



ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS QUIMICAS
CARRERA FÍSICA

**REMOCIÓN DE METALES PESADOS POR SEPARACIÓN
MAGNÉTICA DE ALTO GRADIENTE**

Trabajo de Titulación

Tipo: Proyecto de Investigación

Presentado para optar el grado académico de:

FISICO

AUTOR: ALDO MAURICIO PACA CAICHO

DIRECTOR: Ing. LUIS SANTIAGO CARRERA ALMENDARIZ Msc

Riobamba – Ecuador

2022

© 2022, Aldo Mauricio Paca Caicho

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

Yo, ALDO MAURICIO PACA CAICHO, declaro que el presente trabajo de titulación 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 titulación; el patrimonio intelectual pertenece a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.

Riobamba, 7 de febrero de 2022

A handwritten signature in black ink, appearing to read 'Aldo Mauricio'. The signature is stylized with loops and flourishes.

Aldo Mauricio Paca Caicho

060423535-8

ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DE CHIMBORAZO
FACULTAD DE CIENCIAS
CARRERA FISICA

El Tribunal del Trabajo de Titulación certifica que: El trabajo de titulación; tipo: Proyecto de Investigación, **REMOCIÓN DE METALES PESADOS POR SEPARACIÓN MAGNÉTICA DE ALTO GRADIENTE**, realizado por el señor: **ALDO MAURICIO PACA CAICHO**, ha sido minuciosamente revisado por los Miembros del Trabajo de Titulación, el mismo que cumple con los requisitos científicos, técnicos, legales, en tal virtud el Tribunal Autoriza su presentación.

| | FIRMA | FECHA |
|--|--------------|--------------|
| Dr. Richard Willians Pachacama Choca. MSc PRESIDENTE DEL TRIBUNAL | _____ | 2022-02-07 |
| Ing. Luis Santiago Carrera Almendáriz. MSc DIRECTOR DE TRABAJO DE TITULACIÓN | _____ | 2022-02-07 |
| Biof. María Fernanda Heredia Moyano. MSc MIEMBRO DEL TRIBUNAL | _____ | 2022-02-07 |

DEDICATORIA

A mis padres Marcelo y Grace quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más, gracias por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía. A mi esposa Fabiana Benavides por su amor y apoyo incondicional, durante todo este proceso, por estar conmigo en todo momento gracias, a mi hijo Matías que es y será la inspiración más grande de mi vida. A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y de una u otra forma me acompañan en todos mis sueños y metas.

Aldo

AGRADECIMIENTO

Agradezco a los docentes de la carrera de Física de la facultad de Ciencias de la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, en especial a mi director de tesis, el Ing. Luis Santiago Carrera Almendáriz por guiar esta investigación y formar parte de otro objetivo alcanzado.

Aldo

TABLA DE CONTENIDO

| | |
|------------------------|------|
| ÍNDICE DE FIGURAS..... | viii |
| RESUMEN..... | ix |
| ABSTRACT..... | x |
| INTRODUCCIÓN..... | 1 |

CAPÍTULO I

| | |
|---|----------|
| 1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL..... | 4 |
| 1.1. Magnetismo..... | 4 |
| 1.2. Campo Magnético..... | 4 |
| 1.3. Dipolo Magnético..... | 4 |
| 1.4. Momento Dipolar Magnético..... | 5 |
| 1.5. Fuerza Magnética..... | 6 |
| 1.6. Torque Magnético..... | 6 |
| 1.7. Magnetización..... | 6 |
| 1.8. Susceptibilidad magnética..... | 7 |
| 1.9. Gradiente..... | 7 |
| 1.10. Potencial escalar magnético..... | 7 |
| 1.11. Energía Potencial Magnética..... | 8 |
| 1.12. Materiales Magnéticos..... | 8 |
| 1.13. Materiales Ferromagnéticos..... | 8 |
| 1.14. Materiales Paramagnéticos..... | 8 |
| 1.15. Materiales Diamagnéticos..... | 9 |
| 1.16. Separación magnética..... | 9 |
| 1.17. Separación magnética de alto gradiente..... | 9 |
| 1.18. Variables..... | 13 |
| 1.19. Hipótesis..... | 13 |

CAPÍTULO II

| | |
|--------------------------------------|-----------|
| 2. MARCO METODOLÓGICO..... | 14 |
| 2.1. Tipo de investigación..... | 14 |
| 2.2. Diseño de la investigación..... | 14 |
| 2.3. Técnicas de investigación..... | 14 |

CAPÍTULO III

| | | |
|-----------|--|-----------|
| 3. | MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS | 21 |
| | CONCLUSIONES..... | 25 |
| | RECOMENDACIONES..... | 26 |
| | BIBLIOGRAFÍA | |

ÍNDICE DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1-1. Afecciones al ser humano | 1 |
| Figura 2-1. Ilustración del proceso de separación magnética de alto gradiente | 11 |
| Figura 2-2. Ilustración simplificada de la geometría del elemento (hilo de metal) de la malla metálica, por la que fluye la partícula magnetizable a separar, con forma esférica. | 12 |

RESUMEN

En este trabajo de investigación ha realizado un análisis, selección y depuración de la literatura científica relacionada con esta temática, para la ejecución de un estudio sistemático y cronológico del estado del arte de los separadores magnéticos de alto gradiente aplicados al tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados. Se ha detectado que, a pesar de existir artículos científicos de revisión bibliográfica sobre la separación magnética, no existe en la literatura artículos de revisión, sobre todo en idioma español, respecto a la aplicación en la filtración de metales pesados en aguas residuales, en este sentido, existen abundantes trabajos en la literatura respecto a la aplicación de filtros tradicionales, los cuales presentan muchas restricciones para separar eficientemente los metales pesados. Se ha encontrado que, muchos investigadores han venido sumando esfuerzos para incrementar los gradientes de campo porque estos permiten alcanzar una mayor eficiencia de separación de materiales débilmente magnéticos. Los principales enfoques para lograr una eficiente separación magnética de alto gradiente en el área del tratamiento de aguas por metales pesados han sido: floculantes eficaces, mallas metálicas con geometrías, materiales y disposiciones óptimas, además de potentes electroimanes que emplean superconductores. Diversos actores de la sociedad, tales como industrias, instituciones gubernamentales, etc., podrían hacer uso de esta tecnología, debido a que actualmente es accesible desde el punto de vista técnico y económico para su implementación, e incluso para la ejecución de proyectos de investigación y desarrollo en universidades y centros de investigación para el mejoramiento de la eficiencia de separación, por lo que se recomienda el estudio de nuevas geometrías, mejores materiales para poder llegar a conseguir gradientes de campo más altos y en consecuencia tener una mejor separación.

Palabras clave: <AGUA CONTAMINADA>; <METALES PESADOS>; <MATERIALES MAGNÉTICOS>; <CAMPO MAGNÉTICO>; <FLOCULANTE>; <SEPARACIÓN MAGNÉTICA>; <GRADIENTE>; <VELOCIDAD DE FLUJO>.

LEONARDO
FABIO MEDINA
NUSTE

Firmado digitalmente por LEONARDO FABIO
MEDINA NUSTE
Nombre de reconocimiento (DN): c=EC, o=BANCO
CENTRAL DEL ECUADOR, ou=ENTIDAD DE
CERTIFICACION DE INFORMACION EOBICE,
|u=QUITO, serialNumber=000621485,
cn=LEONARDO FABIO MEDINA NUSTE
Fecha: 2022.03.02 16:12:09 -05'00'



0367-DBRA-UTP-2022

ABSTRACT

This research work has carried out an analysis, selection and purification of the scientific literature related to this subject, in order to carry out a systematic and chronological study of the state of the art of high gradient magnetic separators applied to the treatment of water contaminated by heavy metals. It has been detected that, despite the existence of scientific articles reviewing the literature on magnetic separation, there are no review articles in the literature, especially in Spanish, regarding the application in the filtration of heavy metals in wastewater, in this sense, there are abundant works in the literature regarding the application of traditional filters, which have many restrictions to efficiently separate heavy metals. It has been found that, many researchers have been adding efforts to increase the field gradients because they allow to achieve a higher separation efficiency of weakly magnetic materials. The main approaches to achieve efficient high gradient magnetic separation in the area of heavy metal water treatment have been effective flocculants, metal meshes with optimal geometries, materials and arrangements, as well as powerful electromagnets using superconductors. Various actors in society, such as industries, government institutions, etc., could make use of this technology, since it is currently accessible from the technical and economic point of view for its implementation, and even for the execution of research and development projects in universities and research centres for the improvement of separation efficiency, so the study of new geometries and better materials is recommended in order to achieve higher field gradients and consequently have a better separation.

Keywords: <CONTAMINATED WATER>; <HEAVY METALS>; <MAGNETIC MATERIALS>; <MAGNETIC FIELD>; <FLOCCULANT>; <MAGNETIC SEPARATION>; <GRADIENT>; <FLOW VELOCITY>.

CARMITA
EULALIA
ROJAS
CASTRO

Digitally signed by
CARMITA EULALIA
ROJAS CASTRO
Date: 2022.03.03
12:40:01 -05'00'

INTRODUCCIÓN

En los últimos años, la contaminación ambiental se ha convertido en uno de los problemas más importantes que enfrenta el planeta. Esta presencia de componentes peligrosos en el entorno natural, ya sean químicos, físicos o biológico que, para muchos ambientalistas, los seres humanos son los principales causantes de que el planeta, hoy en día, enfrente todo tipo de contaminaciones a escalas desmesuradas.

Desde este enfoque, se menciona al ser humano puesto que su actividad en el ámbito industrial y minero hace que arrojen al ambiente, metales pesados que resultan ser tóxicos para todo ser vivo; así, el plomo, mercurio, arsénico, entre otros, y que, resulta nocivo porque permanecerán en el ambiente durante décadas de años en el lugar donde fueron arrojados.

Para Marimón, W. (2018) “La toxicidad de estos metales radica, en que a diferencia de contaminantes orgánicos, estos no pueden ser biodegradados sino que tienden a acumularse en organismos vivos, la misma que lleva a crear serios problemas de salud como daño o reducción del sistema nervioso central, bajos niveles de energía, daños en la composición de la sangre, pulmones, riñones, hígado u otros órganos vitales” (Islam et al. 2018, s/p)

Para una mejor comprensión y análisis del problema, se toma el esquema de Marimón en el que se visualiza claramente el problema de contaminación por metales pesados y las afecciones al ser humano, como se muestra en la figura 1-1 que permite concienciar y valorar del porque se vuelve a insistir en este problema que resulta excesivamente preocupante y razón suficiente para volverlo a abordar.

