8,28 (ml)}$$

- **[HCl]= 2 M**

$$\#moles_{HCl} = 2 \left(\frac{mol}{L} \right) * 0,1(L)$$

$$\#moles_{HCl} = 0,2 mol$$

$$m_{HCl} = 0,2 (mol) * 36,458 \left(\frac{g}{mol} \right)$$

$$m_{HCl} = 7,2916 (g) * \frac{100(g)}{37 (g)}$$

$$m_{HCl} = 19,7070 g$$

$$V_{HCl} = \frac{19,7070 (g)}{1,19 (g/ml)}$$

$$V_{HCl} = 16,5605 (ml) \rightarrow V_{HCl} = \mathbf{16,56 (ml)}$$

- **[HCl]= 3 M**

$$\#moles_{HCl} = 3 \left(\frac{mol}{L} \right) * 0,1(L)$$

$$\#moles_{HCl} = 0,3 mol$$

$$m_{HCl} = 0,3 (mol) * 36,458 \left(\frac{g}{mol} \right)$$

$$m_{HCl} = 10,9374 (g) * \frac{100(g)}{37 (g)}$$

$$m_{HCl} = 29,5605 g$$

$$V_{HCl} = \frac{29,5605 (g)}{1,19 (g/ml)}$$

$$V_{HCl} = 24,8408 (ml) \rightarrow V_{HCl} = 24,84 (ml)$$

2. **Ácido Nítrico:** $V=100ml=0,1(L)$ $\%P=70$; $\rho= 1,42 g/ml$; $PM= 63,01g/mol$

• **[HCl]=1 M**

$$\#moles_{HNO_3} = 1 \left(\frac{mol}{L} \right) * 0,1(L)$$

$$\#moles_{HNO_3} = 0,1 mol$$

$$m_{HNO_3} = 0,1 (mol) * 63,01 \left(\frac{g}{mol} \right)$$

$$m_{HNO_3} = 6,301 (g) * \frac{100(g)}{70 (g)}$$

$$m_{HNO_3} = 9,0014 g$$

$$V_{HNO_3} = \frac{9,0014 (g)}{1,42 (g/ml)}$$

$$V_{HNO_3} = 6,3390 (ml) \rightarrow V_{HNO_3} = 6,34 (ml)$$

• **[HCl]=2 M**

$$\#moles_{HNO_3} = 2 \left(\frac{mol}{L} \right) * 0,1(L)$$

$$\#moles_{HNO_3} = 0,2 mol$$

$$m_{HNO_3} = 0,2 (mol) * 63,01 \left(\frac{g}{mol} \right)$$

$$m_{HNO_3} = 12,6020 (g) * \frac{100(g)}{70 (g)}$$

$$m_{HNO_3} = 18,0029 g$$

$$V_{HNO_3} = \frac{18,0029 (g)}{1,42 (g/ml)}$$

$$V_{HNO_3} = 12,6781 (ml) \rightarrow V_{HNO_3} = 12,68 (ml)$$

• **[HCl]=3 M**

$$\#moles_{HNO_3} = 3 \left(\frac{mol}{L} \right) * 0,1(L)$$

$$\#moles_{HNO_3} = 0,3 mol$$

$$m_{HNO_3} = 0,3 \text{ (mol)} * 63,01 \left(\frac{g}{mol} \right)$$

$$m_{HNO_3} = 18,9030 \text{ (g)} * \frac{100(g)}{70 \text{ (g)}}$$

$$m_{HNO_3} = 27,0043 \text{ g}$$

$$V_{HNO_3} = \frac{27,0043(g)}{1,42 \text{ (g/ml)}}$$

$$V_{HNO_3} = 19,0171 \text{ (ml)} \rightarrow V_{HNO_3} = \mathbf{19,02 \text{ (ml)}}$$

3. **Ácido Sulfúrico:** V=100ml=0,1(L) %P=98; ρ= 1,83 g/ml; PM= 98,079 g/mol

- **[H₂SO₄] =1 M**

$$\#moles_{H_2SO_4} = 1 \left(\frac{mol}{L} \right) * 0,1(L)$$

$$\#moles_{H_2SO_4} = 0,1 \text{ mol}$$

$$m_{H_2SO_4} = 0,1 \text{ (mol)} * 98,079 \left(\frac{g}{mol} \right)$$

$$m_{H_2SO_4} = 9,8079 \text{ (g)} * \frac{100(g)}{98 \text{ (g)}}$$

$$m_{H_2SO_4} = 10,0081 \text{ g}$$

$$V_{H_2SO_4} = \frac{10,0081 \text{ (g)}}{1,83 \text{ (g/ml)}}$$

$$V_{H_2SO_4} = 5,4689 \text{ (ml)} \rightarrow V_{H_2SO_4} = \mathbf{5,47 \text{ (ml)}}$$

- **[H₂SO₄] =2 M**

$$\#moles_{H_2SO_4} = 2 \left(\frac{mol}{L} \right) * 0,1(L)$$

$$\#moles_{H_2SO_4} = 0,2 \text{ mol}$$

$$m_{H_2SO_4} = 0,2 \text{ (mol)} * 98,079 \left(\frac{g}{mol} \right)$$

$$m_{H_2SO_4} = 19,6158 \text{ (g)} * \frac{100(g)}{98 \text{ (g)}}$$

$$m_{H_2SO_4} = 19,6158 \text{ g}$$

$$V_{H_2SO_4} = \frac{19,6158 \text{ (g)}}{1,83 \text{ (g/ml)}}$$

$$V_{H_2SO_4} = 10,7190 \text{ (ml)} \rightarrow V_{H_2SO_4} = \mathbf{10,72 \text{ (ml)}}$$

- $[\text{H}_2\text{SO}_4] = 3 \text{ M}$

$$\#moles_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 3 \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) * 0,1(\text{L})$$

$$\#moles_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 0,2 \text{ mol}$$

$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 0,3 (\text{mol}) * 98,079 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)$$

$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 29,4237 (\text{g}) * \frac{100(\text{g})}{98 (\text{g})}$$

$$m_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 30,0242 \text{ g}$$

$$V_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \frac{30,0242 (\text{g})}{1,83 (\text{g/ml})}$$

$$V_{\text{H}_2\text{SO}_4} = 16,4067 (\text{ml}) \rightarrow V_{\text{H}_2\text{SO}_4} = \mathbf{16,41 (\text{ml})}$$

4. **Ácido Cítrico:** $V=100\text{ml}=0,1(\text{L})$ $\%P=97$; $\text{PM}= 210,14 \text{ g/mol}$

- $[\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}] = 1 \text{ M}$

$$\#moles_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}} = 1 \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) * 0,1(\text{L})$$

$$\#moles_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}} = 0,1 \text{ mol}$$

$$m_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}} = 0,1 (\text{mol}) * 210,14 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)$$

$$m_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}} = 21,0140 (\text{g}) * \frac{100(\text{g})}{97 (\text{g})}$$

$$\rightarrow m_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}} = \mathbf{21,6639 \text{ g}}$$

- $[\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}] = 2 \text{ M}$

$$\#moles_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}} = 2 \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) * 0,1(\text{L})$$

$$\#moles_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}} = 0,2 \text{ mol}$$

$$m_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}} = 0,2 (\text{mol}) * 210,14 \left(\frac{\text{g}}{\text{mol}} \right)$$

$$m_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}} = 42,028(\text{g}) * \frac{100(\text{g})}{97 (\text{g})}$$

$$\rightarrow m_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}} = \mathbf{43,3278 \text{ g}}$$

- $[\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}] = 3 \text{ M}$

$$\#moles_{\text{C}_6\text{H}_8\text{O}_7 \cdot \text{H}_2\text{O}} = 3 \left(\frac{\text{mol}}{\text{L}} \right) * 0,1(\text{L})$$

$$\#moles_{C_6H_8O_7 \cdot H_2O} = 0,3 \text{ mol}$$

$$m_{C_6H_8O_7 \cdot H_2O} = 0,3 \text{ (mol)} * 210,14 \left(\frac{g}{mol} \right)$$

$$m_{C_6H_8O_7 \cdot H_2O} = 63,0420 \text{ (g)} * \frac{100(g)}{97(g)}$$

$$\rightarrow m_{C_6H_8O_7 \cdot H_2O} = \mathbf{64,9918 \text{ g}}$$

5. **Ácido Oxálico:** V=100ml= 0,1(L) %P=99; PM= 126,07 g/mol

• **[C₂H₂O₄·2H₂O]=1 M**

$$\#moles_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = 1 \left(\frac{mol}{L} \right) * 0,1(L)$$

$$\#moles_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = 0,1 \text{ mol}$$

$$m_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = 0,1 \text{ (mol)} * 126,07 \left(\frac{g}{mol} \right)$$

$$m_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = 12,6070 \text{ (g)} * \frac{100(g)}{99(g)}$$

$$\rightarrow m_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = \mathbf{12,7343 \text{ g}}$$

→ **[C₂H₂O₄·2H₂O]=2 M**

$$\#moles_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = 2 \left(\frac{mol}{L} \right) * 0,1(L)$$

$$\#moles_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = 0,2 \text{ mol}$$

$$m_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = 0,2 \text{ (mol)} * 126,07 \left(\frac{g}{mol} \right)$$

$$m_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = 25,214 \text{ (g)} * \frac{100(g)}{99(g)}$$

$$\rightarrow m_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = \mathbf{25,4687 \text{ g}}$$

→ **[C₂H₂O₄·2H₂O]=3 M**

$$\#moles_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = 3 \left(\frac{mol}{L} \right) * 0,1(L)$$

$$\#moles_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = 0,3 \text{ mol}$$

$$m_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = 0,3 \text{ (mol)} * 126,07 \left(\frac{g}{mol} \right)$$

$$m_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = 38,1210 \text{ (g)} * \frac{100(g)}{99(g)}$$

$$\rightarrow m_{C_2H_2O_4 \cdot 2H_2O} = \mathbf{38,5061 \text{ g}}$$

A continuación, en la Figura 4 se muestran las recuperaciones de neodimio a los datos y condiciones mencionados y se observa que los valores obtenidos muestran recuperaciones bajas en mg/L de recuperación de neodimio en los 5 casos, alcanzando 3mg/L para HCl, HNO₃ y C₆H₈O₇, un 4 mg/L para H₂SO₄ y un 5 mg/L de C₂H₂O₄ una concentración de 1 M respectivamente.

En la siguiente ilustración 4-2 se presentan el diagrama de la recuperación de neodimio para encontrar el mejor agente lixivante.

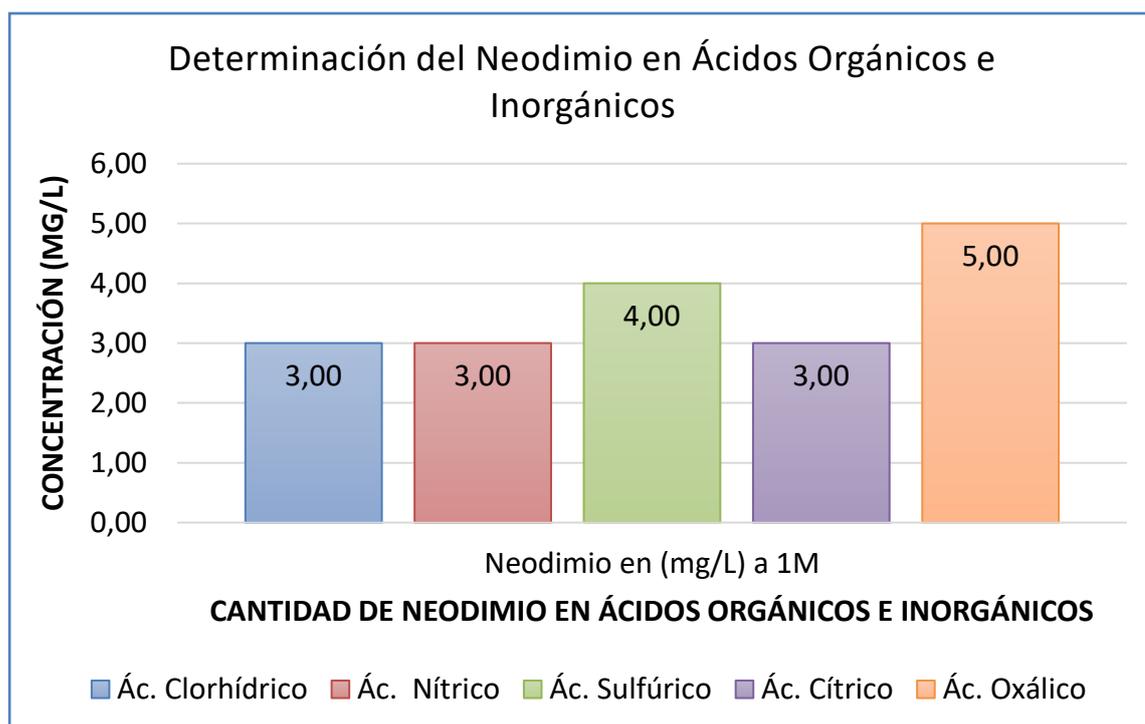


Ilustración 2-4: Evaluación del agente lixivante

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

4.4 Resultados de la evaluación de la lixiviación ácida

4.4.1 Resultado, interpretación y análisis de la evaluación de la lixiviación ácida a diferente concentración

Para los siguientes ensayos se trabajó con el ácido sulfúrico debido a que el oxálico que daba mayor porcentaje de neodimio como agente lixivante no se pudo disolver a una concentración de 3M ya que la solubilidad era muy débil, por lo que se trabajó con H₂SO₄ a 1 M, 2 M y 3 M de concentración, con las siguientes condiciones 0.1% de sólidos y tiempo de lixiviación de 6 horas siguiendo el procedimiento descrito anteriormente dónde los resultados obtenidos se muestran en la ilustración 3-4.

