



Separación Magnética de Alto Gradiente Aplicada a la Remoción de Metales Pesados en Aguas Residuales: Una Revisión del Estado del Arte

High Gradient Magnetic Separation Applied to the Removal of Heavy Metals in Wastewater: A Review of the State of the Art

Separação Magnética de Alto Gradiente Aplicada à Remoção de Metais Pesados em Águas Residuais: Uma Revisão do Estado da Arte

Aldo Mauricio Paca Caicho ^I
aldo.paca@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0001-6751-3204>

Luis Santiago Carrera Almendáriz ^{II}
luisantiago.carrera@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-3262-5895>

Leandra Anahí Zabala Coronel ^{III}
leandra.zabala@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-8241-9985>

Kerly Mishell Pérez Maygualema ^{IV}
kerly.perez@esPOCH.edu.ec
<https://orcid.org/0000-0002-7762-321X>

Correspondencia: aldo.paca@esPOCH.edu.ec

***Recibido:** 30 de Septiembre de 2021 ***Aceptado:** 30 de Octubre de 2021 * **Publicado:** 26 de Noviembre de 2021

- I. Estudiante egresado de la carrera de Física, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- II. Ingeniero Químico, Máster en Química, Magíster en Gestión de la Calidad y Productividad, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- III. Estudiante egresado de la carrera de Física, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.
- IV. Estudiante egresado de la carrera de Física, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo, Riobamba, Ecuador.

Resumen

En este artículo se presenta una revisión bibliográfica del estado del arte de la separación magnética de alto gradiente aplicada a la remoción de metales pesados en aguas residuales. Se 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 sumados esfuerzos para incrementar los gradientes de campo porque estos permiten alcanzar una mayor eficiencia de separación de materiales débilmente magnéticos. Floculantes eficaces, mallas metálicas con geometrías, materiales y disposiciones óptimas, además de potentes electroimanes que emplean superconductores, han sido los principales enfoques para lograr una eficiente separación magnética de alto gradiente en el área del tratamiento de aguas por metales pesados. 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.

Palabras clave: Agua contaminada; metales pesados; separación magnética; separación magnética de alto gradiente.

Abstract

This article presents a literature review of the state of the art of high gradient magnetic separation applied to the removal of heavy metals in wastewater. An analysis, selection and purification of the scientific literature related to this subject has been carried out 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 joining efforts to increase the field gradients because they allow to reach a higher separation efficiency of weakly magnetic materials. Effective flocculants, metal meshes with optimal geometries, materials and arrangements, as well as powerful electromagnets employing superconductors, have been the main approaches to achieve efficient high gradient magnetic separation in the area of heavy metal water treatment. Various actors in society, such as industries, governmental institutions, etc., could make use of this technology, as it is currently technically and economically accessible for implementation, and even for the execution of research and development projects in universities and research centres for the improvement of separation efficiency.

Keywords: Contaminated water; heavy metals; magnetic separation; high gradient magnetic separation.

Resumo

Este artigo apresenta uma revisão da literatura sobre o estado da arte da separação magnética de alto gradiente aplicada à remoção de metais pesados em águas residuais. Foi efectuada uma análise, selecção e purificação da literatura científica relacionada com este assunto, a fim de realizar um estudo sistemático e cronológico do estado da arte dos separadores magnéticos de alto gradiente aplicados ao tratamento de águas contaminadas por metais pesados. Foi detectado que, apesar da existência de artigos científicos de revisão da literatura sobre a separação magnética, não existem artigos de revisão na literatura, especialmente em espanhol, relativamente à aplicação na filtração de metais pesados em águas residuais, neste sentido, existem abundantes obras na literatura sobre a aplicação de filtros tradicionais, que têm muitas restrições à separação eficiente de metais pesados. Verificou-se que, muitos investigadores têm juntado esforços para aumentar os gradientes de campo porque permitem alcançar uma maior eficiência de separação de materiais fracamente magnéticos. Floculantes eficazes, malhas

metálicas con óptimas geometrías, materiales e arranjos, bem como poderosos electroímans que empregam superconductores, têm sido as principais abordagens para conseguir una separación magnética eficiente de alto gradiente na área do tratamento de água de metais pesados. Vários actores da sociedade, tais como indústrias, instituições governamentais, etc., poderiam fazer uso desta tecnologia, uma vez que é actualmente técnica e economicamente acessível para implementação, e mesmo para a execução de projectos de investigação e desenvolvimento em universidades e centros de investigação para a melhoria da eficiência da separação.