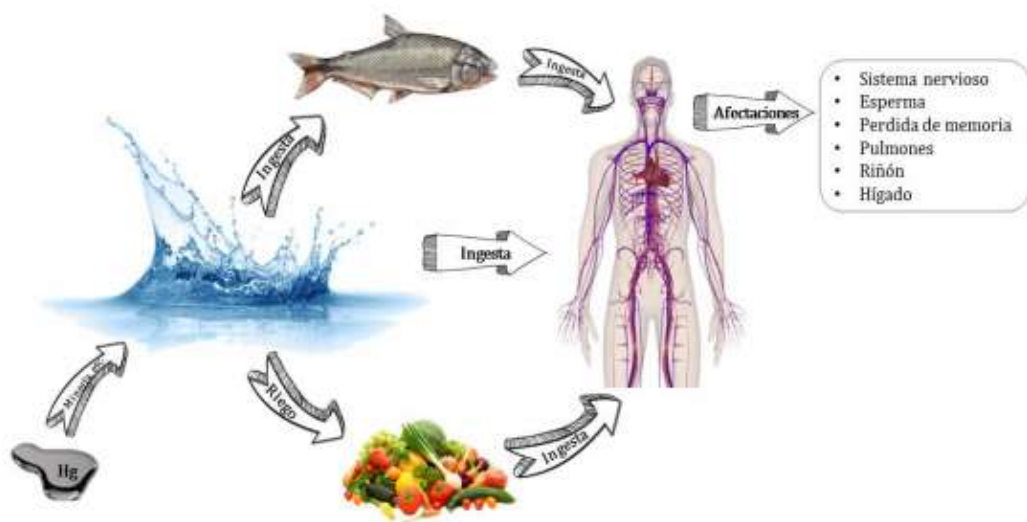


Figura 1-1. Afecciones al ser humano

Realizado por: Marimon W, (2018).

En el Ecuador, el panorama no es distinto puesto que el aumento de la minería artesanal e ilegal en el país ha provocado un aumento considerable de la contaminación por metales pesados en recursos hídricos del país.

Las plantas de procesamiento generalmente están ubicadas en la orilla de los ríos o afluentes. En ellas se llevan a cabo los procesos para el enriquecimiento del mineral, desde la reducción del mineral en bruto mediante molinos, hasta la fase de lixiviación. El cianuro (CN) es utilizado en las piscinas de lixiviación durante el proceso de extracción, los desechos resultantes forman relaves que son eliminados a los ríos y estos se encuentran cargados de metales pesados causando graves impactos ambientales debido a su toxicidad.

“Los estudios realizados por el FUNSAD en los relaves de Vivanco (Zaruma) y Chancha Gerais (Portovelo), muestran concentraciones de niveles de plomo (Pb) (1796.8- 4060.0 mg/kg), arsénico (As) (396.0-8800.0 mg/kg), zinc (Zn) (513.0-2670.0 mg/kg), cadmio (Cd) (27.0-44.1 mg/kg), y mercurio (Hg) (1.0-35.9 mg/kg), que rebasan el máximo permisible señalado en la norma de calidad ambiental del recurso suelo y criterios de remediación para suelos contaminados.” (Rodrigo Oviedo et al. 2017)

Puesto que en Ecuador “la extracción de metales preciosos, requiere del empleo de productos químicos y de grandes cantidades de agua en los pozos de extracción, dentro de estos pozos existen sustancias ligadas al tipo de suelo o mina que se combinan con los productos químicos, generando una gran cantidad de desechos tóxicos. Los desechos tóxicos, subproducto de procesos mineros de relaves y escombros, constan de azufre, cadmio, plomo, arsénico, molibdeno, cianuro libre y compuestos fenólicos.” (Rodrigo Oviedo et al. 2017).

La contaminación entonces se da cuando este tipo de desechos se incorporan al ambiente sin ser tratados en forma adecuada por ello se necesita de manera urgente tratar esta contaminación en las aguas del país para disminuir en un porcentaje considerable los efectos dañinos hacia las personas y el medio ambiente.

JUSTIFICACIÓN

Este trabajo de investigación se enfocará en estudiar la remoción de metales pesados por separación magnética de alto gradiente, HGMS por sus siglas en inglés, ya que actualmente la contaminación por estos metales, en aguas de ríos y afluentes, se ha elevado exponencialmente poniendo en riesgo la salud pública puesto que la toxicidad de estos metales radica, en que, a diferencia de contaminantes orgánicos, estos no pueden ser biodegradados, sino que tienden a acumularse en organismos vivos.

La Organización Mundial de la Salud (OMS) define el agua contaminada como aquella cuya composición haya sido modificada de modo que no reúna las condiciones para el uso que se le

hubiera destinado en su estado natural. Sin agua de buena calidad es imposible garantizar el bienestar del medio ambiente y de todos los seres vivos.

Puesto que la contaminación de aguas por metales pesados es un factor que afecta a la salud pública debido a su toxicidad es sumamente necesario tener un método de remediación que sea óptimo aplicarlo en cualquier medio, el método de separación magnética de alto gradiente tendrá el resultado de remover a los metales pesados del agua y así reducir su contaminación.

El presente trabajo de titulación contribuirá con una investigación bibliográfica acerca de la aplicación de HGMS en la remoción de metales pesados. Este método, que ha sido ampliamente investigado, ha mostrado ser efectivo, con un relativo bajo costo y con capacidad de manejar caudales más grandes que los métodos tradicionales. Sin embargo, a mi leal saber y entender, a nivel nacional y regional prácticamente este método no ha sido aplicado a gran escala en proyectos de descontaminación de aguas tanto en la industria como en áreas municipales, por otro lado, en la academia tampoco se han ejecutado proyectos de investigación y desarrollo (I+D) para mejorar las prestaciones de HGMS. En consecuencia, realizar una revisión bibliográfica exhaustiva alrededor de esta temática es necesario, las conclusiones, discusiones y trabajos a futuro permitirán orientar nuevos proyectos de investigación, desarrollo e innovación (I+D+I) así como proyectos sociales que permitan beneficiar e involucrar a varios actores de nuestro país.

OBJETIVOS

Objetivo general

Investigar que la remoción de metales pesados por separación magnética de alto gradiente reduce la contaminación en el agua.

Objetivos específicos

Conocer qué metales pesados producen la contaminación en el agua.

Identificar materiales magnéticos que optimicen la separación de metales pesados por separación magnética de alto gradiente

Determinar la eficiencia del método de separación magnética de alto gradiente para la remoción de metales pesados en el agua.

CAPÍTULO I

1. MARCO TEÓRICO REFERENCIAL

1.1. Magnetismo

El fenómeno natural de atracción y repulsión entre materiales es conocido como magnetismo y es tratado como una parte de la física que estudia la electricidad, el magnetismo y la interrelación entre estos. Las interacciones magnéticas que ocurren entre corrientes eléctricas y los materiales magnéticos es llamado campo magnético, es cual es representado matemáticamente como el espacio en donde se manifiestan las fuerzas de tipo magnético, el magnetismo se manifiesta cuando los campos magnéticos interactúan con los materiales.

1.2. Campo Magnético

La explicación matemática de cómo un fenómeno magnético y su causa interactúan en el espacio es descrita por el campo magnético, es decir que el campo magnético es una idea que se emplea para describir la interacción de una fuerza magnética en el espacio alrededor y dentro de cosas o materiales con propiedades magnéticas. Al tratarse de un campo vectorial, es descrito por una especie de mapa que traza un conjunto de puntos con la magnitud y la dirección que le corresponde a cada uno. Los campos magnéticos se manifiestan como resultado de; i) la influencia de cargas eléctricas en movimiento, ii) materiales magnéticos, iii) partículas fundamentales asociadas con el espín (su propiedad cuántica elemental) o iv) campos eléctricos variantes en el tiempo.

La terminología “Campo Magnético” es empleada para describir dos campos distintos que se relacionan estrechamente por el tipo de medio o material en el que el magnetismo se manifiesta, la intensidad de campo magnético \vec{H} y la densidad de flujo magnético \vec{B} , la capacidad de magnetizar algo es descrita por \vec{H} , por lo que es el campo “real”, su unidad es el amperio por metro [A/m], mientras que el campo \vec{B} es un campo “ficticio” que describe la cantidad de líneas que atraviesan una determinada área, su unidad es el tesla [T] cuya unidad equivalente es el Weber por metro cuadrado [Wb/m^2]. En el vacío, \vec{H} y \vec{B} resultan ser la misma magnitud, sin tomar en cuenta las unidades.

1.3. Dipolo Magnético

Básicamente se trata de un elemento que produce un campo magnético. En la experiencia cotidiana percibimos que las corrientes eléctricas y los imanes son los únicos que producen

campos magnéticos, sin embargo, las partículas elementales, también tienen la capacidad de producir campos magnéticos. En consecuencia, un dipolo magnético se define como cualquier cosa puntual que tiene la facultad de generar un campo magnético. Por ejemplo, una espira conductora con corriente eléctrica, un imán, una molécula, un planeta o incluso partículas subatómicas como un electrón resultan ser un dipolo magnético.

La palabra dipolo hace referencia a dos polos, lo que llevaría a pensar que un campo magnético es creado por “algo” que posee dos polos, de forma análoga a un campo eléctrico que es creado por dos cargas eléctricas, dos polos de signo opuesto, lo cierto es que no existen los monopolos magnéticos, por lo que el dipolo magnético resulta ser solo una aproximación matemática para entender cómo se crean los campos magnéticos, esta aproximación define al dipolo magnético como una fuente de campo cuya área tiende a cero mientras se mantiene constante el momento magnético, dicho de otro modo, es una aproximación que se hace a un campo magnético el cual es generado por un circuito cerrado cuando la distancia desde el campo al circuito es mucho mayor a las dimensiones del mismo mientras el momento magnético es constante.