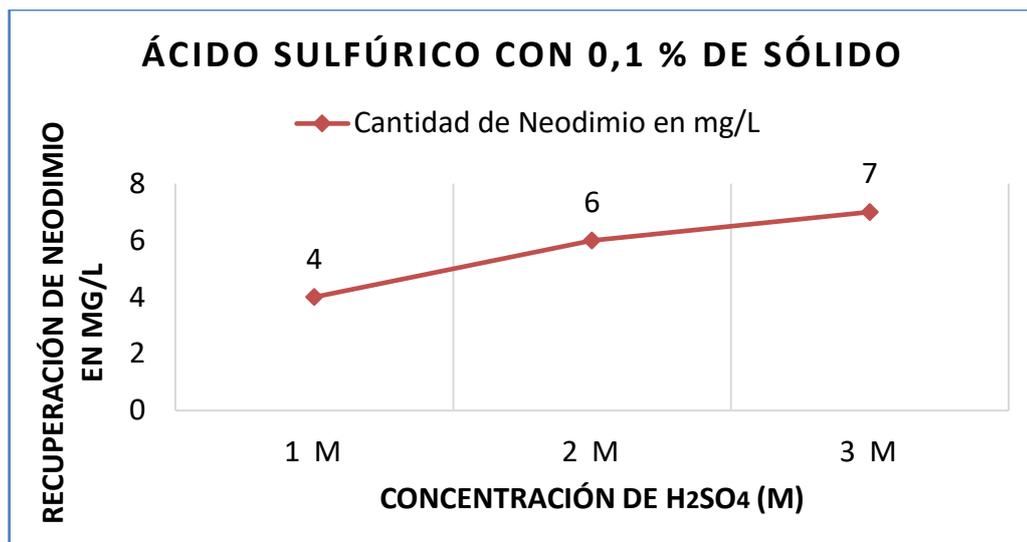


Ilustración 3-4: Evaluación a diferente concentración.

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

De acuerdo con los resultados obtenidos se puede mostrar que a una concentración de 3 M en la solución de ácido sulfúrico llegamos a 7 mg/L de recuperación de neodimio con 0.1% de la muestra del magneto de disco duro, es decir que a mayor concentración mayor es la capacidad de recuperación por parte del agente de lixiviación.

Cabe recalcar la importancia de las propiedades de solubilidad que posee este ácido sulfúrico, a medida que se aumente la concentración a más 3 M, puede ocurrir la tendencia a la sobresaturación de la solución como ocurre con otros ácidos orgánicos como el ácido oxálico, impidiendo la eficiencia del proceso de recuperación.

4.4.2 Resultado, interpretación y análisis de la evaluación de la influencia del tiempo de lixiviación

Para la evaluación del tiempo óptimo de lixiviación se utilizaron como condiciones los resultados ya obtenidos en las secciones anteriores, siendo estos los siguientes: solución de ácido sulfúrico a 3M en 100 ml con 0.1% de sólidos y variando el tiempo de lixiviación, de 6, 12, y 24 horas como se observa en la Figura 4-4 y de acuerdo con el procedimiento descrito en la sección 3.5.3.

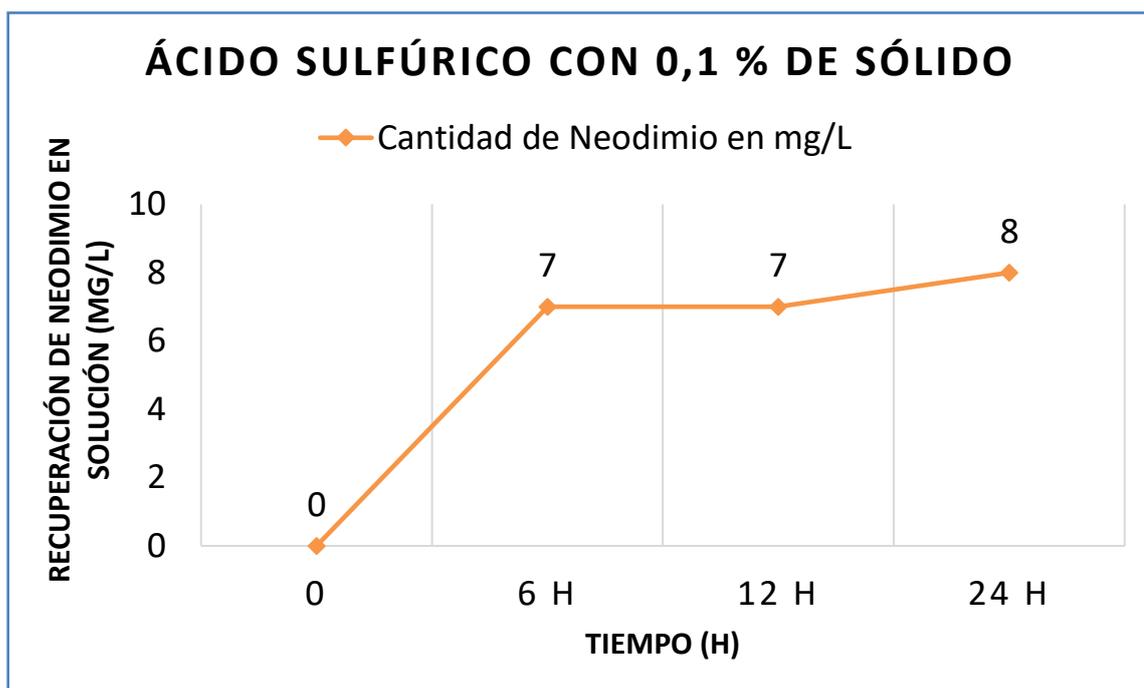


Ilustración 4-1: Evaluación de la influencia del tiempo de lixiviación.

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

Independientemente del metal de interés para su recuperación a la hora de condicionar el tiempo de lixiviado, encontramos que a partir de las 6 horas mantiene un promedio constante de recuperación, resultados obtenidos trabajando con el ácido sulfúrico a 0,1% para la recuperación de neodimio, con las óptimas condiciones obtenidas de sus resultados de investigación.

En este caso para la recuperación de neodimio con ácido sulfúrico a 3M nos ocurre algo similar ya que a partir de las 6 h comenzamos a tener resultados similares, pero ya en las 24 h vemos la recuperación más alta con 8mg/L, por lo que el tiempo óptimo a 3M es de 24 h.

4.4.3 Resultado, interpretación y análisis de la evaluación de la influencia del porcentaje de sólidos en la lixiviación ácida

Una vez obtenido las mejores condiciones de trabajo en las secciones anteriores para la evaluación del porcentaje de sólidos como se muestra en la Figura 4-4, trabajamos con el ácido sulfúrico a una concentración de 3 M, con un tiempo de 24 horas, variando la cantidad de la muestra del magneto trabajando con el 0.1%, 1% y el 2%, de acuerdo con la metodología descrita en la sección 3.5.3, dando como resultado lo siguiente.

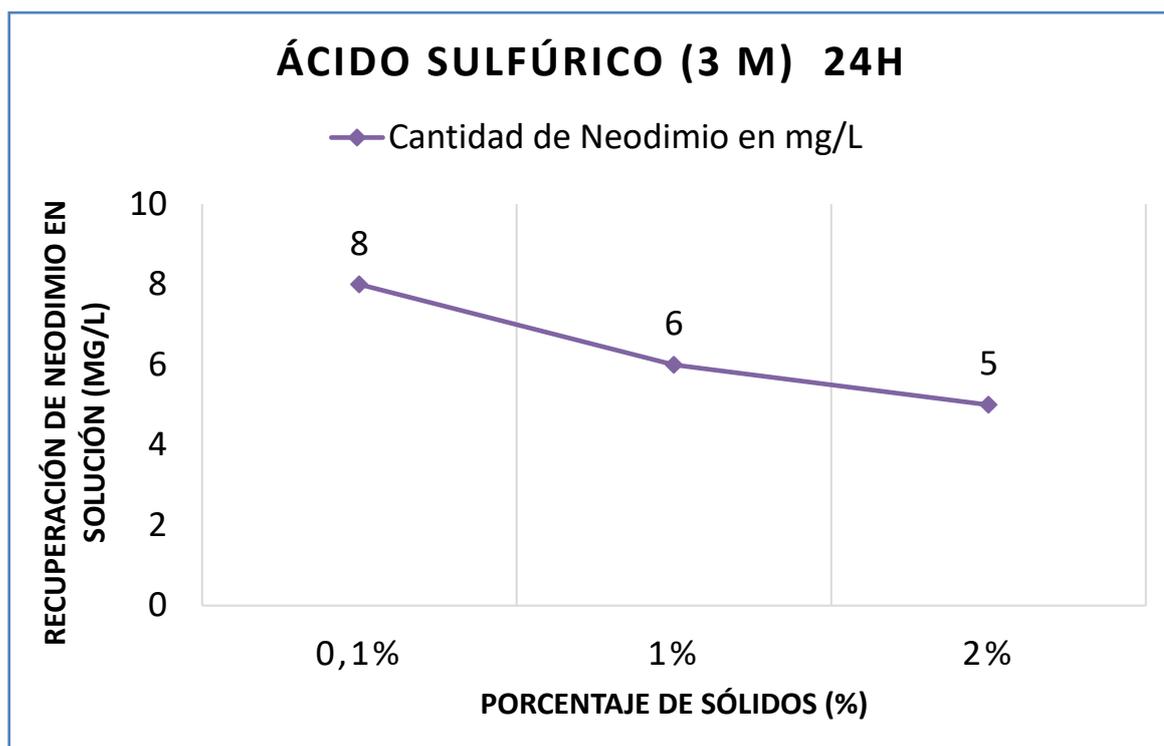


Ilustración 5-4: Evaluación de la influencia del porcentaje de sólidos.

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

Como se observa en la ilustración 5-4 a medida que aumenta la cantidad de porcentaje de sólidos disminuye la cantidad de neodimio presente en la recuperación posterior al proceso de lixiviación ácida, esto se debe a que la solución pulpa se encuentra con mayor concentrado de muestra del magneto por lo que no existe suficiente cantidad de agente de lixiviación para que estas reaccionen entre sí, por lo que se elige mejor porcentaje de sólido el 0,1%.

4.5 Discusión de Resultados

En la investigación de (Reisdörfer, Bertuol y Tanabe, 2019, p.42) se concluye que para una recuperación eficiente de neodimio se debe trabajar con ácidos orgánicos (cítrico y málico) ya que se obtiene una recuperación del 72,8 % de Nd con una concentración de 1 M, sin embargo mediante este estudio se demuestra que a mayor concentración de ácidos orgánicos disminuye la capacidad de disolución este es el caso del ácido oxálico que no se pudo lixiviar a 3 M debido a su baja solubilidad disminuyendo su eficiencia en comparativa de los ácidos inorgánicos como es el caso del ácido sulfúrico, clorhídrico y nítrico que a mayor concentración se obtiene porcentaje de recuperación que al trabajar con los ácidos orgánicos (cítrico y oxálico).

En la investigación actual se recuperó más con el ácido sulfúrico dándonos un porcentaje alto del 72,72% a 3M, se recupera más con el ácido sulfúrico que con el ácido clorhídrico debido a que el ácido sulfúrico en su estructura de Lewis tiene un radical sulfato con quien puede reaccionar con

el Nd más rápido formando iones complejos hasta un pH de 8 en cambio el ácido clorhídrico en su estructura de Lewis se forman iones complejos hasta un pH de 7.