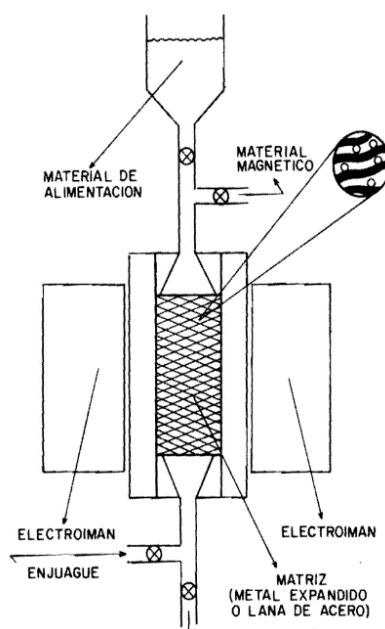
Palavras-chave: Água contaminada; metais pesados; separação magnética; separação magnética de alto gradiente.

Introducción

La separación selectiva de materiales con propiedades magnéticas es uno de los métodos más efectivos para separar selectivamente partículas magnéticas suspendidas en otras sustancias sólidas o líquidas, la separación de materiales magnéticos se produce según las diferencias en las propiedades magnéticas entre las partículas y las sustancias. Este tipo de separación convencionalmente se restringe en la separación de partículas fuertemente magnéticas, como el hierro, con diámetros superiores a 50 μm (Oberteuffer, 1973) (Oder, 1976). En las últimas décadas se ha desarrollado la Separación Magnética de Alto Gradiente, HGMS por sus siglas en inglés, extendiendo el concepto original para la separación de partículas débilmente magnéticas (Kelland, 1973) y con diámetros micrométricos y submicrométricos (Chang, Victor Luis ; Boisaitis, 1982). Esta tecnología 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. Estas ventajas ha provocado que esta tecnología sea aplicada en diversas áreas que van desde procesos industriales de minería (Kelland, 1973), y descontaminación de aguas que requieren de la separación de metales pesados (Anand et al., 1985), hasta aplicaciones de biotecnología como en la separación de levaduras (Dauer & Dunlop, 1991), virus (Bitton & Mitchell, 1974), algas (Yadidia et al., 2002), incluso en la inmovilización de enzimas (Halling & Dunnill, 1980), la separación de glóbulos rojos de la sangre (Melville et al., 1975) (Takayasu et al., 2000), purificación de proteínas (S et al., 2003) y

del ADN (PR et al., 1998). La clave para lograr la filtración magnética depende esencialmente de alcanzar un alto gradiente de campo magnético, así como de un fuerte campo magnético. Un campo magnético externo creado por un electroimán es aplicado a una malla o matriz metálica para generar altos gradientes de campo magnético sobre los alambres metálicos que componen la malla, en consecuencia, esta se magnetiza y produce una fuerza de atracción magnética que atrapa las partículas suspendidas en el fluido que pasan a través de la malla, las partículas separadas del fluido quedando retenidas en la matriz que pueden ser fácilmente removidas apagando el campo magnético externo para desmagnetizar la malla. La lana de acero ha sido utilizada ampliamente como un material eficiente para la elaboración de las matrices. En la figura 1 se ilustra un separador magnético de alto gradiente.

Figura N° 1: Ilustración de un separador magnético de alto gradiente



La eficiencia de separación depende en general de las propiedades del material constituyente de las partículas a separar, de las características de la malla ferromagnética del separador, así como de los parámetros que lo constituye (Chang, Victor Luis; Boisaitis, 1982), además de la intensidad de campo magnético y del flujo que atraviesa por la malla.