1.4. Momento Dipolar Magnético

Llamado también momento magnético, es una magnitud que explica la relación entre un dipolo magnético y un campo magnético externo arbitrario (no se trata del campo magnético generado por el mismo dipolo). Resulta que, si un dipolo magnético se encuentra dentro del campo magnético creado por una fuente externa, va a presentarse una tendencia del dipolo a girar en la dirección del campo externo, por esta razón se dice que el campo externo tiene capacidad de ejercer una fuerza, de tipo magnética, sobre un dipolo magnético. Se define matemáticamente al momento magnético como una cantidad vectorial que mide la fuerza magnética y la orientación de un dipolo magnético, en el estudio de electroimanes el momento magnético simbolizado con \vec{u} se define como el producto entre la corriente eléctrica I y la superficie A que abarca la espira, multiplicadas por el vector unitario \hat{n} perpendicular a dicha superficie;

$$\vec{u} = \hat{n}IA \quad (1)$$

Es conveniente tener en cuenta que al mismo tiempo un imán genera su propio campo magnético y reacciona a otros campos magnéticos externos, el campo magnético de un imán en cualquier punto es proporcional al valor de su momento magnético. Cuando un campo magnético externo creado por otra fuente “alcanza” un imán o una espira de corriente, va a ejercer sobre este una fuerza propensa a orientar su momento magnético de forma paralela al campo externo, esta fuerza es proporcional al momento magnético y al campo externo. El sentido del vector momento

magnético se determina por la regla de la mano derecha. La unidad del momento magnético es $[A \cdot m^2]$

El origen de los momentos magnéticos responsables de la magnetización pueden ser corrientes eléctricas resultantes del movimiento de los electrones, o por el giro de los electrones alrededor de los átomos o los núcleos.

1.5. Fuerza Magnética

Una fuerza de este tipo surge por la interacción entre campos magnéticos, como cualquier otra fuerza es medida en Newton $[N]$

1.6. Torque Magnético

La medida de la fuerza magnética que puede hacer que un objeto gire alrededor de un eje se llama torque magnético o también par de torsión. El torque en una espira de corriente se define matemáticamente como el producto cruz entre el momento magnético de la espira y el campo magnético externo que pasa por la superficie que conforma la espira.

$$\vec{\tau} = \vec{u} \times \vec{B} \quad (2)$$

1.7. Magnetización

La magnetización es una cantidad vectorial que describe cómo responde un material o medio a un campo magnético externo aplicado, así como la forma en que el material o medio cambia el campo magnético, y puede usarse para calcular las fuerzas que resultan de esas interacciones. Matemáticamente se expresa como una densidad o distribución de momentos dipolares magnéticos permanentes o inducidos en un material o medio magnético, donde u es el momento magnético y V es el volumen del medio o material, su unidad es amperios por metro $[A/m]$.

$$\vec{M} = \frac{d\vec{u}}{dV} \quad (3)$$

La magnetización no es necesariamente uniforme dentro del medio o material, pero puede variar entre diferentes puntos y el movimiento dentro de este campo se describe por la dirección y puede ser axial o diamétrico.

\vec{M} tiene en cuenta el hecho de que los momentos magnéticos intrínsecos (espines) de los electrones ligados se alinean en promedio en una cierta dirección, a menudo la del campo aplicado

externamente, y también realizan movimientos de precesión promedio alrededor de esta dirección en sentido horario o anti horario. Dependiendo del signo de su carga eléctrica. Se trata de movimientos de rotación en el mismo sentido y con la misma dirección perpendicular, que aportan una contribución a la corriente eléctrica macroscópica solo en la superficie del material: en su interior, los movimientos de las cargas colocadas una al lado de la otra se compensa entre sí como todos rotan en el mismo sentido y de esto se deriva el hecho de que las corrientes de las cargas ligadas a los átomos pueden expresarse como el rotor de magnetización.

1.8. Susceptibilidad magnética

Simbolizada por χ_m , es la cuantificación del grado de magnetización de un material al que se le aplica un campo magnético externo. Matemáticamente se define como la relación entre la magnetización \vec{M} y la intensidad de campo magnético \vec{H} , por lo que la susceptibilidad magnética es una constante de proporcionalidad adimensional que relaciona \vec{M} y \vec{H} como se expresa en la ecuación:

$$\vec{M} = \chi_m \vec{H} \quad (4)$$

La permeabilidad magnética μ_0 y χ_m se relacionan por la siguiente ecuación:

$$\mu = \mu_0(1 + \chi_m) \quad (5)$$

Por otro lado, la susceptibilidad magnética específica de una determinada masa χ_p mide la concentración magnética que existe en dicha masa.

1.9. Gradiente

El gradiente es un operador vectorial que se aplica sólo sobre campos escalares y se obtiene como resultado un campo vectorial cuya dirección indica hacia donde el campo escalar en análisis varía más rápidamente, y, cuyo módulo indica la tasa de cambio en dicha dirección.

1.10. Potencial escalar magnético

De manera análoga como el potencial eléctrico es empleado para determinar el campo eléctrico en electrostática, el potencial escalar magnético ψ es utilizado para determinar el campo magnético H cuando no hay corrientes libres. El potencial es válido en cualquier región con una densidad de corriente igual a cero, por lo tanto, si las corrientes se limitan a cables o superficies, las soluciones por partes se pueden unir para proporcionar una descripción del campo magnético

en todos los puntos del espacio. Una aplicación importante de ψ es para determinar el campo magnético debido a imanes permanentes cuando se conoce su magnetización.

1.11. Energía Potencial Magnética

La energía potencial es la energía mecánica asociada a la localización de un cuerpo dentro de un campo de fuerza o a la existencia de un campo de fuerza en el interior de un cuerpo. La energía de un objeto bajo la acción de fuerzas magnéticas de forma que esa energía depende de la posición del tiempo se trata de energía potencial magnética.

1.12. Materiales Magnéticos

Los materiales magnéticos son materiales con propiedades magnéticas que son empleados en un sinnúmero de dispositivos y equipos en diversas áreas de la ciencia, la industria y la tecnología, entre estos tenemos auriculares, computadores, transformadores, motores eléctricos, generadores eléctricos, aceleradores de partículas, materiales inteligentes y demás aplicaciones donde se requiere de campos magnéticos.

Según el comportamiento de los materiales magnéticos, estos se clasifican principalmente en materiales ferromagnéticos, diamagnéticos y paramagnéticos.

1.13. Materiales Ferromagnéticos

Son materiales que tienen capacidad de generar campos magnéticos de forma temporal e incluso permanentemente, esto ocurre cuando un dipolo magnético (producto de electrones no apareados en sus átomos) se alinea a un campo magnético externo cuando se encuentra en presencia de este, produciéndose así la magnetización del material. El ferromagnetismo sucede cuando un campo magnético externo ordena temporal o permanentemente, en su misma dirección y sentido, todos los momentos magnéticos del material aun cuando el campo externo deja de interactuar con él. Entre estos materiales tenemos al hierro, níquel y cobalto.

Este tipo de materiales poseen una susceptibilidad magnética que tiende a infinito $\chi_m \rightarrow \infty$

1.14. Materiales Paramagnéticos

Se trata de materiales que tienen capacidad de generar campos magnéticos sólo de forma temporal, es decir, solamente mientras un campo magnético externo interactúa con él, al retirar el campo magnético, la entropía rompe el alineamiento de los dipolos. Dicho de otro modo, la magnetización del material desaparece cuando se retira el campo magnético externo porque los

dipolos retornan a su estado original debido a que no hay ningún campo externo que alinee los dipolos del material, los materiales paramagnéticos tienen un vector magnetización débil que desaparece cuando el campo magnético externo es removido. El magnesio y el titanio son ejemplo de este tipo de materiales.

Esta clase de materiales presentan una susceptibilidad magnética mayor a cero $\chi_m > 0$

1.15. Materiales Diamagnéticos

Los campos magnéticos externos que interactúan con este tipo de materiales alinean los dipolos magnéticos en sentido opuesto a la dirección del campo externo aplicado, lo que causa la repulsión del material, esta es la razón por la cual los materiales diamagnéticos pueden experimentar un fenómeno conocido como levitación magnética.

La susceptibilidad magnética de este tipo de materiales es menor a cero $\chi_m < 0$

1.16. Separación magnética

Es un método que permite la separación de materiales con propiedades magnéticas que están suspendidos en otro tipo de materiales, este tipo de separación se logra haciendo uso de fuerzas magnéticas. La separación de materiales magnéticos y materiales magnéticos débiles se ha empleado por más de 100 años, sin embargo, este método se limita a separar partículas magnéticas con un diámetro aproximadamente mayor a 50-70 micrómetros.

1.17. Separación magnética de alto gradiente

El método de separación magnética de alto gradiente, HGMS por sus siglas en inglés, hace posible una eficiente separación magnética de partículas magnéticas que la separación magnética convencional resulta ser limitada e ineficaz, mediante el uso de fuertes campos magnéticos y de altos gradientes de campo magnético. Este método de separación magnética es el adecuado para ser usado en aplicaciones donde las partículas o materiales a separar son muy débiles desde la perspectiva magnética y cuyas dimensiones están en el orden micrométrico y submicrométrico (Chang, Victor Luis ; Boisaitis 1982)

La remoción de partículas magnéticas o paramagnéticas ha sido aplicada en diferentes contextos donde se necesita separar ciertas partículas (que pueden reaccionar a campos magnéticos) que están inmersas en otro tipo de sustancias o materiales sólidos o líquidos. Por esta razón, la separación magnética de alto gradiente encuentra aplicaciones en diversas áreas como la descontaminación de aguas por metales pesados, la industria minera y el área biotecnológica, en donde se puede utilizar para la purificación de proteínas, células y ADN (Ge et al. 2017), además

del potencial para separar glóbulos rojos de la sangre (Chang, Victor Luis; Boisaitis 1982). Adicionalmente, es una tecnología que resulta amigable con el medio ambiente, accesible desde el punto de vista económico y con excelente eficiencia y capacidad de retención de partículas. En el proceso de separación magnética, las partículas débilmente magnéticas (paramagnéticas) y las partículas magnéticas son retenidas mediante la acción de una fuerza de atracción magnética \vec{F}_m que se describe por la ecuación:

$$\vec{F}_m = \frac{1}{2} \mu_0 V (\chi_p - \chi_m) \vec{H} \nabla \vec{H} \quad (6)$$

Donde μ_0 es la permeabilidad magnética del vacío, V es el volumen de la partícula individual, χ_m y χ_p son la susceptibilidad magnética y la susceptibilidad magnética específica de la partícula y $\nabla \vec{H}$ es el gradiente de la intensidad de campo \vec{H} . Para lograr el proceso de remoción, separación o filtración de partículas magnéticas o paramagnéticas se utiliza una malla (matriz) ferromagnética, por la cual atraviesa el fluido que contiene las partículas a separar, las cuales son atraídas por el campo magnético externo generado por electroimanes colocados en las cercanías de dicha malla con la finalidad de crear en sus alrededores un campo magnético de alto gradiente (Oberteuffer 1973), gracias a este efecto las partículas a separar son magnetizadas, quedando atrapadas en la matriz.