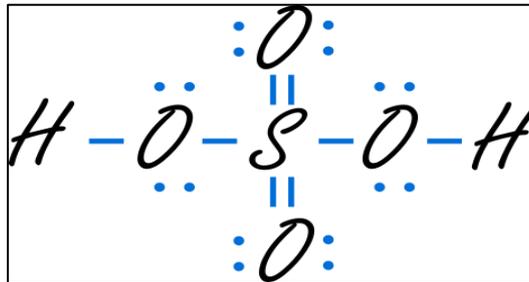
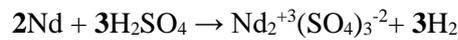


Ilustración 6-4: Ácido Sulfúrico

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

Reacción Química del Ácido Sulfúrico con el Neodimio



Diagramas de Pourbaix para la interacción del Nd con HCl y H₂SO₄

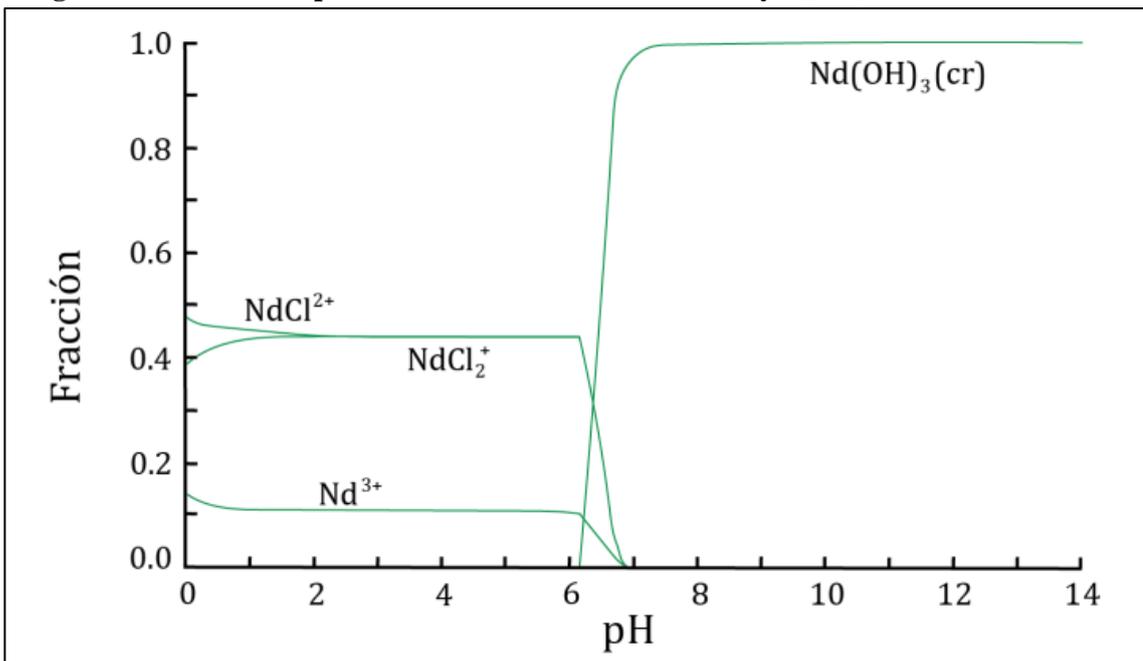


Ilustración 7-4: Diagrama de distribución de especies para Nd³⁺ en función del pH en el sistema Cl a 25°C (2,0 M Cl⁻ y 0,008 M Nd³⁺)

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

En la ilustración 4-7 se puede observar que el neodimio exhibe una fuerte tendencia a formar iones NdCl²⁺, Nd³⁺ y especies como NdCl₂⁺ hasta pH 7.

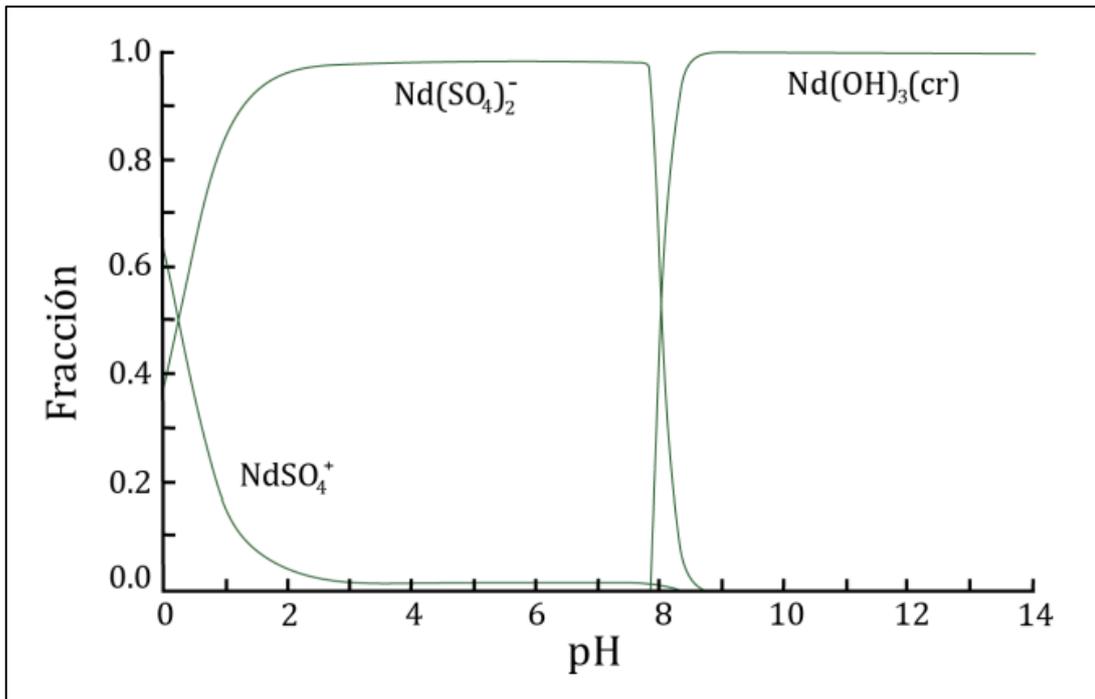


Ilustración 8-4: Diagrama de distribución de especies para Nd^{3+} en función del pH en el sistema SO_4^{2-} a 25°C ($2,0 \text{ M SO}_4^{2-}$ y $0,008 \text{ M Nd}^{3+}$)

Realizado por: Onofre, Bryan, 2023.

En la figura 8-4 se puede observar que el neodimio exhibe una fuerte tendencia a formar iones complejos NdSO_4^+ y $\text{Nd(SO}_4)_2^-$ hasta pH 8.

CAPÍTULO V

5. MARCO PROPOSITIVO

5.1 Objetivos

5.1.1 *Objetivo General*

- Analizar los resultados obtenidos de la recuperación de neodimio a partir de los imanes de discos duros de computadoras post consumo utilizando ácidos orgánicos, inorgánicos y bases.

5.1.2 *Objetivos Específicos*

- Potenciar el mecanismo para una excelente caracterización física y química de los imanes de discos duros de computadoras post consumo.
- Valorar en base a las variables el proceso de lixiviación mediante ácidos inorgánicos (clorhídrico, nítrico y sulfúrico).
- Comparar los resultados obtenidos con artículos científicos sobre la recuperación de tierras raras.

5.2 Justificación

El neodimio en su forma de aleación se utiliza en la fabricación de la mayoría de los imanes permanentes de alta energía con aplicaciones en diversas industrias, como la electrónica. Se utiliza en la fabricación de electrodomésticos como televisores en color, lámparas fluorescentes y cristalería. También se utiliza para eliminar el color azul causado por los contaminantes de hierro (Sui, Cui y Huang, 2022, p.22). El precio del neodimio se duplicó en el tercer trimestre de 2017 a 76 dólares el kilo en comparación con el comienzo del año. Por lo tanto, el neodimio registró el mayor aumento de precio entre los 15 metales de tierras raras más importantes en el último año. El precio ha subido a poco menos de 100 euros el kilo (Hammache et al., 2020, p.105). Las tierras raras se han convertido en un pilar de la manufactura de la tecnología, no solo por sus excelentes características eléctricas, magnéticas y ópticas, sino también porque representan un paso adelante en el cambio hacia una economía verde y ecológica y sus usos. Estimular la demanda y disparar los precios de los elementos de tierras raras (Lie y Liu, 2021, p.34). En la actualidad existen dos métodos principales en la recuperación de metales que son: hidrometalúrgico y pirometalúrgico.

5.3 Propuesta

El propósito de realizar los análisis químicos, físicos y mineralógicos del polvo de los magnetos de discos duros es principalmente reducir la contaminación ambiental ya que estos elementos de tierras raras en este caso el neodimio necesita ser tratado ya que forman residuos químicos tóxicos que tienen que ser analizados para efectuar con el buen manejo ambiental, por ende, es necesario hacer varios estudios para una recuperación óptima y segura para la humanidad.

CONCLUSIONES

- La disolución de neodimio en el proceso de lixiviación al tratar con ácido oxálico como agente lixivante en concentración a 3 M no permite una buena recuperación ya que su solubilidad es muy baja. Por otra parte, al realizar el proceso con ácido sulfúrico se alcanzó valores de recuperación aceptables que superan el 70 %, debido a las condiciones Eh/pH, a la estabilidad y solubilidad para la formación del sulfato de neodimio.
- La composición química elemental del polvo del magneto de disco duro es: neodimio 11,43 %. El neodimio es el que hace posible que se active el polvo del magneto, el valor de neodimio presente en el magneto es representativo y resulta interesante para su recuperación.
- La lixiviación de neodimio en el proceso es limitada por la relación que existe entre el porcentaje de sólidos y la concentración del agente lixivador, cuando se incrementa el porcentaje de sólidos, la recuperación de neodimio se disminuye, debido a que se tiene una mínima cantidad de ácido sulfúrico disponible para lixiviar una mayor cantidad de magneto de disco duro.
- La disolución de neodimio en el proceso es afectada notablemente por el tiempo de lixiviación. Las recuperaciones de neodimio alcanzan un valor de 72,72 % en los ensayos de lixiviación llevados a cabo a un tiempo de 24 horas.
- El mayor valor de recuperación de neodimio fue de 72,72 %. Este resultado se alcanzó al efectuar el proceso de lixiviación con ácido sulfúrico, a una concentración de 3 M, 0.1% de sólidos y un tiempo de 24 horas.
- Se diseñó un equipo de lixiviación en este caso un tanque de lixiviación donde se obtuvo resultados como V_t de 1,025 m³, D_i 0,93 m, h 1,39 m, el espesor del tanque de 5 mm con un sistema de agitación de turbina rushton y una potencia de agitación de 1,54 kW.

RECOMENDACIONES

Cambiar el rango de temperaturas de todos los agentes en los ensayos para acrecentar la extracción de neodimio.

Evaluar el aumento en la cantidad de agente oxidante o reductor durante el período de lavado para determinar la tasa de disolución y la eficiencia de la recuperación de neodimio.

Tener conocimientos básicos sobre los metales de tierras raras, además de tener una correcta y adecuada manipulación de los distintos instrumentos de laboratorio para evitar problemas en la obtención de datos.

Realizar pruebas o ensayos pilotos para el procedimiento de recuperación de neodimio a partir de los imanes de discos duros post consumo.

BIBLIOGRAFÍAS

BEHERA, Saroj; PANDA, Subhendu; MANDAL, Deendayal. & PARHI, P.k. “Ultrasound and Microwave assisted leaching of neodymium from waste magnet using organic solvent”. *Hydrometallurgy* [En línea], 2019, volumen (185), pp. 61-70. [Consulta: 10 de noviembre del 2022]. ISSN 0304-386X. Disponible en: <https://www.sciencedirect.com/science/article/abs/pii/S0304386X18305152?via%3Dihub>.

DE VARGAS BRIÃO, Giani; CARLOS DA SILVA, Meuris Gurgel & ADEODATO VIEIRA, Melissa Gurgel. “Reusable and efficient clay material for the fixed-bed neodymium recovery”. *Sustainable Chemistry and Pharmacy*, [En línea], 2022, volumen (25), p. 105. [Consulta: 12 de noviembre del 2022]. ISSN 2352-5541. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.scp.2022.100623>

CIRO, Erwin., ALZATE, Andrea., LÓPEZ, Esperanza., SERNA, Claudia. y GONZALEZ, Oberlando. “Neodymium recovery from scrap magnet using ammonium persulfate”. *Hydrometallurgy*, [En línea], 2019, volumen (186), pp. 226-234. [consulta: 01 de octubre del 2023]. ISSN 0304-386X. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2019.04.016>

DU, Haojie., WANG, Dong., ZHANG, Liping., LI, Whentao., WANG, Zhi., XIAO, Wanhai. y YE, Chunlin. “Extraction of rare earth and cobalt from leach residue of Nd-Fe-B waste by reductive leaching with iron powder”. *Hydrometallurgy*, [En línea], 2022, volumen (213), pp. 105-112. [Consulta: 10 de octubre del 2023]. ISSN 0304-386X. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.hydromet.2022.105942>

HAMMACHE, Zineelabidine., BERBAR, Yassine., BENSAADI, Sofiane., TRARI, M. y AMARA, Mourad. “Recovery of light rare earth elements by leaching and extraction from phosphate mining waste (Fluorapatite and Carbonate-Fluorapatite)”. *Journal of African Earth Sciences*, [En línea], 2020, volumen (171), pp. 103-105. [Consulta: 10 de octubre del 2023]. ISSN 1464-343X. Disponible en: <https://doi.org/10.1016/j.jafrearsci.2020.103937>.