Adicionalmente, se deben tomar en cuenta la fuerza de arrastre F_a y la fuerza gravitacional F_g , cuyas expresiones matemáticas se muestran a continuación:

$$\vec{F}_a = 6\pi\eta r_p (\vec{v}_f - \vec{v}_p) \quad (7)$$

Donde, η es la viscosidad del agua, r_p el radio de la partícula, V_f la velocidad de flujo del agua y V_p la velocidad de la partícula.

$$\vec{F}_g = V_p (d_p - d_{agua}) \vec{g} \quad (8)$$

Respecto a la ecuación de la fuerza gravitacional, V_p es el volumen de la partícula, d_p es la densidad de la partícula, d_{agua} la densidad de agua y \vec{g} la aceleración de la gravedad. En la Figura 2-1 se muestra una ilustración general del proceso HGMS.

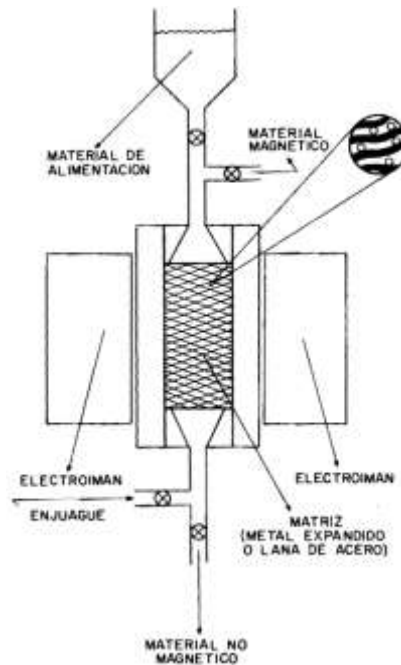


Figura 2-1. Ilustración del proceso de separación magnética de alto gradiente

Fuente: Praveen Anand, J. E. Etzel and F. J. Friedlaender (1985).

Debido a que las partículas a separar presentan diversos niveles de magnetización, partículas con alto valor de susceptibilidad magnética (partículas ferromagnéticas y paramagnéticas) quedan atrapadas en la malla mientras que las partículas con bajo valor de susceptibilidad magnética (partículas débilmente magnéticas) o que por su microscópico tamaño presentan un bajo valor de susceptibilidad, no pueden ser atrapadas por la malla, por lo que son arrastradas junto al fluido.

En (Chang, Victor Luis ; Boisaitis 1982), los autores manifiestan que la fuerza magnética \vec{F}_m puede ser determinada analíticamente mediante una simplificación de la forma geométrica de la malla, cuyos elementos que pueden ser hilos o fibras de metal, se representan de una forma simple como cilindros con sección circular, los cuales son dispuestos perpendicularmente a la dirección del campo magnético externo generado por los electroimanes y a la dirección de flujo de las partículas a separar, tal como se puede observar en la Figura 2-2.

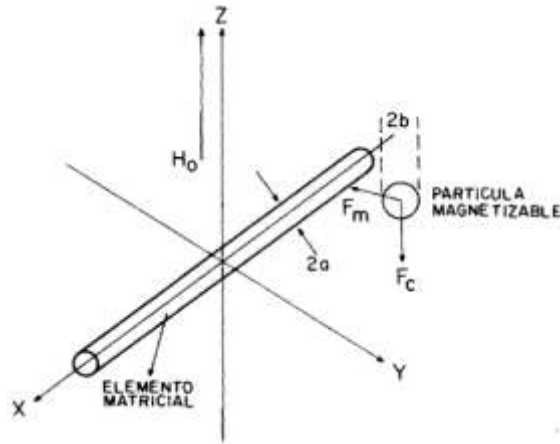


Figura 2-2. Ilustración simplificada de la geometría del elemento (hilo de metal) de la malla metálica, por la que fluye la partícula magnetizable a separar, con forma esférica.

Fuente: John A. Oberteuffer (1973).

Esta simplificación, permite aproximar los valores del potencial escalar magnético ψ dentro y fuera de un hilo cilíndrico, ψ_1 y ψ_2 respectivamente, mediante las siguientes expresiones:

$$\psi_1 = r \cos \theta \left(\frac{M_s}{2\mu_0} - H_0 \right) \quad (9)$$

$$\psi_2 = r \cos \theta \left(\frac{a^2 M_s}{2\mu_0 r^2} - H_0 \right) \quad (10)$$

donde M_s es el nivel de magnetización del elemento matricial, es decir del hilo cilíndrico cuyo radio es a , θ es el ángulo entre la partícula, el hilo y la dirección del campo magnético, μ_0 la permeabilidad del vacío y H_0 la magnitud de la intensidad del campo magnético externo.

En la ecuación (1), el campo magnético \vec{H} que interactúa con hilo cilíndrico se determina mediante el gradiente del potencial escalar magnético:

$$\vec{H} = \nabla \psi \quad (11)$$

La separación magnética ha sido ampliamente utilizada para separar materiales con propiedades magnéticas en líquidos y fluidos, la eficiencia del proceso de separación depende de la intensidad del campo magnético para atraer y separar las partículas del fluido.

En la fórmula de \vec{F}_m , la susceptibilidad magnética χ_m , el volumen V de las partículas que atraviesan la malla, la intensidad del campo magnético y su gradiente son proporcionales a la fuerza \vec{F}_m . Si cualquiera de estos valores es alto, también la fuerza magnética que atrapa las partículas y las separa del fluido es alta, por lo tanto, esto tiene una relación directa con la eficiencia del separador. Hay que considerar que χ_m y V dependen de las diferentes propiedades

del material a separar, el fluido llevará diferentes materiales con varios tamaños, volúmenes y características magnéticas. En consecuencia, para aumentar la fuerza \vec{F}_m y así mejorar la eficiencia, lo lógico es aumentar la intensidad del campo magnético y alcanzar un alto gradiente de campo magnético.

En la separación magnética de alto gradiente para lograr una alta eficiencia de separación de partículas magnéticas los investigadores han sumado esfuerzos en la optimización de la malla magnética porque esto se relaciona directamente con la capacidad y eficiencia del proceso de separación además de su costo [HGMS]. Para la optimización de la malla se considera el tipo de materiales a utilizar además de su forma, tamaño, disposición, colocación de los elementos y la geometría de la malla (Ge et al. 2017) la cantidad de estudios considerables relacionados con la optimización de las características mencionadas han permitido determinar mejores distribuciones de campo magnético alrededor de los elementos de la matriz y mejores rendimientos en la captura y separación. Esto se diferencia notablemente de los métodos usados en el pasado para incrementar la intensidad de los campos magnéticos a través del uso de bobinas más grandes y circuitos magnéticos mejorados (Kheshti, Hassanajili y Ghajar 2019) que derivaba en el incremento del costo y mayor consumo de energía. Actualmente, para alcanzar un alto gradiente de campo las mallas comúnmente utilizan placas ranuradas, lana de acero, varillas de acero, malla de alambre tejido, metal expandido y elementos puntiagudos.

1.18. Variables

Una separación magnética eficiente, desde el punto de vista técnico y económico, posibilita su aplicación en la descontaminación de aguas (independiente).

Una mejora de las técnicas de optimización de alto gradiente permite mejorar la eficiencia de la separación magnética (dependiente).

1.19. Hipótesis

¿En Ecuador sería factible solucionar la descontaminación de aguas por metales pesados mediante la aplicación de la Separación Magnética de Alto Gradiente?

CAPÍTULO II

2. MARCO METODOLÓGICO

2.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación propuesto en este trabajo es de revisión bibliográfica ya que puede ser aplicada a cualquier tema de investigación para determinar la relevancia e importancia de este y asegurar la originalidad de una investigación. Además, permite que otros investigadores consulten las fuentes bibliográficas citadas, pudiendo entender y quizá continuar el trabajo realizado.

2.2. Diseño de la investigación

Son varios los autores que el tema propuesto lo han investigado con metodologías experimentales el tema de la separación magnética de alto gradiente. Por su parte, Altuve y Rivas (1998) asegura que el diseño de una investigación, “... es una estrategia general que adopta el investigador como forma de abordar un problema determinado, que permite identificar los pasos que deben seguir para efectuar su estudio”. Para ello el presente trabajo se enmarca en una investigación de revisión bibliográfica la cual dará lugar a una óptima separación magnética de alto gradiente para la remoción de metales pesados.

2.3. Técnicas de investigación

2.3.1. Aplicaciones generales de la Separación Magnética de Alto Gradiente

La separación magnética de alto gradiente como se ha mencionado anteriormente hace posible la eficiente separación de partículas magnéticas muy débiles y de tamaño de micras por lo que sus aplicaciones son numerosas. En (Oberteuffer, 1973, pp.303-306) dice que la primera aplicación industrial de HGMS ha sido en la industria de la arcilla donde se utilizan dispositivos de HGMS para eliminar micro impurezas débilmente magnéticas, se menciona además que la aplicación para el control de la contaminación HGMS implica tanto el carbón desulfuración, descascarado y purificación de agua. En esta investigación, se ha demostrado que hasta el 60% de azufre y el 20% de la ceniza puede ser eliminado por HGMS de carbón antes de quemar. Dado que la mayoría de las impurezas en el agua son diamagnéticas, el tratamiento del agua por HGMS requiere una técnica de siembra magnética con óxido de hierro de tamaño micrométrico que puede adherirse químicamente a las impurezas y luego separarse magnéticamente.

Las técnicas de separación magnética tienen una variedad de aplicaciones en el beneficio de minerales, industria alimentaria, textil, plástica y cerámica. El primer intento de aplicar imanes

permanentes al apósito de minerales magnetita se remonta al siglo XVII y Fuller aplicó la primera patente en 1972 para la separación del mineral de hierro mediante un imán (Singh et al., 2013, p.75) El separador magnético presentado con altos valores de campo magnético, gradientes de campo altos y gran capacidad de flujo ha sido aplicado a problemas en el beneficio de minerales. El mayor esfuerzo se ha dedicado a los minerales de hierro de taconita (Kelland, 1973, p. 67). Los separadores más utilizados son los de tambor húmedo que producirá un producto de mineral de taconita magnética adecuado para el proceso de peletización.

En (Kelland, 1973) se concluye que la HGMS proporcionará un método económico de beneficio para vastos depósitos no utilizados de oxidados y semitaconitas y, posiblemente, para pilas de relaves previamente desechadas. El método es particularmente adaptable al tratamiento de pequeñas partículas en el rango de malla -500 con susceptibilidades mucho más pequeñas que las requeridas para técnicas de separación convencionales.

2.3.2. Remoción de Metales Pesados Empleando la Separación Magnética de Alto Gradiente

Los separadores magnéticos de alto gradiente (HGMS) han demostrado ser un medio eficaz para reducir significativamente sólidos, como metales pesados, suspendidos en efluentes de agua contaminadas por los mismos. La propiedad básica que determina la efectividad de separaciones magnéticas es la magnitud de la fuerza magnética a la que las partículas sólidas de magnetización están sujetas a medida que se mueven a través de un campo no homogéneo de intensidad magnética. (Petraakis & Ahner, 1978).

Muchos procesos industriales dan lugar a efluentes líquidos que contiene metales pesados. Especialmente, las aguas residuales que surgen en las industrias de la curtiduría y la galvanoplastia contienen grandes cantidades de cromo, níquel, cobre y zinc por lo que en (Franz & Franzreb, 1998) nos afirma que el método más factible para separar las partículas de metales pesados del líquido es la filtración magnética de alto gradiente. Un filtro magnético consta de mallas de alambre, que se apilan en una carcasa de filtro hecha de un material no magnético. Los cables están magnetizados en un campo magnético y las partículas magnéticas suspendidas en agua se adhieren completamente a los cables.

Ya en 1973, deLatour propuso el uso de filtros magnéticos de alto gradiente para la remoción de materia en suspensión y fosfato en el tratamiento del agua. Para unir la parte de impurezas disueltas o coloidales a partículas que pueden ser filtradas magnéticamente, sales de hierro y aluminio, respectivamente, y se añaden al agua aproximadamente 1 g/l de magnetita. Poco después, deLatour extendió este concepto a la remoción de iones de metales pesados de efluentes líquidos. Harding y Baxter usaron hidróxido de hierro como eliminador combinado con un filtro magnético de alto gradiente, logrando así la eliminación de la mayoría de los metales pesados y radionúclidos de las soluciones de prueba utilizada para modelar efluentes líquidos de centrales

nucleares. Si bien los estudios mencionados anteriormente se centraron más en la aplicación de separadores magnéticos de alto gradiente en casos específicos, Anand et al en 1985 examinó sistemáticamente la influencia de varios parámetros, como la intensidad del campo magnético aplicado o la tasa de flujo dentro del filtro, sobre la carga de filtro alcanzable. Las soluciones de prueba que emplearon fueron aguas modelo que contenían iones de metales pesados y hierro (III). Después de la adición de 667 mg/l de magnetita, y después de una precipitación adecuada, el pH se ha colocado, se desarrollaron partículas magnéticamente extraíbles en estas aguas modelo. Terashima usó un enfoque similar para eliminar Cd, Pb, Zn o Cr de los efluentes líquidos. (Franz & Franzreb, 1998).

Los separadores magnéticos de alto gradiente han demostrado ser un medio eficaz para reducir significativamente tanto el aceite como los sólidos suspendidos en el agua. Para obtener una óptima remoción de sólidos débilmente magnéticos se debe tomar en cuenta variables importantes. Estas variables pertinentes son un campo magnético fuerte, naturaleza de la matriz, tiempo de residencia del fluido dentro de la región activa del campo no homogéneo, y el tamaño de partícula de las semillas de magnetitas se encuentran entre las variables examinadas. (Petrakis & Ahner, 1978).

En (Anand et al., 1985) afirma que la separación magnética de alto gradiente es ventajosa por dos razones: Se requieren altas temperaturas y caudales relativamente altos. Estas dos condiciones se cumplen con bastante facilidad con una separación magnéticos de alto gradiente en comparación a un filtro de gravedad. Además, dice haber demostrado que los iones metálicos se pueden eliminar de líquidos por medio de partículas de hidróxido y que estas partículas se pueden recolectar por medio de la separación magnética de alto gradiente, donde se sugiere el uso de Fe304 para hacer la recolección más eficiente. Fe304 hace que las partículas sean altamente magnéticas, lo que permite mayores caudales en campos magnéticos bajos: las partículas de hidróxido férrico capturadas en los separadores magnéticos de alto gradiente se pueden regenerar agregando partículas de ácido sulfúrico para las partículas dentro de la columna o removiendo la partícula y agregando ácido sulfúrico en un tanque separado.

Se presentaron datos experimentales sobre la remoción efectiva de metales pesados como cadmio, cobre, níquel y zinc por absorción sobre partículas de hidróxido férrico. Se utiliza sulfato férrico como fuente de iones férricos junto con una pequeña cantidad de magnetita que se agrega para hacer uso de la separación magnética de alto gradiente. (Anand et al., 1985). En los años 2000 se comenzó a dejar ya de lado los métodos antiguos de remoción de metales pesados ya que el método de la separación magnética de alto gradiente era visto como el mejor de todos para el tratamiento de aguas contaminadas por metales pesados.

Las corrientes acuosas que contienen metales pesados se encuentran con frecuencia en fluentes y fuentes industriales de Cu, Pb, Zn y Cd son muy comunes en las instalaciones de galvanoplastia, plantas de refinación electrolítica y aguas ácidas de mina, entre otras. Por muchos años, el enfoque

convencional para la eliminación de metales pesados consistía en sedimentación por precipitación del hidróxido metálico, seguida de espesamiento o filtración del lodo. Este método adolece de varios inconvenientes, como precipitación incompleta, inestabilidad química de los precipitados y formación de grandes volúmenes de lodos que pueden ser difícil de filtrar. Estas desventajas pueden superarse mediante el uso de intercambio iónico, especialmente si las concentraciones de los metales son bajas. Sin embargo, los sólidos en suspensión que a menudo se encuentran en el efluente de aguas residuales puede ser un problema y por esta razón, el uso de resinas magnéticas en lechos fluidizados puede ser beneficiosas, como clarificación previa de las aguas residuales no es necesario y se pueden tolerar altos niveles de materia en suspensión. Otro enfoque para la remoción de metales pesados se basa en el uso de zeolitas. (Feng et al., 2000, pp.40-50).

La mayoría de las zeolitas son ricas en Na^+ , K^+ y Ca^{2+} , que generalmente son intercambiables con iones metálicos. Aunque las zeolitas se conocen desde hace siglos, su valor como material adsorbente solo se realizó hace unas 4 décadas. Esta realización, así como el descubrimiento de abundantes depósitos de zeolitas sedimentarias ha dado un nuevo impulso al uso de zeolitas en el tratamiento de contaminantes residuales reciclados y otros efluentes industriales. Las capacidades de sorción de las zeolitas dependen de sus tamaños de partícula. La capacidad de intercambio del catión disminuye rápidamente cuando el tamaño de la zeolita aumenta por encima de 1mm. Por otro lado, las zeolitas finas utilizadas en los procesos de sorción de iones metálicos son muy difíciles de separarlos de las soluciones tratadas. Aunque la flotación se puede utilizar para eliminar los iones cargados de las soluciones, los colectores de flotación necesarios pueden resultar en contaminación. Se puede utilizar la separación magnética de las zeolitas cargadas para evitar este problema.

Los métodos de portadores magnéticos se han utilizado ampliamente en procesos como la separación de células biológicas, tratamiento de aguas residuales, desulfuración de carbón y procesamiento de minerales. La esencia de este método es incorporar una fase magnética discreta en las partículas objetivo débil o no magnético para aumentar su susceptibilidad magnética y para separarlas de estos aglomerados mediante separación magnética. Con este enfoque, Anand et al podría eliminar prácticamente todo el 99,9%. De los metales pesados, como cadmio, cobre, níquel y zinc por adsorción sobre flóculos de hidróxido férrico en un rango de pH de 10,5 a 11,0. La fase magnética se obtuvo a partir del sulfato férrico, así como una pequeña cantidad de magnetita que se añadió para facilitar la separación magnética de alto gradiente. Krumm describió otra aplicación de CMS de separación magnética de portadores para la purificación de aguas residuales que contienen fosfato, metales, metales pesados y partículas de pigmento con magnetita como portador magnético. La magnetita se ha utilizado como portador en la precipitación, esquemas de adsorción-coagulación para el tratamiento de aguas residuales que contienen PO_4 , Cu_2 y Hg . Chen informó sobre el uso de partículas portadoras de magnetita recubierto con ferrihidrita para la eliminación de Cr_6 y Zn de los efluentes del acabado de metales. Adsorbiendo metales

contaminantes en zeolitas y mejorando la susceptibilidad magnética de estos sistemas, los metales se pueden eliminar de los efluentes de aguas residuales que contienen altas concentraciones de sólidos en suspensión, sin tener que clarificar previamente el efluente o tener para hacer frente a los problemas de contaminación que plantean los reactivos de flotación. En este trabajo, la eliminación de iones de metales pesados en soluciones diluidas mediante el uso de zeolita mejorada magnéticamente se discuten las partículas y se muestra que pequeñas dosis de finos de zeolita y magnetita puede conducir a la eliminación eficiente de metales pesados de efluentes acuosos. (Feng et al., 2000, pp.40-50).

Con el transcurso de los años esta técnica de separación magnética de alto gradiente ha ido mejorando notablemente ya que varias investigaciones presentan cada vez una mayor eficacia en los resultados al remover metales pesados o sólidos débilmente magnéticos con diámetros micrómetros como por ejemplo en (Tsouris et al., 2006, pp.60-66) dice que la filtración magnética ofrece una ventaja sobre la filtración convencional en que puede lograr una separación reversible y selectiva. Una suspensión acuosa de partículas de óxido férrico (Fe_2O_3) paramagnéticas coloidales se trataron con dodecilsulfato de sodio (SDS) y se administraron a través de una columna que contenía una matriz de filtro de lana de acero inoxidable, que se montó entre los polos de un electroimán. El RE de las partículas tratadas con surfactante se midió analizando las muestras de efluente para la concentración de Fe_2O_3 . El efecto de la inducción magnética aplicada, la velocidad del fluido y el radio de los alambres de acero inoxidable en el RE fue probado y comparado para partículas tratadas con surfactante y sin tratar. Estos tres factores tuvieron un efecto marcado en el RE de los tratados con partículas surfactantes. Un aumento en la inducción magnética aplicada de 0,2 a 0,5 T aumentó el RE de 79,9 a 93,4%, una disminución en el radio del alambre de 49 a 15 μm aumentaron el RE de 60,2 a 93,4%, y una disminución en la velocidad del fluido de 0,5 a 0,1 cm / s aumentó el RE de 69,5 a 95,3%. En ausencia de un campo magnético, el RE fue del 10,8%. Además, afirma que el tratamiento con SDS puede potencialmente mejorar otros aspectos del rendimiento de HGMS. Tratamiento SDS permite una mejor recuperación de las partículas del filtro cuando el campo magnético está desactivado, lo que hace que la regeneración del filtro sea mucho más fácil. El tratamiento SDS también permite la separación selectiva de partículas no magnéticas de partículas magnéticas las partículas no magnético estabilizadas escaparían de la captura en un filtro magnético, mientras que se retendrían partículas magnéticas estables. Por lo tanto, el tratamiento SDS tiene el potencial de preservar dos ventajas principales de HGMS: la reversibilidad y la selectividad de la fuerza magnética.