JEON, Jong; YOON, Ho-Sung; KIM, Chul-Joo., CHUNG, Keyong & JYOTHI, Rajesh. “Environmentally sound technology development for processing of rare earth elements from waste permanent magnets synthetic leach solutions: recovery and separation perspectives”. *Separation and Purification Technology*, [En línea], 2021, volumen (275), pp. 120. [Consulta: 21 marzo 2023]. ISSN 1383-5866. Disponible en: DOI 10.1016/J.SEPPUR.2021.119225.

KARAL, E., KUCUKER, M.A., DEMIREL, B., COPTY, N.K. y KUCHTA, K. “Hydrometallurgical recovery of neodymium from spent hard disk magnets: A life cycle perspective”. *Journal of Cleaner Production*, [En línea], 2021, volumen (288), p. 125. [Consulta: 11 enero 2023]. ISSN 0959-6526. Disponible en: DOI 10.1016/J.JCLEPRO.2020.125087.

KUMAR PARHI, P., KUMARI MISRA, P. y KUMAR JYOTHI, R. “Integrated hydrometallurgical investigation for extraction and recovery of neodymium (Nd) from waste permanent Nd-Fe-B magnet”. *Inorganic Chemistry Communications*, [En línea], 2023, volumen (148), p. 112. [Consulta: 21 febrero 2023]. ISSN 1387-1390. Disponible en: DOI 10.1016/J.INOCHE.2022.110251.

KUMARI, A. y KUMAR SAHU, S. “A comprehensive review on recycling of critical raw materials from spent neodymium iron boron (NdFeB) magnet”. *Separation and Purification Technology* [en línea], 2023, volumen (1), pp. 123-127. [Consulta: 21 marzo 2023]. ISSN 1383-5866. Disponible en: <https://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S1383586623004355>.

LAATIKAINEN, M., MAKAROVA, I., SAINIO, T. & REPO, E. “Selective acid leaching of rare earth elements from roasted NdFeB magnets”. *Separation and Purification Technology*, [En línea], 2021, volumen (278), pp. 119-120. [Consulta: 21 enero 2023]. ISSN 1383-5866. Disponible en: DOI 10.1016/J.SEPPUR.2021.119571.

LIE, J. & LIU, J.C. “Selective recovery of rare earth elements (REEs) from spent NiMH batteries by two-stage acid leaching”. *Journal of Environmental Chemical Engineering*, [En línea], 2021, volumen (9), pp. 106-109. [Consulta: 01 enero 2023]. ISSN 2213-3437. Disponible en: DOI 10.1016/J.JECE.2021.106084.

LIU, Z., WU, J., LIU, X., WANG, W., LI, Z., XU, R., DING, Y. & WANG, J. “Recovery of neodymium, dysprosium, and cobalt from NdFeB magnet leachate using an unsymmetrical dialkylphosphinic acid extractant, INET-3”. *Journal of Rare Earths*, [En línea], 2020, volumen (38), p. 1114. [Consulta: 21 septiembre 2022]. ISSN 1002-0721. Disponible en: DOI 10.1016/J.JRE.2020.01.018.

MAKARAVA, I., KASACH, A., KHARYTONAU, D., KURILO, I., LAATIKAINEN, M. & REPO, E. “Enhanced acid leaching of rare earths from NdCeFeB magnets”. *Minerals Engineering*, [En línea], 2022, volumen (179), [Consulta: 13 de noviembre 2022]. p. 107-112. ISSN 0892-6875. Disponible en: DOI 10.1016/J.MINENG.2022.107446.

MAKAROVA, I., RYL, J., SUN, Z., KURILO, I., GÓRNICKA, K., LAATIKAINEN, M. & REPO, E. 2020. “One-step recovery of REE oxalates in electro-leaching of spent NdFeB magnets”. *Separation and Purification Technology*, [En línea], 2020, volumen (251), p. 136. [Consulta: 20 de septiembre 2022]. ISSN 1383. Disponible en: DOI 10.1016/J.SEPPUR.2020.117362.

MUSARIRI, B., AKDOGAN, G., DORFLING, C. & BRADSHAW, S. “Evaluating organic acids as alternative leaching reagents for metal recovery from lithium ion batteries”. *Minerals Engineering*, [En línea], 2019, volumen (137), pp. 108-117. [Consulta: 01 octubre del 2023]. ISSN 0892-6875. Disponible en: DOI 10.1016/J.MINENG.2019.03.027.

NI'AM, A.C., WANG, Y.F., CHEN, S.W. y YOU, S.J. “Recovery of rare earth elements from waste permanent magnet (WPMs) via selective leaching using the Taguchi method”. *Journal of the Taiwan Institute of Chemical Engineers*, [En línea], 2019, volumen (97), p. 145. [Consulta: 12 enero 2023]. ISSN 1876-1070. Disponible en: DOI 10.1016/J.JTICE.2019.01.006.

NISKANEN, J., LAHTINEN, M. y PERÄMÄKI, S. “Acetic acid leaching of neodymium magnets and iron separation by simple oxidative precipitation”. *Cleaner Engineering and Technology*, [En línea], 2022, volumen (10), pp. 100-103. [Consulta: 03 enero 2023]. ISSN 2666-7908. Disponible en: DOI 10.1016/J.CLET.2022.100544.

OMODARA, L., PITKÄÄHO, S., TURPEINEN, E.M., SAAVALAINEN, P., ORAVISJÄRVI, K. & KEISKI, R.L. “Recycling and substitution of light rare earth elements, cerium, lanthanum, neodymium, and praseodymium from end-of-life applications - A review”. *Journal of Cleaner Production*, [En línea], 2019, volumen (236), pp. 119-122. [Consulta: 13 de diciembre del 2023] ISSN 0959-6526. Disponible en: DOI 10.1016/J.JCLEPRO.2019.07.048.

PITCHER, M.L., HUNTINGTON, B., DOMINICK, J. & SHEIKHI, A. “Highly functional bio-based micro- and nano-structured materials for neodymium recovery”. *Chemical Engineering Journal*, [En línea], 2022, volumen (447), p. 137. [Consulta: 23 de noviembre de 2023]. ISSN 1385-8947. Disponible en: DOI 10.1016/J.CEJ.2022.137418.

QIU, T., WU, H., LIANG, Y. y YAN, H. “Rare earth recovery from fluoride molten-salt electrolytic slag by sodium carbonate roasting-hydrochloric acid leaching”. *Journal of Rare Earths*, [En línea], 2022, volumen (51), pp. 475-482. [Consulta: 21 octubre del 2023]. ISSN 1002-0721. Disponible en: DOI 10.1016/J.JRE.2022.07.001.

QUARTAROLLI, L.F., BRANDÃO, B.B.N.S., SILVEIRA-JÚNIOR, A.T., NAKAMURA, M. & TOMA, H.E. “Improving the lithium recovery using leached beta-spodumene residues processed by magnetic nanohydrometallurgy”. *Minerals Engineering*, [En línea], 2022, volumen (186), p. 108. [Consulta: 21 enero 2023]. ISSN 0892-6875. DOI 10.1016/J.MINENG.2022.107747.

REISDÖRFER, G., BERTUOL, D. y TANABE, E.H. “Recovery of neodymium from the magnets of hard disk drives using organic acids”. *Minerals Engineering*, [En línea], 2019, volumen (143), p. 105. [Consulta: 20 de enero del 2023]. ISSN 0892-6875. Disponible en: DOI 10.1016/J.MINENG.2019.105938.

REISDÖRFER, G., BERTUOL, D.A. y TANABE, E.H., Extraction of neodymium from hard disk drives using supercritical CO₂ with organic acids solutions acting as cosolvents”. *Journal of CO₂ Utilization*, [En línea], 2020, volumen (35), pp. 277-287. [Consulta: 23 enero 2023]. ISSN 2212-9820. Disponible en: DOI 10.1016/J.JCOU.2019.10.008.

RHO, B.J., SUN, P.P. y CHO, S.Y. “Recovery of neodymium and praseodymium from nitrate-based leachate of permanent magnet by solvent extraction with trioctylphosphine oxide”. *Separation and Purification Technology*, [En línea], 2020, volumen (238), pp. 116-119. [Consulta: 19 de octubre del 2022]. ISSN 1383-5866. Disponible en: DOI 10.1016/J.SEPPUR.2019.116429.

RIVERA, R.M., XAKALASHE, B., OUNOUGHENE, G., BINNEMANS, K., FRIEDRICH, B. y VAN GERVEN, T. “Selective rare earth element extraction using high-pressure acid leaching of slags arising from the smelting of bauxite residue”. *Hydrometallurgy*, [En línea], 2019, volumen (184), pp. 162-174. [Consulta: 05 de noviembre del 2023]. ISSN 0304-386X. Disponible en: DOI 10.1016/J.HYDROMET.2019.01.005.

SHAHBAZ, A. “A systematic review on leaching of rare earth metals from primary and secondary sources”. *Minerals Engineering*, [En línea], 2022, volumen (184), p. 111. [Consulta: 19 de octubre del 2022]. ISSN 0892-6875. Disponible en: DOI 10.1016/J.MINENG.2022.107632.

SUI, N., CUI, K. y HUANG, K. “A new strategy of thin oil film extraction for enhanced recovery and separation of praseodymium and neodymium”. *Journal of Environmental Chemical*

Engineering, [En línea], 2022, volumen (10), p. 109. [Consulta: 21 diciembre del 2022]. ISSN 2213-3437. Disponible en: DOI 10.1016/J.JECE.2022.107692.

SUN, P.P., SEO, H. y CHO, S.Y. “Recovery of neodymium, dysprosium, and iron from spent mobile phone camera module magnets through a hydrometallurgical method”. *Minerals Engineering*, [En línea], 2021, volumen (163), pp. 110. [Consulta: 21 noviembre del 2022]. ISSN 0892-6875. Disponible en: DOI 10.1016/J.MINENG.2021.106772.

VAN LOY, S., ÖNAL, M.A.R., BINNEMANS, K. y VAN GERVEN, T. “Recovery of valuable metals from NdFeB magnets by mechanochemically assisted ferric sulfate leaching”. *Hydrometallurgy*, [En línea], 2020, volumen (191), pp. 105-110. [Consulta: 02 de diciembre del 2022]. ISSN 0304-386X. Disponible en: DOI 10.1016/J.HYDROMET.2019.105154.

WAMEA, P., PITCHER, M.L., MUTHAMI, J. y SHEIKHI, A., “Nanoengineering cellulose for the selective removal of neodymium: Towards sustainable rare earth element recovery”. *Chemical Engineering Journal*, [En línea], 2022, volumen (428), p. 131. [Consulta: 21 diciembre del 2022]. ISSN 1385-8947. Disponible en: DOI 10.1016/J.CEJ.2021.131086.

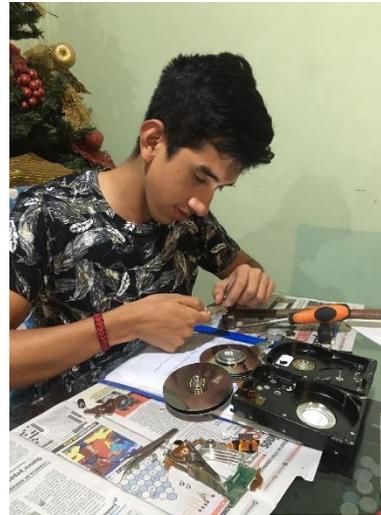
ANEXOS

ANEXO A: EXTRACCIÓN DE LOS CD DE LOS DISPOSITIVOS

a)



b)



c)



NOTAS:

- a) Recepción Discos Duros
- b) Desmembrado de los DD
- c) Discos duros e imanes separados

CATEGORIA DEL DIAGRAMA:

- Aprobado
- Preliminar
- Certificado
- Por aprobar
- Información
- Por calificar

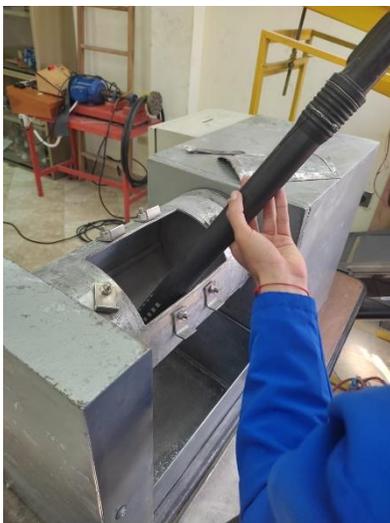
ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DE
CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERIA
QUIMICA
ELABORADO POR: Bryan Onofre

Recuperación de Neodimio

LÁMINA	ESCALA	FECHA
1	1:1	16/08/2022

ANEXO B: PROCEDIMIENTO DE MOLIENDA DE LOS CDS

b)



b)



c)



NOTAS:

- a) Limpieza del molino de bolas
- b) Trituración de los DD
- c) DD en polvo

CATEGORIA DEL DIAGRAMA:

- Aprobado
- Preliminar
- Certificado
- Por aprobar
- Información
- Por calificar

**ESCUELA SUPERIOR
POLITECNICA DE
CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
ESCUELA DE INGENIERIA
QUIMICA**
ELABORADO POR: Bryan Onofre

Recuperación de Neodimio

LÁMINA	ESCALA	FECHA
1	1:1	16/08/2022

ANEXO C: FICHAS TÉCNICAS DE LOS ENSAYOS DE LIXIVIACIÓN

Ficha Técnica N° 01

Ensayo: 01
Muestra: Magneto de disco duro
Objetivo: Determinar la influencia del agente lixivante.