La separación magnética de alto gradiente (HGMS) es un método eficaz para eliminar materiales débilmente magnéticos. Las matrices y el campo magnéticos aplicado son componentes clave del sistema HGMS. Las matrices con alta permeabilidad deshomonogeneizan el campo magnético uniforme, induciendo un alto gradiente magnético. Las partículas paramagnéticas serán sometidas

a grandes fuerzas magnéticas y atraídas por matrices, quedando atrapadas allí. Cuando se elimina el campo magnético aplicado, las partículas magnéticas capturadas pueden desprenderse fácilmente enjuagando. En un campo magnético de gradiente, la fuerza que actúa sobre una partícula magnética puede ser dada por la ecuación. (Zeng, Xiong, 2003, pp.563-565) donde μ_0 es la permeabilidad al vacío, κ es la susceptibilidad de la partícula, V es el volumen de la partícula, H y ∇H son la intensidad del campo magnético y el gradiente de ubicación de la partícula, respectivamente. Si la fuerza magnética que actúa sobre una partícula domina a otras fuerzas en competencia (fuerza de gravedad, fuerza de arrastre del fluido y fuerza de difusión, etc.), la partícula se puede extraer del lodo. Debido a su alta eficiencia, ahorro de costos y características ecológicas, el HGMS se ha aplicado ampliamente en muchos campos científicos e industriales, como el procesamiento de minerales [(Li, et al, 2018, pp.1-16) (Li, et al, 2019, pp. 270-278), (Peng, et al, 2018, pp.177-185)], tratamiento de agua, (Miura, Tachibana, 2014) (Zeng, et al, 2018, pp.563-565), eliminación de residuos (Oka, et al, 2016) (Mishima, Terada, Akiyama, Nishijima, 2011, pp.2059-2062), y bioingeniería (Garcia et al 2015, pp.29-36).

Como la aplicación generalizada de HGMS en varios campos científicos e industriales, los principios básicos detrás de HGMS también atraen mucha atención de los investigadores científicos. Los principios teóricos de HGMS incluyen principalmente la captura de partículas magnéticas por matrices y la acumulación de partículas magnéticas en matrices. La captura de partículas magnéticas determina la eficiencia de captura de partículas, mientras que la acumulación de partículas magnéticas en las matrices determina el contorno de acumulación y la masa saturada del depósito de partículas. Los investigadores han desarrollado modelos de captura y acumulación de partículas de diferentes configuraciones de HGMS en diversas circunstancias. Generalmente, los modelos de captura de partículas se construyen con la segunda ley de Newton considerando las fuerzas dominantes que actúan sobre las partículas. Para la acumulación de partículas en matrices, El límite del contorno de acumulación se puede determinar mediante el lugar de la partícula donde la fuerza neta de la partícula es solo 0. Los modelos de captura y acumulación de partículas se pueden utilizar para estudiar el efecto de los parámetros de influencia en HGMS en estudios específicos, así como en el desarrollo de matrices magnéticas novedosas. En algunos estudios de HGMS, la adopción de estos modelos para estudiar algunos factores influyentes tiene ventajas únicas. Por ejemplo, el efecto de algunos factores en HGMS es leve y no puede reflejarse en resultados experimentales, o difícilmente se puede observar directamente en experimentos, estos factores pueden investigarse convenientemente con estos modelos teóricos, siempre que los modelos se construyan con precisión. Los modelos de captura y acumulación de partículas pueden proporcionar una comprensión muy intuitiva del proceso de HGMS y se han aplicado en muchos estudios relevantes (Lua, Nguyen, 2017, pp.85-99) (Yao, et al, 2018, pp.-163-169) (Zheng, Wang, Lu, 2017, pp.563-565). Para adoptar los modelos teóricos para estudiar el efecto de los parámetros de influencia, la validez de los modelos es sustancialmente importante.

La separación magnética de alto gradiente se ha aplicado en muchos campos científicos, los investigadores han propuesto una serie de modelos teóricos que se aplican a diferentes sistemas HGMS.

2.3.3. Remoción de Metales Pesados utilizando la Separación Magnética de Alto Gradiente Superconductora

La separación magnética de alto gradiente puede ser una de las formas prometedoras para una nueva técnica de depuración ambiental debido a que no produce contaminación como floculantes y tener la posibilidad de tratar una gran cantidad de aguas residuales en poco tiempo (Nishijima & Takeda, 2006, pp.1-4) pero para poder mejorar su efectividad en los últimos años se ha implementado el uso de superconductores que es un material que ha sido sometido a un proceso de disminución de temperatura (generalmente utilizando helio o nitrógeno líquido) de tal magnitud que sus propiedades eléctricas han sido modificadas para eliminar por completo la resistencia al paso de corriente por lo que así se tendría una separación magnética de alto gradiente mucho más efectiva en la remoción de metales pesados.

El sistema de la separación magnética de alto gradiente superconductor está compuesto por el imán superconductor del sistema es 3 T, 680mm de largo y 400 mm de diámetro interior NbTi solenoide. El sistema consiste principalmente de un tanque de mezcla (tanque de siembra magnético), un tanque de sedimentación, y un imán superconductor. Bandadas magnéticas flotantes compuestas de partículas de magnetita y polímeros orgánicos como pulpa y tinte que son capturados por fuerza magnética en la cámara del imán superconductor. Algunas bandadas magnéticas se precipitan en el tanque de sedimentación por la gravedad, lo que ayuda a reducir la cantidad de bandadas magnéticas pasando por la cámara del imán el cual se aplicó para purificación de aguas residuales de la fábrica de papel ya que el agua residual de la fábrica de papel reciclado contiene tinte, colorante, pegamento, agente de cohesión y otros sólidos en suspensión en alta concentración. Era necesario desarrollar la tecnología para separar o eliminar los componentes orgánicos a alta eficiencia. En el sistema desarrollado para reducir el valor de CDO, las partículas ferromagnéticas se adhieren al componente orgánico y eliminarlos con un campo magnético de alto gradiente generado por un imán superconductor. El sistema es de precio moderado, ahorro de espacio y con alta eficiencia. (Nishijima & Takeda, 2006, pp.1-4) y en este artículo se ha mostrado con resultados experimentales y ha llegado a la conclusión que el sistema de separación magnética de alto gradiente que podría tratar aguas residuales de 2000 t/día se ha desarrollado y se ha confirmado que muestra el rendimiento esperado. Ha sido exitoso operando durante 5 meses y se ha examinado un efecto de la variación estacional.

CAPÍTULO III

3. MARCO DE RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

Como resultado de una revisión bibliográfica sistemática y exhaustiva, hemos encontrado que, en el aumento de la eficiencia de separación de partículas magnéticamente débiles como metales pesados, el alcance de altos gradientes de campo, eficaces floculantes y grandes intensidades de campo son los parámetros clave.

Los metales pesados se pueden definir como elementos de elevado peso atómico, potencialmente tóxicos, que se emplean en procesos industriales, tales como el cadmio (Cd), el plomo (Pb), el mercurio (Hg) que, incluso en bajas concentraciones, pueden ser nocivos para las plantas y los animales. (Camacho Barreiro, Ariosa Roche, 1998a: p.45) Entre sus características más comunes cabe destacar: La persistencia, bioacumulación, biotransformación y elevada toxicidad. (Camacho Barreiro, Ariosa Roche, 1998b: p.45) De hecho, la exposición desmedida a metales pesados genera efectos adversos que han sido documentados durante años, entre los cuales se puede mencionar, por ejemplo, que la exposición excesiva al cadmio (Cd) provoca daño renal, y a nivel óseo ocasiona fracturas. (Järup, 2003, pp.167-182).

El cadmio (Cd^{+2}) es actualmente uno de los contaminantes ocupacionales y ambientales más importantes. Se asocia con efectos renales, neurológicos, esqueléticos y otros efectos tóxicos, incluida la toxicidad para la reproducción, la genotoxicidad y la carcinogenicidad. (Matović, et al, 2011, pp 65-76) (Fowler, 2009, pp 294-300) Se obtiene como subproducto del tratamiento metalúrgico del zinc y del plomo. Además de contaminar el medio ambiente desde su fundición y refinación, contamina también por sus múltiples aplicaciones industriales. (Alarcón, 1994) (Ramírez, Seminario, Silva, 1993).

El cadmio también puede llegar a los vegetales a través del uso de plaguicidas y a las aguas de riego contaminadas. En la carne se acumula mayoritariamente en el riñón, y en el pescado en el hígado. Uno de los episodios más importantes de intoxicación masiva por Cd fue la enfermedad de Ithai-Ithai que se produjo en Japón a finales de la segunda guerra mundial por consumo de arroz y aguas contaminadas. (Nogawa, Ishizaki, Kobayashi, 1979, pp.397-409).

El As es un metaloide, y por ello forma aleaciones, pero también enlaces covalentes con el carbono, hidrógeno y oxígeno. Forma compuestos trivalentes inorgánicos tales como (arsenito de Na), y orgánicos (arsfenamina) y pentavalentes inorgánicos (arseniato de Pb, ácido arsénico). En la naturaleza está ampliamente distribuido en una serie de minerales como compuestos de cobre, níquel y hierro, y sulfuro y óxido de arsénico. En el agua se suele encontrar en forma de arsenato o arsenito, ambas muy hidrosolubles. (WHO, 1982) (YIP, DART, 2001). Los compuestos del arsénico se han empleado como plaguicidas en la agricultura, en la industria de vidrio y cerámica, y como medicamentos. La combustión de carbón y la fundición de metales son las principales fuentes de

arsénico en el aire. (WHO, 1982) (YIP, DART, 2001).