Lixiviación

Agente lixivante: Ácido Clorhídrico
Cantidad de muestra (g): 0,1
Tiempo de lixiviación (h): 6
Agitación (RPM): 350
Temperatura (°C): Ambiente (18 °C)
Sólidos (%): 0,1
Concentración: 1 M

Tabla IV.1. Balance metalúrgico de lixiviación química de la muestra de los magnetos usando ácido clorhídrico 1 M y 0,1 % sólidos.

		Neodimio			
Muestra	Volumen (mL)	Concentración	Peso (mg)	g Nd / g Magneto	Recuperación
Solución Fuerte	100	3	0,3	0,0003g/0,1g 0,003g	27,27%

Recuperación de Nd en solución (%): 27,27%

Cálculo para encontrar el peso (mg) y la recuperación de Neodimio:

Peso:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa}_{\text{soluta}}(\text{g})}{\text{volumen}_{\text{solución}}(\text{L})}$$

$$\text{masa}_{\text{soluta}} = \text{concentración} * \text{volumen} (\text{L})$$

$$m_{\text{soluta}} = 3 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,1 \text{ L}$$

$$m_{\text{soluta}} = \mathbf{0,3 \text{ mg}}$$

Recuperación:

Para esta parte comencé con mi porcentaje inicial de neodimio obtenido en los análisis químicos en este caso fue de 11,43% que fue analizado por Fluorescencia de Rayos X en 10g de muestra.

$$11,43\% \longrightarrow 10\text{g}$$

$$10\text{g} \text{ ——— } 100\%$$

$$\mathbf{x} \text{ ——— } 11,43\%$$

$$x = \frac{11,43\% * 10\text{g}}{100\%}$$

$$x = \mathbf{1,14\text{g}}$$

Luego de saber que en un 11,43% existe 1,14g de Neodimio, pero esto en 10g que fue analizado por lo que ahora necesitamos saber esa cantidad en gramos, pero ahora en cantidad de la muestra que utilicé con los ácidos en este caso 0,1g.

$$1,14\text{g} \text{ ——— } 10\text{g}$$

$$\mathbf{x} \text{ ——— } 0,1\text{g}$$

$$x = \frac{0,1\text{g} * 1,14\text{g}}{10\text{g}}$$

$$x = \mathbf{0,011\text{g}}$$

Una vez obtenido el resultado de la masa (g) para la cantidad de muestra utilizada para cada solución, obtenemos el porcentaje de recuperación utilizando la relación **g Nd / g Magneto** que en la ficha N° 1 fue de 0,003g partiendo de los 0,011g recientemente calculado.

$$0,011\text{g} \text{ ——— } 100\%$$

$$0,003\text{g} \text{ ——— } \mathbf{x}$$

$$x = \frac{0,003\text{g} * 100\%}{0,011\text{g}}$$

$$\text{Recuperación} = \mathbf{27,27\%}$$

Ficha Técnica N° 02

Ensayo: 02
Muestra: Magneto de disco duro
Objetivo: Determinar la influencia del agente lixivante.

Lixiviación

Agente lixivante: Ácido Sulfúrico
Cantidad de muestra (g): 0,1
Tiempo de lixiviación (h): 6
Agitación (RPM): 350
Temperatura (°C): Ambiente (18 °C)
Sólidos (%): 0,1
Concentración: 1 M

Tabla IV.1. Balance metalúrgico de lixiviación química de la muestra de los magnetos usando ácido sulfúrico 1 M y 0,1 % sólidos.

		Neodimio			
Muestra	Volumen (mL)	Concentración	Peso (mg)	g Nd / g Magneto	Recuperación
Solución Fuerte	100	4	0,4	0,0003g/0,1g 0,004g	36,36%

Recuperación de Nd en solución (%): 36,36%

Cálculo para encontrar el peso (mg) y la recuperación de Neodimio:

Peso:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa}_{\text{soluta}}(\text{g})}{\text{volumen}_{\text{solución}}(\text{L})}$$

$$\text{masa}_{\text{soluta}} = \text{concentración} * \text{volumen} (\text{L})$$

$$m_{\text{soluta}} = 4 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,1 \text{ L}$$

$$m_{\text{soluto}} = 0,4 \text{ mg}$$

Recuperación:

Para esta parte comencé con mi porcentaje inicial de neodimio obtenido en los análisis químicos en este caso fue de 11,43% que fue analizado por Fluorescencia de Rayos X en 10g de muestra.

$$11,43\% \longrightarrow 10\text{g}$$

$$\begin{array}{l} 10\text{g} \text{ ——— } 100\% \\ x \text{ ——— } 11,43\% \\ x = \frac{11,43\% * 10\text{g}}{100\%} \\ x = 1,14\text{g} \end{array}$$

Luego de saber que en un 11,43% existe 1,14g de Neodimio, pero esto en 10g que fue analizado por lo que ahora necesitamos saber esa cantidad en gramos, pero ahora en cantidad de la muestra que utilicé con los ácidos en este caso 0,1g.

$$\begin{array}{l} 1,14\text{g} \text{ ——— } 10\text{g} \\ x \text{ ——— } 0,1\text{g} \\ x = \frac{0,1\text{g} * 1,14\text{g}}{10\text{g}} \\ x = 0,011\text{g} \end{array}$$

Una vez obtenido el resultado de la masa (g) para la cantidad de muestra utilizada para cada solución, obtenemos el porcentaje de recuperación utilizando la relación **g Nd / g Magneto** que en la ficha N° 2 fue de 0,004g partiendo de los 0,011g recientemente calculado.

$$\begin{array}{l} 0,011\text{g} \text{ ——— } 100\% \\ 0,004\text{g} \text{ ——— } x \\ x = \frac{0,004\text{g} * 100\%}{0,011\text{g}} \end{array}$$

$$\text{Recuperación} = 36,36\%$$

Ficha Técnica N° 03

Ensayo: 03
Muestra: Magneto de disco duro
Objetivo: Determinar la influencia del agente lixivante.

Lixiviación

Agente lixivante: Ácido Nítrico
Cantidad de muestra (g): 0,1
Tiempo de lixiviación (h): 6
Agitación (RPM): 350
Temperatura (°C): Ambiente (18 °C)
Sólidos (%): 0,1
Concentración: 1 M

Tabla IV.1. Balance metalúrgico de lixiviación química de la muestra de los magnetos usando ácido nítrico 1 M y 0,1 % sólidos.

		Neodimio			
Muestra	Volumen (mL)	Concentración	Peso (mg)	g Nd / g Magneto	Recuperación
Solución Fuerte	100	3	0,3	0,0003g/0,1g 0,003g	27,27%

Recuperación de Nd en solución (%): 27,27%

Cálculo para encontrar el peso (mg) y la recuperación de Neodimio:

Peso:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa}_{\text{soluta}}(\text{g})}{\text{volumen}_{\text{solución}}(\text{L})}$$

$$\text{masa}_{\text{soluta}} = \text{concentración} * \text{volumen} (\text{L})$$

$$m_{\text{soluta}} = 3 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,1 \text{ L}$$

$$m_{\text{soluto}} = 0,3 \text{ mg}$$

Recuperación:

Para esta parte comencé con mi porcentaje inicial de neodimio obtenido en los análisis químicos en este caso fue de 11,43% que fue analizado por Fluorescencia de Rayos X en 10g de muestra.

$$\begin{array}{l} 11,43\% \quad \longrightarrow 10\text{g} \\ 10\text{g} \quad \longrightarrow 100\% \\ x \quad \longrightarrow 11,43\% \\ x = \frac{11,43\% * 10\text{g}}{100\%} \\ x = 1,14\text{g} \end{array}$$

Luego de saber que en un 11,43% existe 1,14g de Neodimio, pero esto en 10g que fue analizado por lo que ahora necesitamos saber esa cantidad en gramos, pero ahora en cantidad de la muestra que utilicé con los ácidos en este caso 0,1g.

$$\begin{array}{l} 1,14\text{g} \quad \longrightarrow 10\text{g} \\ x \quad \longrightarrow 0,1\text{g} \\ x = \frac{0,1\text{g} * 1,14\text{g}}{10\text{g}} \\ x = 0,011\text{g} \end{array}$$

Una vez obtenido el resultado de la masa (g) para la cantidad de muestra utilizada para cada solución, obtenemos el porcentaje de recuperación utilizando la relación **g Nd / g Magneto** que en la ficha N° 3 fue de 0,003g partiendo de los 0,011g recientemente calculado.

$$\begin{array}{l} 0,011\text{g} \quad \longrightarrow 100\% \\ 0,003\text{g} \quad \longrightarrow x \\ x = \frac{0,003\text{g} * 100\%}{0,011\text{g}} \\ \text{Recuperación} = 27,27\% \end{array}$$

Ficha Técnica N° 04

Ensayo: 04
Muestra: Magneto de disco duro
Objetivo: Determinar la influencia del agente lixivante.

Lixiviación

Agente lixivante: Ácido Oxálico
Cantidad de muestra (g): 0,1
Tiempo de lixiviación (h): 6
Agitación (RPM): 350
Temperatura (°C): Ambiente (18 °C)
Sólidos (%): 0,1
Concentración: 1 M

Tabla IV.1. Balance metalúrgico de lixiviación química de la muestra de los magnetos usando ácido nítrico 1 M y 0,1 % sólidos.

		Neodimio			
Muestra	Volumen (mL)	Concentración	Peso (mg)	g Nd / g Magneto	Recuperación
Solución Fuerte	100	5	0,5	0,0003g/0,1g 0,005g	45,45%

Recuperación de Nd en solución (%): 45,45%

Cálculo para encontrar el peso (mg) y la recuperación de Neodimio:

Peso:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa}_{\text{soluta}}(\text{g})}{\text{volumen}_{\text{solución}}(\text{L})}$$

$$\text{masa}_{\text{soluta}} = \text{concentración} * \text{volumen} (\text{L})$$

$$m_{\text{soluta}} = 5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,1 \text{ L}$$

$$m_{\text{soluto}} = 0,5 \text{ mg}$$

Recuperación:

Para esta parte comencé con mi porcentaje inicial de neodimio obtenido en los análisis químicos en este caso fue de 11,43% que fue analizado por Fluorescencia de Rayos X en 10g de muestra.

$$\begin{array}{l} 11,43\% \quad \longrightarrow 10\text{g} \\ 10\text{g} \quad \longrightarrow 100\% \\ x \quad \longrightarrow 11,43\% \\ x = \frac{11,43\% * 10\text{g}}{100\%} \\ x = 1,14\text{g} \end{array}$$

Luego de saber que en un 11,43% existe 1,14g de Neodimio, pero esto en 10g que fue analizado por lo que ahora necesitamos saber esa cantidad en gramos, pero ahora en cantidad de la muestra que utilicé con los ácidos en este caso 0,1g.

$$\begin{array}{l} 1,14\text{g} \quad \longrightarrow 10\text{g} \\ x \quad \longrightarrow 0,1\text{g} \\ x = \frac{0,1\text{g} * 1,14\text{g}}{10\text{g}} \\ x = 0,011\text{g} \end{array}$$

Una vez obtenido el resultado de la masa (g) para la cantidad de muestra utilizada para cada solución, obtenemos el porcentaje de recuperación utilizando la relación **g Nd / g Magneto** que en la ficha N° 4 fue de 0,005g partiendo de los 0,011g recientemente calculado.

$$\begin{array}{l} 0,011\text{g} \quad \longrightarrow 100\% \\ 0,005\text{g} \quad \longrightarrow x \\ x = \frac{0,005\text{g} * 100\%}{0,011\text{g}} \\ \text{Recuperación} = 45,45\% \end{array}$$

Ficha Técnica N° 05

Ensayo: 05
Muestra: Magneto de disco duro
Objetivo: Determinar la influencia del agente lixivante.