El plomo (Pb) es ubicuo y uno de los primeros metales descubiertos. Entre sus propiedades destacan la alta maleabilidad, ductilidad, bajo punto de fusión y resistencia a la corrosión, y que posteriormente se han traducido en su uso generalizado en diferentes industrias como automóviles, pintura, cerámica, etc. (Kalia, Flora, 2005a: pp.1-21). Es considerado como una potente toxina ocupacional y sus manifestaciones toxicológicas son bien conocidas. La exposición humana al plomo se produce a través de diversas fuentes, tuberías que contienen plomo, reciclaje de baterías, procesos industriales como la fundición del plomo, etc. Además, la toxicidad del plomo es un peligro con el potencial de causar efectos irreversibles para la salud. (Kalia, Flora, 2005b: pp.1-21).

El mercurio es un metal pesado (número atómico 80; peso atómico 200,59; densidad 13,59 g/cm³; punto de fusión -39 ° C; punto de ebullición 359 ° C) con una toxicidad conocida (OMS 2007). Presenta tres estados de valencia y existe en varias formas: Mercurio elemental, que a temperatura ambiente se encuentra en su forma líquida, y vapor de mercurio cuando se calienta rápidamente por encima de la temperatura ambiente presentando una alta volatilidad (Hg⁰). Las sales inorgánicas de mercurio, forma mercuriosa (Hg⁺) y forma mercúrica (Hg⁺²). Mercurio orgánico, como el metilmercurio (CH₃Hg, MeHg), etilmercurio (C₂H₅Hg, EtHg) y fenilmercurio (C₆H₅Hg, PhHg). El comportamiento biológico y la importancia clínica de las diversas formas de mercurio varían según su estructura química. (Bernhoft, 2012).

Por otro lado, una vez que se ha alcanzado niveles tóxicos de algún metal pesado en el organismo humano, y que no es remediable la eliminación a través de la quelación natural. Haremos uso de la quelatoterapia, que consiste en el uso de ligandos como fármacos para tratar alteraciones relacionadas con la presencia de iones metálicos que surgen de enfermedades o intoxicaciones, que a través de la formación de complejos (ligando- ión metálico) denominados quelatos, facilitamos la excreción de éstos en el individuo afectado. Además, nos debemos percatar donde actúa el compuesto tóxico y su tipo de enlace. Así como verificar mediante una serie de ensayos que realmente genera el efecto deseado en presencia del elemento tóxico en altas cantidades, y comprobar en su evaluación clínica la viabilidad de su aplicación y efectividad in vivo. (Baran, 1995).

A continuación, se analizan los superconductores, un superconductor no solo es capaz de transportar corrientes eléctricas sin resistencia, sino que también puede apantallar campos magnéticos, fenómeno que se conoce como efecto Meissner. Todos los superconductores pueden apantallar completamente el campo magnético, hasta un cierto valor llamado campo crítico (BC). Algunos pasan al estado normal con valores muy bajos del campo, son los superconductores tipo I. En otros, llamados del tipo II, el campo magnético, a partir de un cierto campo crítico inferior (BC₁), penetra en su interior a través de delgados tubos en estado normal que contienen un flujo magnético cuantificado mientras que el resto sigue siendo superconductor y se mantiene como tal

hasta alcanzar un campo crítico superior (B_{c2}), que puede ser millones de veces superior al campo magnético terrestre.

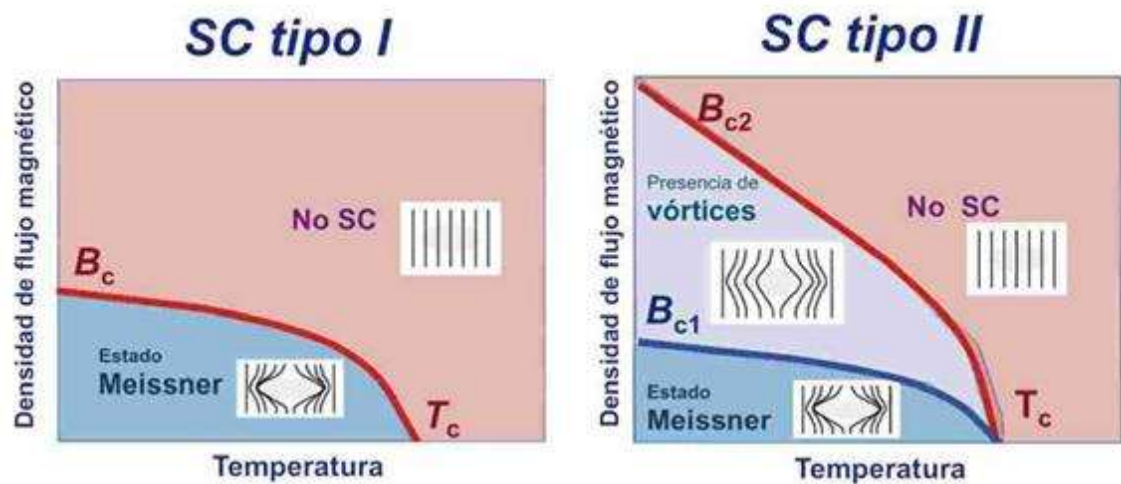


Figura 3-1: Tipos de superconductores

Fuente: Shigehiro Nishijima, Shin-ichi Takeda (2006).

En principio la superconductividad puede considerarse como una transición de fase que se produce bien por aumento de la temperatura, por variación del campo magnético aplicado hasta un valor determinado, o por el paso de una densidad de corriente mayor de un determinado valor a causa de los cuales el superconductor pasa de nuevo a estado normal en el que va a conducir de nuevo con un cierto valor de resistencia. (Pérez, 2012, pp.18-26).

El estado superconductor no solo se caracteriza por una resistencia nula, sino también por la respuesta de a los campos magnéticos que se le aplican. El campo magnético aplicado puede tener la suficiente intensidad para alcanzar la transición de fase y penetrar en el material, o bien que el superconductor se proteja del campo magnético aplicado y aparezcan corrientes superconductoras internas que apantallen el campo externo y le impidan penetrar en el material.

Por lo anterior decir que un material superconductor no solamente no presenta resistencia al paso de corriente, sino que también tiene otra propiedad importante que es su capacidad para apantallar un campo magnético. Si enfriamos el superconductor por debajo de su temperatura crítica y lo colocamos en presencia de un campo magnético, éste crea corrientes de apantallamiento capaces de generar un campo magnético opuesto al aplicado.

Esto ocurre hasta que el campo magnético alcanza un valor, llamado campo crítico, momento en el que el superconductor deja de apantallar el campo magnético y el material transita a su estado normal. En estas condiciones de temperatura no solamente son capaces de transportar energía eléctrica sin ningún tipo de pérdidas, sino que además poseen la propiedad de rechazar las líneas de un campo magnético aplicado. Se denomina “Efecto Meissner” a esta capacidad de los superconductores de rechazar un campo magnético que intente penetrar en su interior; de manera

que, si acercamos un imán a un superconductor, se genera una fuerza magnética de repulsión la cual es capaz de contrarrestar el peso del imán produciendo así la sobreelevación (levitación) del mismo.

Hoy día el uso más extendido de ese fenómeno se da en los trenes de levitación magnética. El hecho de que el superconductor pueda apantallar totalmente el campo magnético de su interior se conoce como superconductividad tipo I. Lamentablemente el campo crítico de estos materiales es tan pequeño que no se pueden desarrollar aplicaciones tecnológicas con ellos. Los de “Tipo 1” y como se ha dicho son aquellos que no permiten en absoluto que penetre el campo magnético externo. Algunos elementos metálicos como el plomo, estaño, mercurio y el aluminio pertenecen a este grupo. Son conocidos como “perfectos”. Al superar la temperatura crítica que es muy baja (no superior a los 7 Kelvins), se produce una ruptura brusca del estado superconductor al contrario que los del tipo II que tienen dos temperaturas críticas T_{c1} y T_{c2} entre las cuales se halla mezclado el estado superconductor y el estado normal. (Pérez, 2012, pp18-26).

Mediante el uso de electroimanes con superconductores para la generación de extraordinarios niveles de campo magnético, partículas ultrafinas pueden ser magnéticamente separadas con eficiencia, sin embargo, esta clase de materiales requieren de condiciones de ingeniería más complejas e involucran mayor costo respecto a los materiales convencionales, aunque actualmente los investigadores de materiales superconductores están logrando producirlos a temperatura ambiente gracias al fuerte empuje motivado por el emergente campo de la computación cuántica, lo que abre la posibilidad de producción de materiales superconductores a costos asequibles en un futuro cercano.

La determinación de elementos químicos con capacidad de actuar como eficaces floculantes, ayudan a crear mayores gradientes de campo en la estructura de la malla metálica. Y, finalmente, la investigación de óptimas geometrías, materiales metálicos, ubicación y disposición de los elementos de la malla son los puntos determinantes para aumentar los gradientes de campo que permitan la producción de una eficiente separación magnética de alto gradiente a bajo costo.

El estudio en conjunto de todos los parámetros clave que permiten una eficiente separación magnética de alto gradiente es un enfoque que debería ser abordado en nuevos estudios. De la revisión bibliográfica realizada en este trabajo, hemos visto que no existen investigaciones que estudien en conjunto todos los parámetros determinantes en la separación magnética eficiente, y que adicionalmente, analicen el efecto de estos mediante un modelo de trayectoria de los fluidos, su velocidad, cantidad de flujo y demás parámetros hidrodinámicos.

CONCLUSIONES

Se logró conocer los metales pesados que producen contaminación en el agua; son Cd, Pb, Zn, As, Hg y Cr encontrados en los efluentes líquidos casados por desechos industriales como por ejemplo la fábrica de papel ya que el agua residual de la fábrica de papel reciclado contiene tinte, colorante, pegamento, agente de cohesión y otros sólidos en suspensión en alta concentración.

Se identificó materiales magnéticos que optimicen la separación de metales pesados por separación magnética de alto gradiente tecnología que posee ventajas como separación y filtración de partículas paramagnéticas, diamagnéticas o débilmente ferromagnéticas que se encuentran suspendidas en fluidos y otras sustancias sólidas de una manera muy eficiente y selectiva, con bajo costo, y de forma amigable con el ambiente. Además, se encontró que la aplicación de una matriz metálica eficiente mejora la eficiencia de la separación, así como electroimanes que producen campos magnéticos altos y por consecuencia gradientes de campo altos.