Lixiviación

Agente lixivante: Ácido Cítrico
Cantidad de muestra (g): 0,1
Tiempo de lixiviación (h): 6
Agitación (RPM): 350
Temperatura (°C): Ambiente (18 °C)
Sólidos (%): 0,1
Concentración: 1 M

Tabla IV.1. Balance metalúrgico de lixiviación química de la muestra de los magnetos usando ácido nítrico 1 M y 0,1 % sólidos.

		Neodimio			
Muestra	Volumen (mL)	Concentración	Peso (mg)	g Nd / g Magneto	Recuperación
Solución Fuerte	100	3	0,3	0,0003g/0,1g 0,003g	27,27%

Recuperación de Nd en solución (%): 27,27%

Cálculo para encontrar el peso (mg) y la recuperación de Neodimio:

Peso:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa}_{\text{soluta}}(\text{g})}{\text{volumen}_{\text{solución}}(\text{L})}$$

$$\text{masa}_{\text{soluta}} = \text{concentración} * \text{volumen} (\text{L})$$

$$m_{\text{soluta}} = 3 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,1 \text{ L}$$

$$m_{\text{soluto}} = 0,3 \text{ mg}$$

Recuperación:

Para esta parte comencé con mi porcentaje inicial de neodimio obtenido en los análisis químicos en este caso fue de 11,43% que fue analizado por Fluorescencia de Rayos X en 10g de muestra.

$$\begin{array}{l} 11,43\% \quad \longrightarrow 10\text{g} \\ 10\text{g} \quad \longrightarrow 100\% \\ x \quad \longrightarrow 11,43\% \\ x = \frac{11,43\% * 10\text{g}}{100\%} \\ x = 1,14\text{g} \end{array}$$

Luego de saber que en un 11,43% existe 1,14g de Neodimio, pero esto en 10g que fue analizado por lo que ahora necesitamos saber esa cantidad en gramos, pero ahora en cantidad de la muestra que utilicé con los ácidos en este caso 0,1g.

$$\begin{array}{l} 1,14\text{g} \quad \longrightarrow 10\text{g} \\ x \quad \longrightarrow 0,1\text{g} \\ x = \frac{0,1\text{g} * 1,14\text{g}}{10\text{g}} \\ x = 0,011\text{g} \end{array}$$

Una vez obtenido el resultado de la masa (g) para la cantidad de muestra utilizada para cada solución, obtenemos el porcentaje de recuperación utilizando la relación **g Nd / g Magneto** que en la ficha N° 5 fue de 0,003g partiendo de los 0,011g recientemente calculado.

$$\begin{array}{l} 0,011\text{g} \quad \longrightarrow 100\% \\ 0,003\text{g} \quad \longrightarrow x \\ x = \frac{0,003\text{g} * 100\%}{0,011\text{g}} \\ \text{Recuperación} = 27,27\% \end{array}$$

Ficha Técnica N° 06

Ensayo: 06
Muestra: Magneto de disco duro
Objetivo: Determinar la evaluación de la lixiviación ácida a diferente concentración con el ácido sulfúrico como mejor agente lixivante.

Lixiviación

Agente lixivante: Ácido Sulfúrico
Cantidad de muestra (g): 0,1
Tiempo de lixiviación (h): 6
Agitación (RPM): 350
Temperatura (°C): Ambiente (18 °C)
Sólidos (%): 0,1
Concentración: 2 M

Tabla IV.1. Balance metalúrgico de lixiviación química de la muestra de los magnetos usando ácido nítrico 2 M a 6 h y 0,1 % sólidos.

		Neodimio			
Muestra	Volumen (mL)	Concentración	Peso (mg)	g Nd / g Magneto	Recuperación
Solución Fuerte	100	6	0,6	0,0003g/0,1g 0,006g	54,54%

Recuperación de Nd en solución (%): 54,54%

Cálculo para encontrar el peso (mg) y la recuperación de Neodimio:

Peso:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa}_{\text{solute}}(\text{g})}{\text{volumen}_{\text{solución}}(\text{L})}$$

$$\text{masa}_{\text{solute}} = \text{concentración} * \text{volumen} (\text{L})$$

$$m_{\text{soluto}} = 6 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,1 \text{ L}$$

$$m_{\text{soluto}} = \mathbf{0,6 \text{ mg}}$$

Recuperación:

Para esta parte comencé con mi porcentaje inicial de neodimio obtenido en los análisis químicos en este caso fue de 11,43% que fue analizado por Fluorescencia de Rayos X en 10g de muestra.

$$11,43\% \quad \longrightarrow \quad 10\text{g}$$

$$10\text{g} \quad \longrightarrow \quad 100\%$$

$$x \quad \longrightarrow \quad 11,43\%$$

$$x = \frac{11,43\% * 10\text{g}}{100\%}$$

$$x = \mathbf{1,14\text{g}}$$

Luego de saber que en un 11,43% existe 1,14g de Neodimio, pero esto en 10g que fue analizado por lo que ahora necesitamos saber esa cantidad en gramos, pero ahora en cantidad de la muestra que utilicé con los ácidos en este caso 0,1g.

$$1,14\text{g} \quad \longrightarrow \quad 10\text{g}$$

$$x \quad \longrightarrow \quad 0,1\text{g}$$

$$x = \frac{0,1\text{g} * 1,14\text{g}}{10\text{g}}$$

$$x = \mathbf{0,011\text{g}}$$

Una vez obtenido el resultado de la masa (g) para la cantidad de muestra utilizada para cada solución, obtenemos el porcentaje de recuperación utilizando la relación **g Nd / g Magneto** que en la ficha N° 6 fue de 0,006g partiendo de los 0,011g recientemente calculado.

$$0,011\text{g} \quad \longrightarrow \quad 100\%$$

$$0,006\text{g} \quad \longrightarrow \quad x$$

$$x = \frac{0,006\text{g} * 100\%}{0,011\text{g}}$$

$$\mathbf{Recuperación = 54,54\%}$$

Ficha Técnica N° 07

Ensayo: 07
Muestra: Magneto de disco duro
Objetivo: Determinar la evaluación de la lixiviación ácida a diferente concentración con el ácido sulfúrico como mejor agente lixivante.

Lixiviación

Agente lixivante: Ácido Sulfúrico
Cantidad de muestra (g): 0,1
Tiempo de lixiviación (h): 6
Agitación (RPM): 350
Temperatura (°C): Ambiente (18 °C)
Sólidos (%): 0,1
Concentración: 3 M

Tabla IV.1. Balance metalúrgico de lixiviación química de la muestra de los magnetos usando ácido sulfúrico 3 M a 6 h y 0,1 % sólidos.

		Neodimio			
Muestra	Volumen (mL)	Concentración	Peso (mg)	g Nd / g Magneto	Recuperación
Solución Fuerte	100	7	0,7	0,0003g/0,1g 0,007g	63,63%

Recuperación de Nd en solución (%): 63,63%

Cálculo para encontrar el peso (mg) y la recuperación de Neodimio:

Peso:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa}_{\text{soluta}}(g)}{\text{volumen}_{\text{solución}}(L)}$$

$$masa_{soluta} = concentración * volumen (L)$$

$$m_{soluta} = 7 \frac{mg}{L} * 0,1 L$$

$$m_{soluta} = \mathbf{0,7 mg}$$

Recuperación:

Para esta parte comencé con mi porcentaje inicial de neodimio obtenido en los análisis químicos en este caso fue de 11,43% que fue analizado por Fluorescencia de Rayos X en 10g de muestra.

$$11,43\% \longrightarrow 10g$$

$$10g \text{ ————— } 100\%$$

$$x \text{ ————— } 11,43\%$$

$$x = \frac{11,43\% * 10g}{100\%}$$

$$x = \mathbf{1,14g}$$

Luego de saber que en un 11,43% existe 1,14g de Neodimio, pero esto en 10g que fue analizado por lo que ahora necesitamos saber esa cantidad en gramos, pero ahora en cantidad de la muestra que utilicé con los ácidos en este caso 0,1g.

$$1,14g \text{ ————— } 10g$$

$$x \text{ ————— } 0,1g$$

$$x = \frac{0,1g * 1,14g}{10g}$$

$$x = \mathbf{0,011g}$$

Una vez obtenido el resultado de la masa (g) para la cantidad de muestra utilizada para cada solución, obtenemos el porcentaje de recuperación utilizando la relación **g Nd / g Magneto** que en la ficha N° 7 fue de 0,007g partiendo de los 0,011g recientemente calculado.

$$0,011g \text{ ————— } 100\%$$

$$0,007g \text{ ————— } x$$

$$x = \frac{0,007g * 100\%}{0,011g}$$

$$\mathbf{Recuperación = 63,63\%}$$

Ficha Técnica N° 08

Ensayo: 08
Muestra: Magneto de disco duro
Objetivo: Determinar la evaluación de la influencia de tiempo de lixiviación con el ácido sulfúrico como mejor agente lixivante y a una concentración de 3M.

Lixiviación

Agente lixivante: Ácido Sulfúrico
Cantidad de muestra (g): 0,1
Tiempo de lixiviación (h): 12
Agitación (RPM): 350
Temperatura (°C): Ambiente (18 °C)
Sólidos (%): 0,1
Concentración: 3 M

Tabla IV.1. Balance metalúrgico de lixiviación química de la muestra de los magnetos usando ácido sulfúrico 3 M en 12 h y 0,1 % sólidos

		Neodimio			
Muestra	Volumen (mL)	Concentración	Peso (mg)	g Nd / g Magneto	Recuperación
Solución Fuerte	100	7	0,7	0,0003g/0,1g 0,007g	63,63%

Recuperación de Nd en solución (%): 63,63%

Cálculo para encontrar el peso (mg) y la recuperación de Neodimio:

Peso:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa}_{\text{soluta}}(\text{g})}{\text{volumen}_{\text{solución}}(\text{L})}$$

$$\text{masa}_{\text{soluta}} = \text{concentración} * \text{volumen} (\text{L})$$

$$m_{\text{soluta}} = 7 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,1 \text{ L}$$

$$m_{\text{soluta}} = \mathbf{0,7 \text{ mg}}$$

Recuperación:

Para esta parte comencé con mi porcentaje inicial de neodimio obtenido en los análisis químicos en este caso fue de 11,43% que fue analizado por Fluorescencia de Rayos X en 10g de muestra.

$$11,43\% \longrightarrow 10\text{g}$$

$$10\text{g} \text{ ——— } 100\%$$

$$x \text{ ——— } 11,43\%$$

$$x = \frac{11,43\% * 10\text{g}}{100\%}$$

$$x = \mathbf{1,14\text{g}}$$

Luego de saber que en un 11,43% existe 1,14g de Neodimio, pero esto en 10g que fue analizado por lo que ahora necesitamos saber esa cantidad en gramos, pero ahora en cantidad de la muestra que utilicé con los ácidos en este caso 0,1g.

$$1,14\text{g} \text{ ——— } 10\text{g}$$

$$x \text{ ——— } 0,1\text{g}$$

$$x = \frac{0,1\text{g} * 1,14\text{g}}{10\text{g}}$$

$$x = \mathbf{0,011\text{g}}$$

Una vez obtenido el resultado de la masa (g) para la cantidad de muestra utilizada para cada solución, obtenemos el porcentaje de recuperación utilizando la relación **g Nd / g Magneto** que en la ficha N° 8 fue de 0,007g partiendo de los 0,011g recientemente calculado.

$$0,011\text{g} \text{ ——— } 100\%$$

$$0,007\text{g} \text{ ——— } x$$

$$x = \frac{0,007\text{g} * 100\%}{0,011\text{g}}$$

$$\text{Recuperación} = \mathbf{63,63\%}$$

Ficha Técnica N° 09

Ensayo: 09
Muestra: Magneto de disco duro
Objetivo: Determinar la evaluación de la influencia de tiempo de lixiviación con el ácido sulfúrico como mejor agente lixivante y a una concentración de 3M.