Se determinó la eficiencia del método de separación magnética de alto gradiente para la remoción de metales pesados en el agua. Para el diseño de nuevos separadores magnéticos con mayores gradientes de campo, se podría combinar diversos parámetros y herramientas para lograr la separación de metales pesados en aguas residuales, sobre todo aquellas partículas ultrafinas que hasta ahora resulta muy complicado separarlas con alta eficiencia en elevados volúmenes y velocidades de flujo. Por ejemplo, la utilización de herramientas de simulación multifísica que permitan un análisis combinado de parámetros magnéticos, mecánicos e hidrodinámicos resultaría en un enfoque integrador que podría vislumbrar aspectos que posiblemente hasta la fecha no han sido descubiertos y que posibiliten mejorar la eficiencia. Por otro lado, la generación de proyectos de investigación y desarrollo de mallas metálicas con óptimas geometrías y cuyos elementos sean constituidos por materiales metálicos, posición y disposición que mejoren los gradientes de campo, permitirán un gran aporte al estado del arte de los separadores magnéticos de alto gradiente, en especial en su aplicación a la descontaminación de aguas, una problemática que afecta directamente en la calidad de vida de los seres humanos. También se podría plantear proyectos de investigación para el diseño de materiales superconductores económicos y que operen a temperatura ambiente, sin embargo, su aplicación en entornos locales podría tener dificultades debido a las limitaciones técnico-económicas del medio. Sin embargo, nuestro primer planteamiento puede ser muy factible para su ejecución a nivel local.

RECOMENDACIONES

Investigar nuevas geometrías para la malla magnética la cual ayudaría a aumentar la eficiencia de separación consiguiendo gradientes de campo más altos.

Crear un prototipo de separador magnético de alto gradiente para aplicarlo experimentalmente en aguas contaminadas del Ecuador.

BIBLIOGRAFIA

PEREZ, F. E. S. L. (2012). Los superconductores. *Antena de telecomunicación*, (185), 18-26.

ALARCÓN AC. (1994) Contaminación Minero Metalúrgica del Lago Chinchaycocha y del Rio Mantaro. Instituto para el Desarrollo de la Pesca y la Minería. IPEMIN, La Oroya.

BARAN ENRIQUE J. (1995) Química Bioinorgánica. La Plata (Argentina): McGRAW-HIL;

BERNHOF T R.A. (2012) Mercury toxicity and treatment: A review of the literature. *J. Environ. Public Health*.

C. YAO, W. ZHANG, K. LI, X. XU, H. LI (2018), Study on the formation mechanism of the magnetic abrasive particle layer on the surface of saw wire in magnetic induction-free abrasive wire sawing. *Powder Technol.*, 327 pp. 163-169.

CAMACHO BARREIRO A, ARIOS ROCHE L. (1998) Diccionario de términos ambientales. La Habana: Centro Félix Varela; p.45.

CHANG, VICTOR LUIS ; BOISAITIS, P., (1982). High Gradient Magnetic Separation : Recovery and Enrichment Analysis Separacion Magnetica De Alto Gradiente : Analisis. *Acta Cientifica Venezolana*, vol. 33, no. 2, pp. 110-120.

F. MISHIMA, T. TERADA, Y. AKIYAMA, S. NISHIJIMA (2011), High gradient superconducting magnetic separation for iron removal from the glass polishing waste, *IEEE Trans. Appl. Supercond.*, 21 , pp. 2059-2062.

FOWLER BA. (2009) Monitoring of human populations for early markers of cadmium toxicity: a review. *Toxicology and Applied Pharmacology*; 238(3):294–300.

P.F. GARCÍA, P.F.,M. BRAMMEM, M.,M. WOLF, M., S.R. REINLEIN, S.R., M.F. VON ROMAN, M.F. VON,S. BERENSMEIER, S. (2015) High-gradient magnetic separation for technical scale protein recovery using low cost magnetic nanoparticles *Sep. Purif. Technol.*, 150 (2015), pp. 29-36.

GE, W., ENCINAS, A., ARAUJO, E. &Y SONG, S., (2017). Magnetic matrices used in high

gradient magnetic separation (HGMS): A review. Results in Physics, vol. 7, pp. 4278-4286. ISSN 2211-3797. DOI 10.1016/J.RINP.2017.10.055.

H. ZENG, Y. LI, F. XU, H. JIANG, W. ZHANG (2018) Recovery of LaPO₄:Ce,Tb from waste phosphors using high gradient magnetic separation Waste Manag., 79 , pp. 164-168.

ISLAM, M.A., ALAM, F., SOLAYMAN, M., KHALIL, M.I., KAMAL, M.A., GAN, S.H., WULANSARI, N., MAHAWATI, E., HARTINI, E., BETTENG, R., WU, H., BALLANTYNE, C.M., THORENS, B., MUECKLER, M., LI, W., YUAN, G., PAN, Y., WANG, C., CHEN, H., PETERSEN, M.C., SHULMAN, G.I., ESTEVES, J.V., ENGUITA, F.J., MACHADO, U.F., IDF, LIMA, A.C.S., ARAÚJO, M.F.M., FREITAS, R.W.J.F. DE, ZANETTI, M.L., ALMEIDA, P.C. DE, DAMASCENO, M.M.C., MESSINA, G., PALMIERI, F., MONDA, V., MESSINA, A., DALIA, C., VIGGIANO, A., TAFURI, D., MESSINA, A., MOSCATELLI, F., VALENZANO, A., CIBELLI, G., CHIEFFI, S., MONDA, M., WHO GLOBAL REPORT, KEMENKES RI BALITBANGKES, AMELIA, R., HARAHAP, N., LEE, Y.S., WOLLAM, J., OLEFSKY, J.M., KLIP, A., MCGRAW, T.E., JAMES, D.E., OKTOWATY, S., SETIAWATI, E.P., ARISANTI, N. Y PERKENI, (2018). Ingeniería De Nanopartículas Magnéticas Para La Remoción De Metales Pesados En Aguas. S.L.: S.N.

JÄRUP L. (2003), Hazards of Heavy Metal Contamination. Br Med Bull.; 68:167-182.

KALIA K, FLORA SJ. (2005) Strategies for safe and effective therapeutic measures for chronic arsenic and lead poisoning. J Occup Health.; 47:1–21.

Kheshti, Z., Hassanajili, S. y Ghajar, K.A., (2019). Study and Optimization of a High-Gradient Magnetic Separator Using Flat and Lattice Plates. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 55, no. 2. DOI 10.1109/TMAG.2018.2883624.

L. LUO, A.V. NGUYEN (2017), A review of principles and applications of magnetic flocculation to separation ultrafine magnetic particles Sep. Sci. Technol., 172 pp. 85-99.

LI, L. ZHOU, Y. HAN, Y. ZHU, Y. LI (2019), Effect of carboxymethyl starch on fine-grained hematite recovery by high-intensity magnetic separation: experimental investigation and theoretical analysis. Powder Technol., 343 pp. 270-278.

- MATOVIĆ V, BUHA A, BULAT Z, ĐUKIĆ-ĆOSIĆ D.** (2011) Cadmium toxicity revisited: focus on oxidative stress induction and interactions with zinc and magnesium. Archives of Industrial Hygiene and Toxicology.; 62: 65–76. .
- N. PENG, Q. PAN, H. LIU, Z. YANG, G. Wang** (2018) Recovery of iron and manganese from iron-bearing manganese residues by multi-step roasting and magnetic separation Miner. Eng., 126 , pp. 177-183.
- NOGAWA K, ISHIZAKI A, KOBAYASHI E** (1979). A comparison between health effects of cadmium and cadmium concentration in urine among inhabitants of the Itai – Ithai disease endemic district. Environ Res 18: 397- 409.
- O. MIURA, S. TACHIBANA** (2014), Mercury removal from solution by high gradient magnetic separation with functional group modified magnetic activated carbon IEEE Trans. Appl. Supercond., 24, Article 3700904.
- OBERTEUFFER, J.A.,** (1973). High Gradient Magnetic Separation. IEEE Transactions on Magnetics, vol. 9, no. 3, pp. 303-306. ISSN 19410069. DOI 10.1109/TMAG.1973.1067673.
- OMS - WORLD HEALTH ORGANIZATION.** (2007) Exposure to Mercury: A Major Public Health Concern, Preventing Disease through Healthy Environment. World Health Organization; Geneva, Switzerland.
- PÉREZ, F. E. S. L.** (2012). *Los superconductores. Antena de telecomunicación*, (185), 18-26.
- RAMÍREZ AV, SEMINARIO OM, SILVA JG.** (1993) Impacto toxicológico producido por la Fundición La Oroya en los habitantes de la ciudad aledaña. Comunicación a la Gerencia Central de la EM del CP. Documento de trabajo.
- RODRIGO OVIEDO, -ANCHUNDIA, MOÍNA-QUIMÍ, E., NARANJO-MORÁN, J. Y BARCOS-ARIAS, M.,** (2017). Contaminación por metales pesados en el sur del Ecuador asociada a la actividad minera. Bionatura, vol. 2, no. 4, pp. 437-441. ISSN 13909347. DOI 10.21931/rb/2017.02.04.5.
- T. OKA, Y. TAKAYANAGI, S. MACHIDA, K. ICHIJU, S. FUKUI, J. OGAWA, T. SATO , M. OOIZUMI, M. TSUJIMURA, K. YOKOYAMA** (2016) Magnetic separation for

recovering Ni-compounds from plating waste with use of HTS bulk magnets IEEE Trans. Appl. Supercond., 26 , Article 3700204.

W. LI, Y. HAN, R. XU, E. GONG (2018) A preliminary investigation into separating performance and magnetic field characteristic analysis based on a novel matrix Minerals, 8 , pp. 1-16.

W. ZENG, D. XIONG, (2003), The latest application of SLoN vertical ring and pulsating high-gradient magnetic separator. Miner. Eng., 16 (2003), pp. 563-565.

WHO. (1981) Arsenic. Environmental Health Criteria 18. Geneva: WHO.

X. ZHENG, Y. WANG, D. LU (2017), Study on buildup of fine weakly magnetic minerals on matrices in high gradient magnetic separation. Physicochem. Prob. Miner. Proc., 53 pp. 94-109.

YIP, L, DART, RC. (2001) Arsenic. En: Sullivan JB, Krieger GR, editors. Clinical environmental health and toxic exposures. Philadelphia: Lippincott William and Wilkins, : 858-866.