Lixiviación

Agente lixivante: Ácido Sulfúrico
Cantidad de muestra (g): 0,1
Tiempo de lixiviación (h): 24
Agitación (RPM): 350
Temperatura (°C): Ambiente (18 °C)
Sólidos (%): 0,1
Concentración: 3 M

Tabla IV.1. Balance metalúrgico de lixiviación química de la muestra de los magnetos usando ácido sulfúrico 3 M en 24 h y 0,1 % sólidos

		Neodimio			
Muestra	Volumen (mL)	Concentración	Peso (mg)	g Nd / g Magneto	Recuperación
Solución Fuerte	100	8	0,8	0,0003g/0,1g 0,008g	72,72%

Recuperación de Nd en solución (%): 72,72%

Cálculo para encontrar el peso (mg) y la recuperación de Neodimio:

Peso:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa}_{\text{soluta}}(\text{g})}{\text{volumen}_{\text{solución}}(\text{L})}$$

$$\text{masa}_{\text{soluta}} = \text{concentración} * \text{volumen} (\text{L})$$

$$m_{\text{soluta}} = 8 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,1 \text{ L}$$

$$m_{\text{soluta}} = \mathbf{0,8 \text{ mg}}$$

Recuperación:

Para esta parte comencé con mi porcentaje inicial de neodimio obtenido en los análisis químicos en este caso fue de 11,43% que fue analizado por Fluorescencia de Rayos X en 10g de muestra.

$$11,43\% \longrightarrow 10\text{g}$$

$$10\text{g} \text{ ——— } 100\%$$

$$x \text{ ——— } 11,43\%$$

$$x = \frac{11,43\% * 10\text{g}}{100\%}$$

$$x = \mathbf{1,14\text{g}}$$

Luego de saber que en un 11,43% existe 1,14g de Neodimio, pero esto en 10g que fue analizado por lo que ahora necesitamos saber esa cantidad en gramos, pero ahora en cantidad de la muestra que utilicé con los ácidos en este caso 0,1g.

$$1,14\text{g} \text{ ——— } 10\text{g}$$

$$x \text{ ——— } 0,1\text{g}$$

$$x = \frac{0,1\text{g} * 1,14\text{g}}{10\text{g}}$$

$$x = \mathbf{0,011\text{g}}$$

Una vez obtenido el resultado de la masa (g) para la cantidad de muestra utilizada para cada solución, obtenemos el porcentaje de recuperación utilizando la relación **g Nd / g Magneto** que en la ficha N° 9 fue de 0,008g partiendo de los 0,011g recientemente calculado.

$$0,011\text{g} \text{ ——— } 100\%$$

$$0,008\text{g} \text{ ——— } x$$

$$x = \frac{0,008g * 100\%}{0,011g}$$

Recuperación = 72,72%

Ficha Técnica N° 10

Ensayo: 10
 Muestra: Magneto de disco duro
 Objetivo: Determinar la evaluación de la influencia de porcentaje de sólido con el ácido sulfúrico como mejor agente lixivante y a una concentración de 3M y un tiempo de 24h.

Lixiviación

Agente lixivante: Ácido Sulfúrico
 Cantidad de muestra (g): 1
 Tiempo de lixiviación (h): 24
 Agitación (RPM): 350
 Temperatura (°C): Ambiente (18 °C)
 Sólidos (%): 1
 Concentración: 3 M

Tabla IV.1. Balance metalúrgico de lixiviación química de la muestra de los magnetos usando ácido sulfúrico 3 M en 24 h y 1 % sólidos

Neodimio					
Muestra	Volumen (mL)	Concentración	Peso (mg)	g Nd / g Magneto	Recuperación
Solución Fuerte	100	6	0,6	0,0003g/0,1g 0,006g	54,54%

Recuperación de Nd en solución (%): 54,54%

Cálculo para encontrar el peso (mg) y la recuperación de Neodimio:

Peso:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa}_{\text{soluta}}(\text{g})}{\text{volumen}_{\text{solución}}(\text{L})}$$

$$\text{masa}_{\text{soluta}} = \text{concentración} * \text{volumen} (\text{L})$$

$$m_{\text{soluta}} = 6 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,1 \text{ L}$$

$$m_{\text{soluta}} = \mathbf{0,6 \text{ mg}}$$

Recuperación:

Para esta parte comencé con mi porcentaje inicial de neodimio obtenido en los análisis químicos en este caso fue de 11,43% que fue analizado por Fluorescencia de Rayos X en 10g de muestra.

11,43% → 10g

$$10\text{g} \text{ ——— } 100\%$$

$$x \text{ ——— } 11,43\%$$

$$x = \frac{11,43\% * 10\text{g}}{100\%}$$

$$x = \mathbf{1,14\text{g}}$$

Luego de saber que en un 11,43% existe 1,14g de Neodimio, pero esto en 10g que fue analizado por lo que ahora necesitamos saber esa cantidad en gramos, pero ahora en cantidad de la muestra que utilicé con los ácidos en este caso 0,1g.

$$1,14\text{g} \text{ ——— } 10\text{g}$$

$$x \text{ ——— } 0,1\text{g}$$

$$x = \frac{0,1\text{g} * 1,14\text{g}}{10\text{g}}$$

$$x = \mathbf{0,011\text{g}}$$

Una vez obtenido el resultado de la masa (g) para la cantidad de muestra utilizada para cada solución, obtenemos el porcentaje de recuperación utilizando la relación **g Nd / g Magneto** que en la ficha N° 10 fue de 0,006g partiendo de los 0,011g recientemente calculado.

$$0,011g \text{ ——— } 100\%$$

$$0,006g \text{ ——— } x$$

$$x = \frac{0,006g * 100\%}{0,011g}$$

$$\text{Recuperación} = 54,54\%$$

Ficha Técnica N° 11

Ensayo: 11

Muestra: Magneto de disco duro

Objetivo: Determinar la evaluación de la influencia de porcentaje de sólido con el ácido sulfúrico como mejor agente lixivante y a una concentración de 3M y un tiempo de 24h.

Lixiviación

Agente lixivante:	Ácido Sulfúrico
Cantidad de muestra (g):	2
Tiempo de lixiviación (h):	24
Agitación (RPM):	350
Temperatura (°C):	Ambiente (18 °C)
Sólidos (%):	2
Concentración:	3 M

Tabla IV.1. Balance metalúrgico de lixiviación química de la muestra de los magnetos usando ácido sulfúrico 3 M en 24 h y 2 % sólidos

		Neodimio			
Muestra	Volumen (mL)	Concentración	Peso (mg)	g Nd / g Magneto	Recuperación
Solución Fuerte	100	5	0,5	0,0003g/0,1g 0,005g	45,45%

Recuperación de Nd en solución (%): 45,45%

Cálculo para encontrar el peso (mg) y la recuperación de Neodimio:

Peso:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa}_{\text{soluta}}(\text{g})}{\text{volumen}_{\text{solución}}(\text{L})}$$

$$\text{masa}_{\text{soluta}} = \text{concentración} * \text{volumen} (\text{L})$$

$$m_{\text{soluta}} = 5 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,1 \text{ L}$$

$$m_{\text{soluta}} = \mathbf{0,5 \text{ mg}}$$

Recuperación:

Para esta parte comencé con mi porcentaje inicial de neodimio obtenido en los análisis químicos en este caso fue de 11,43% que fue analizado por Fluorescencia de Rayos X en 10g de muestra.

$$11,43\% \longrightarrow 10\text{g}$$

$$10\text{g} \text{ ————— } 100\%$$

$$x \text{ ————— } 11,43\%$$

$$x = \frac{11,43\% * 10\text{g}}{100\%}$$

$$x = \mathbf{1,14\text{g}}$$

Luego de saber que en un 11,43% existe 1,14g de Neodimio, pero esto en 10g que fue analizado por lo que ahora necesitamos saber esa cantidad en gramos, pero ahora en cantidad de la muestra que utilicé con los ácidos en este caso 0,1g.

$$\begin{array}{l} 1,14g \text{ ——— } 10g \\ x \text{ ——— } 0,1g \\ x = \frac{0,1g * 1,14g}{10g} \\ x = \mathbf{0,011g} \end{array}$$

Una vez obtenido el resultado de la masa (g) para la cantidad de muestra utilizada para cada solución, obtenemos el porcentaje de recuperación utilizando la relación **g Nd / g Magneto** que en la ficha N° 11 fue de 0,005g partiendo de los 0,011g recientemente calculado.

$$\begin{array}{l} 0,011g \text{ ——— } 100\% \\ 0,005g \text{ ——— } x \\ x = \frac{0,005g * 100\%}{0,011g} \\ \mathbf{Recuperación = 45,45\%} \end{array}$$

Ficha Técnica N° 12

Ensayo: 12
Muestra: Magneto de disco duro
Objetivo: Mejor agente lixivante (Sulfúrico), Concentración (3M), Tiempo (24h) y porcentaje de sólido (0,1%).

Lixiviación

Agente lixivante:	Ácido Sulfúrico
Cantidad de muestra (g):	0,1
Tiempo de lixiviación (h):	24
Agitación (RPM):	350
Temperatura (°C):	Ambiente (18 °C)
Sólidos (%):	0,1
Concentración:	3 M

Tabla IV.1. Balance metalúrgico de lixiviación química de la muestra de los magnetos usando ácido sulfúrico 3 M en 24 h y 0,1 % sólidos

		Neodimio			
Muestra	Volumen (mL)	Concentración	Peso (mg)	g Nd / g Magneto	Recuperación
Solución Fuerte	100	8	0,8	0,0003g/0,1g 0,008g	72,72%

Recuperación de Nd en solución (%): 72,72%

Cálculo para encontrar el peso (mg) y la recuperación de Neodimio:

Peso:

$$\text{Concentración} = \frac{\text{masa}_{\text{soluta}}(\text{g})}{\text{volumen}_{\text{solución}}(\text{L})}$$

$$\text{masa}_{\text{soluta}} = \text{concentración} * \text{volumen} (\text{L})$$

$$m_{\text{soluta}} = 8 \frac{\text{mg}}{\text{L}} * 0,1 \text{ L}$$

$$m_{\text{soluta}} = \mathbf{0,8 \text{ mg}}$$

Recuperación:

Para esta parte comencé con mi porcentaje inicial de neodimio obtenido en los análisis químicos en este caso fue de 11,43% que fue analizado por Fluorescencia de Rayos X en 10g de muestra.

$$11,43\% \longrightarrow 10\text{g}$$

$$10\text{g} \text{ ————— } 100\%$$

$$x \text{ ————— } 11,43\%$$

$$x = \frac{11,43\% * 10\text{g}}{100\%}$$

$$x = \mathbf{1,14\text{g}}$$

Luego de saber que en un 11,43% existe 1,14g de Neodimio, pero esto en 10g que fue analizado por lo que ahora necesitamos saber esa cantidad en gramos, pero ahora en cantidad de la muestra que utilicé con los ácidos en este caso 0,1g.

$$\begin{array}{l} 1,14g \text{ ———— } 10g \\ x \text{ ———— } 0,1g \\ x = \frac{0,1g * 1,14g}{10g} \\ x = \mathbf{0,011g} \end{array}$$

Una vez obtenido el resultado de la masa (g) para la cantidad de muestra utilizada para cada solución, obtenemos el porcentaje de recuperación utilizando la relación **g Nd / g Magneto** que en la ficha N° 12 fue de 0,008g partiendo de los 0,011g recientemente calculado.

$$\begin{array}{l} 0,011g \text{ ———— } 100\% \\ 0,008g \text{ ———— } x \\ x = \frac{0,008g * 100\%}{0,011g} \\ \mathbf{Recuperación = 72,72\%} \end{array}$$

ANEXO D: DISEÑO DE LIXIVIACIÓN

Tanque de Lixiviación

El flujo másico está en función de la cantidad de material que entra al proceso de lixiviación, tomando en cuenta que se realizó el balance con un porcentaje de 10 % de sólidos. El valor del flujo lo tomamos de (UPS, 2021) que indica que el laboratorio de suelos y la bodega de equipos de cómputo reporta 17,6 ton/mes de CPU como desecho electrónico en Quito. A continuación, se muestra el cálculo del volumen:

$$\text{Flujo} = 17\,600 \text{ kg/mes.}$$

La densidad de la solución es de 1 000 kg/m³ para lo cual se aplicará la fórmula del volumen que es la relación entre la masa y la densidad, como se observa en la ecuación 4.5.1

$$\begin{array}{l} V_l = \frac{m}{\rho} \\ V_l = \frac{17\,600 \text{ kg/mes}}{1000 \text{ kg/m}^3} \end{array} \quad 4.5.1$$

$$\mathbf{V_l = 17,60 \text{ m}^3/\text{mes}}$$

La planta trabajará 22 días:

$$V_l = 17,60 \frac{m^3}{mes} * \frac{1 mes}{22 dias} = \mathbf{0,80 m^3/día}$$

El volumen obtenido es de $0,80 m^3$, para el cual se aplicará un factor de sobredimensionamiento de 1,2, de esta manera se obtiene un tanque con un sobredimensionamiento del 20 %, por criterios de diseño para lo cual se utilizará la Ecuación 4.5.2

$$V_s = V_l * f_{SD} \quad 4.5.2$$

$$V_s = 0,80 m^3 * 1,2 = \mathbf{0,96 m^3}$$

El volumen del tanque con un sobredimensionamiento del 20 % es $0,96 m^3$, con el cual se encontró el valor del diámetro y la altura, tomando en cuenta que por criterio de diseño la relación entre la altura y el diámetro es de 1,5. Se utilizó la Ecuación 4.5.3

$$h = 1,5 D_i$$

$$V_s = \pi r^2 h = 1,5 * \pi * \frac{D_i^3}{4} \quad 4.5.3$$

$$0,96 = 1,5 * \pi * \frac{D_i^3}{4}$$

$$\mathbf{D_i = 0,93m}$$

$$h = 1,5 D_i$$

$$h = 1,5 * 0,93m$$

$$\mathbf{h = 1,39 m}$$

Una vez calculada la altura y el diámetro del cilindro, se procede a encontrar el espesor del tanque para el cual se aplicará la Ecuación 4.5.4

$$t_s = \frac{P_H * R_i}{2 * S * E - 0,6 * P_H} + f_c \quad 4.5.4$$

Donde:

P_H : Presión dentro del tanque agitado (psi)

R_i : Radio del tanque (in)

S: Resistencia del material

E: Eficiencia en la soldadura

f_c : Factor de seguridad por la corrosión

La presión interna corresponde a la presión hidrostática en la cual se emplea la Ecuación 4.5.5.

$$P_h = g * \rho * h \quad 4.5.5$$

Donde:

P_h : Presión dentro del tanque agitado (psi)

ρ : Densidad (kg/m^3)

h: altura (m)

g: gravedad (m/s^2)

$$P_h = 9,8 \frac{m}{s^2} * 1000 \frac{kg}{m^3} * 1,39m * \frac{14,7 psi}{101 325 Pa}$$

$$P_h = 1,98 (psi)$$

El material que se elegirá para la construcción del tanque es el acero AISI 316 porque se trabaja con ácidos fuertes, y además este material ofrece una resistencia de 23 937,82 psi. La eficiencia de soldadura normalmente es 0,85. El factor de seguridad es de 3 mm, para evitar problemas de corrosión.

Con estos datos se procede a calcular el espesor:

$$t_s = \frac{1,98 * 0,93 * 0,5}{(2 * 23 937,82 * 0,85) - 0,6 * 1,98} * \frac{1000mm}{1m} + 3mm$$

$$t_s = 3,02 mm$$

En la Tabla 4.5.1 se muestra el espesor mínimo para un tanque de 0,93 m de diámetro.

Vessel diameter (m)	Minimum thickness (mm)
1	5
1 to 2	7
2 to 2.5	9
2.5 to 3.0	10
3.0 to 3.5	12

Tabla 4.5.1. Espesores críticos

Según la Tabla 4.5.1 el espesor mínimo que deben tener los tanques de 0,93 m de diámetro es 5 mm por lo tanto se elegirá este valor y no el que se calculó. Como se tiene una presión de 1,98 psi la tapa del tanque puede ser plana o toriesférica. A continuación, se muestran las ecuaciones para el cálculo de la altura, volumen y espesor de la tapa donde se definió también que es plana.

Altura:

4.5.6

$$h_t = D_i - \sqrt{(rk + ri - D_i) * (rk - ri - D_i)}$$

Donde:

rk: radio del nudillo (m)

ri: radio del tanque (m)

Di: diámetro del tanque (m)

$$r_k = 0,06 * D_i \quad 4.5.7$$

$$r_k = 0,06 * 0,93m$$

$$r_k = 0,18 m$$

$$h_t = 0,0056 m$$

Volumen

$$V_t = 0,0809 * D_i^3 \quad 4.5.8$$

$$V_t = 0,0809 * 0,93m^3$$

$$V_t = 0,065 m^3$$

Espesor

$$t_t = \frac{0,885 P * L}{S * E - 0,1 * P} + f_c \quad 4.5.9$$

$$t_t = \frac{0,885 * 1,98 * 0,93}{23\,937,82 * 0,85 - 0,1 * 1,98} * \frac{1000mm}{1m} + 3mm$$

$$t_t = 3,08 mm$$

Volumen Total

$$V_{total} = V_s + V_t$$

$$V_{total} = 0,96 m^3 + 0,065 m^3$$

$$V_{total} = 1,025 m^3$$

Para diseñar el sistema de agitación se procede de la siguiente manera:

- **Sistema de agitación para el tanque de lixiviación**

Según el proceso se escoge el sistema de agitación adecuado, a continuación, se muestra en la figura 4.5.1 la información necesaria:

Figura 4.5.1 Parámetro de selección del sistema de agitación

Selection Chart				Shape Relationships for Turbine Designs		
Service	Mixing Device	Range	Criteria	Tank Diameter to Impeller Dia. Ratio	Tank Height to Diameter Ratio	Impellers and Position
Blending	Turbine	████████████████████	1. Volume Circulation	3:1 to 6:1	Unlimited	Single or Multiple
	Propeller	████████████████████				
	Paddle	████████████████████				
	Tank Vol.	→ 1,000,000 Gals.				
Dispersion (Immiscible Systems)	Turbine	████████████████████	1. Drop Size Control 2. Re-Circulation	3.0:1 to 3.5:1	1:1 to 2:1 in Staged Mixers	At/er Below Center Line of Liquid Charge
	Propeller	████████████████████				
	Paddle	████████████████████				
	Flow	→ 1,000 Gals./Min.				
Reactions in Solution (Miscible Systems)	Turbine	████████████████████	1. Intensity 2. Volume Circulation	2.5:1 to 3.5:1	1:1 to 3:1	Single or Multiple
	Propeller	████████████████████				
	Paddle	████████████████████				
	Charge Vol.	→ 20,000 Gals.				
Dissolution	Turbine	████████████████████	1. Shear 2. Volume Circulation	1.6:1 to 3.2:1	1:1 to 2:1	At/er Below Center Line of Liquid Charge
	Propeller	████████████████████				
	Paddle	████████████████████				
	Charge Vol.	→ 10,000 Gals.				
Solids Suspension	Turbine	████████████████████	1. Circulation 2. Velocity	2.0:1 to 3.5:1	1:1 to 1:2	Depending on Particle Size 1. Imp. Diameter Off Bottom 2. On Bottom
	Propeller	████████████████████				
	Paddle	████████████████████				
	% Solids	→ 100 %				
Gas Applications	Turbine	████████████████████	1. Controlled Shear 2. Circulation 3. High Velocity	2.5:1 to 4.0:1	4:1 to 1:1	1. Multiple Lowest One Impeller Diameter Off Bottom 2. Self-Induce, Just Below Liquid Level
	Propeller	████████████████████				
	Paddle	████████████████████				
	Gas Vol.	→ 5,000 cu. ft./min.				
High Viscosity Applications	Turbine	████████████████████	1. Volume Circulation 2. Low Velocity	1.5:1 to 2.5:1	1:2 to 2:1	Single or Multiple
	Propeller	████████████████████				
	Paddle	████████████████████				
	Vis.	→ 1,000,000 cps				
Heat Transfer	Turbine	████████████████████	1. Volume Circulation 2. High Veloc. Across Transfer Surface	Related to Other Services	Depends on Other Services Being Performed	Single or Multiple, Impeller Opposite Transfer Surface when using Coils
	Propeller	████████████████████				
	Paddle	████████████████████				
	Charge Vol.	→ 20,000 Gals.				
Crystallization or Precipitation	Turbine	████████████████████	1. Circulation 2. Low Velocity 3. Shear Control	2.0:1 to 3.2:1	2:1 to 1:1	Single, At/er Below Center Line of Liquid Charge
	Propeller	████████████████████				
	Paddle	████████████████████				
	Charge Vol.	→ 20,000 Gals.				

En el proceso de recuperación de neodimio el material utilizado son muestras de magnetos de discos duros que es material sólido en suspensión por lo cual de acuerdo a la figura 4.5.1 se recomienda usar turbinas o hélices. Las turbinas Rushton fueron elegidas por su versatilidad y la capacidad de suspender líquidos de manera uniforme, utilizados para el dimensionamiento de esta turbina. Las relaciones para diseñar las turbinas Rushton son:

$$\frac{D_i}{d} = 3$$

$$\frac{W_i}{d} = 0,2$$

$$\frac{L_i}{d} = 0,25$$

$$\frac{H_i}{d} = 1$$

$$\frac{W_b}{D_i} = 0,1$$

De los cálculos anteriores se obtuvo que el diámetro del reactor es 0,93m; por lo tanto, se tendrá:

$$\frac{D_i}{d} = 3 \rightarrow d = 0,31m$$

$$\frac{W_i}{d} = 0,2 \rightarrow W_i = 0,062m$$

$$\frac{L_i}{d} = 0,25 \rightarrow L_i = 0,077m$$

$$\frac{H_i}{d} = 1 \rightarrow H_i = 0,31m$$

$$\frac{W_b}{D_i} = 0,1 \rightarrow W_b = 0,093m$$

Se asume una potencia de agitación, para ellos se puede usar la siguiente Figura 4.5.2:

Agitation	Applications	Power, kW/m ³
Mild	Blending, mixing	0.04–0.10
	Homogeneous reactions	0.01–0.03
Medium	Heat transfer	0.03–1.0
	Liquid-liquid mixing	1.0–1.5
Severe	Slurry suspension	1.5–2.0
	Gas absorption,	1.5–2.0
	Emulsions	1.5–2.0
Violent	Fine slurry suspension	>2.0

Figura 4.5.2 Potencia requerida para algunos procesos

Para sólidos suspendidos indica una potencia de 1,5 kW/m³, para lo cual este valor se multiplicará con el volumen total del tanque y se tendrá la potencia necesitada.

$$Potencia = 1,5 \frac{Kw}{m^3} * 1,025m^3 = 1,54 Kw$$

Recuperación mensual de neodimio de los discos duros en base al diseño de lixiviación

Para esta parte comencé con mi porcentaje inicial de neodimio del análisis químico en este caso fue de 11,43% que fue analizado por Fluorescencia de Rayos X en 10g de muestra.

11,43% → 10g

10g ——— 100%

x ——— 11,43%

$$x = \frac{11,43\% * 10g}{100\%}$$

$$x = 1,14g$$

Luego de saber que en un 11,43% existe 1,14g de neodimio, pero esto en 10g que fue analizado por lo que ahora necesitamos saber esa cantidad en gramos, pero ahora en cantidad de la muestra que utilicé con los ácidos en este caso 0,1g.

$$1,14g \text{ ——— } 10g$$

$$x \text{ ——— } 0,1g$$

$$x = \frac{0,1g * 1,14g}{10g}$$

$$x = 0,011g$$

Una vez obtenido el resultado de la masa (g), obtenemos la recuperación en kg en base al diseño sabiendo que en los 0,011g de Nd inicial hay 17 600 kg que equivale a 17 600 000g de flujo al mes de CPU reciclado partiendo de la relación de **g Nd / g Magneto** utilizado que son los 0,008g con el ácido sulfúrico como mejor agente lixivante a 3M.

$$0,011g \text{ ——— } 17\ 600\ 000g$$

$$0,008g \text{ ——— } x$$

$$x = \frac{0,008g * 17\ 600\ 000g}{0,011g}$$

$$\text{Recuperación} = 12\ 800\ 000g \approx 12,80\ kg/mes$$

Cabe recalcar que la demanda de neodimio ha subido ya que en sectores como el de los vehículos eléctricos y la energía eólica requieren más imanes de neodimio para sus productos por lo que actualmente el precio de neodimio está a poco menos de \$100 por kg.

ANEXO E: HOJA DE ESPECIFICACIÓN DEL TANQUE DE LIXIVIACIÓN

HOJA DE ESPECIFICACIÓN N°1		
Nombre del equipo: Tanque lixivador (TK-105)		
Fabricante: Nanxing Manchineiry Co,Ltd.	Modelo: N/A	Material de construcción: Acero inoxidable AISI 316 Número en planta: 1
Dimensiones: Volumen tanque: 1,025 m ³ Di: 0,93 m Altura tanque: 1,39 m Espesor tanque: 5,00 mm Tapa: Plana Espesor Tapa: 3,08 mm V tapa: 0,065 m ³	Parámetros de diseño: Capacidad: 17 600 kg/mes Presión: 1 bar Temperatura: 20 °C Potencia de agitación: 1,54 Kw Sistema de agitación: turbina rushton	
Principio de funcionamiento: Por la parte superior ingresa el material a lixiviarse y la solución que se usará como agente lixivante, mediante un sistema de agitación (Tipo: turbina rushton) permite recuperar la solución de interés.		
Esquema del equipo:		
		



epoch

**Dirección de Bibliotecas y
Recursos del Aprendizaje**

**UNIDAD DE PROCESOS TÉCNICOS Y ANÁLISIS BIBLIOGRÁFICO Y
DOCUMENTAL**

REVISIÓN DE NORMAS TÉCNICAS, RESUMEN Y BIBLIOGRAFÍA

Fecha de entrega: 10 / 04 / 2023

INFORMACIÓN DEL AUTOR
Nombres – Apellidos: Bryan Felipe Onofre Guilcazo
INFORMACIÓN INSTITUCIONAL
Facultad: Ciencias
Carrera: Ingeniería Química
Título a optar: Ingeniero Químico
f. Analista de Biblioteca responsable: Ing. Rafael Inty Salto Hidalgo

0743-DBRA-UTP-2023