Posteriormente a la concepción de la Separación Magnética de Alto Gradiente ocurrida en los primeros años de la década de los 70, la aplicación en el tratamiento y descontaminación de aguas resultaron ser más prometedoras que las técnicas tradicionales de filtrado, HGMS demostró experimentalmente ser efectiva en la disminución significativa de hidrocarburos y sólidos suspendidos en afluentes acuíferos (Petraakis & Ahner, 1978), y en la remoción eficaz de metales pesados como cadmio, cobre, níquel y zinc (Anand et al., 1985). Para lograrlo, además de tomar en cuenta los parámetros mencionados el párrafo anterior, sustancias floculantes con pequeñas cantidades de magnetita fueron adicionadas para elevar los gradientes en las mallas y así mejorar la eficiencia de la separación. En los inicios del año 2000, otros parámetros adicionales como los campos magnéticos externos, la velocidad del fluido y el radio de los alambres metálicos de la malla empezaron a considerarse conjuntamente en el diseño de filtros Magnéticos de Alto Gradiente más eficientes (Tsouris et al., 2006). Las evidencias experimentales iban mostrando que muchos parámetros físicos como la velocidad intersticial, la viscosidad del líquido y los diámetros de partículas a separar y de los alambres de las mallas del filtro influyen directamente en la eficiencia.

En los últimos 15 años, los esfuerzos realizados en la aplicación de remoción de metales pesados mediante HGMS, han apuntado a estudiar cómo el radio de los alambres de las mallas y su posición se relacionan con alcanzar altos niveles de gradiente magnético. El gradiente de campo, así como la distribución del campo magnético dependen no solo del material empleado para la malla, sino que también su forma geométrica, el tamaño, la disposición y la ubicación de sus elementos influyen directamente en la eficiencia de separación (Ge et al., 2017). Como la malla metálica puede influir significativamente en la capacidad de procesamiento, la eficiencia de separación y el costo de operación, los estudios de los últimos años se han enfocado en estudiar principalmente la mejor configuración de la malla. En los últimos años, para determinar cuál es la configuración más eficiente para la malla en términos de alcanzar mayores gradientes de campo magnético usando diversas configuraciones con base en la geometría, tamaño, disposición y ubicación de los elementos de la malla han sido investigados, de entre los principales tenemos; placas ranuradas, varillas de acero, malla de alambre tejido, metal expandido y elementos puntiagudos (Abbasov et al., 2016; Ijiri et al., 2013; Pasteur et al., 2014; Singh et al., 2013; Tripathy et al., 2014; Wang et al., 2018a, 2018b; Zheng et al., 2017).

A partir del año 2005, se propuso la aplicación de superconductores en la HGMS en diversas aplicaciones (Hartikainen et al., 2005; Nishijima & Takeda, 2006; Okada et al., 2006). Posterior a ello, los materiales superconductores se aplicaron en la generación de altos gradientes de campo en el tratamiento de aguas para filtrar partículas metálicas extrafinas que los electroimanes construidos con materiales comunes no podían lograrlo (S. B. Kim et al., 2007; Y. G. Kim et al., 2015; Mishima et al., 2011). La remoción de metales pesados empleando HGMS con superconductores se reportó en (Qi et al., 2018), en donde se logró filtrar Arsénico (As) y Antimonio (Sb) con ayuda de óxidos adsorbentes que son muy restringidos para la separación sólido-líquidos, los resultados experimentales mostraron que HGMS tiene potencial para ser utilizado en la separación de alta eficiencia de As y SB con el óxido adsorbente $MnFe_2O_4$ de tamaño micrométrico, el cual previamente tenía restricciones en la separación sólido-líquido.

Al momento, se dispone en la literatura científica de revisiones bibliográficas de HGMS, que permiten entender los puntos más relevantes alrededor de esta amplia temática (Ge et al., 2017). Sin embargo, a nuestro leal saber y entender, no existe en la literatura de revisiones bibliográficas de HGMS aplicada a la descontaminación de aguas por metales pesados. Hemos detectado que los conocimientos en esta área se encuentran dispersos y que son casi nulos en idioma español. En este trabajo, se presenta una revisión bibliográfica de las contribuciones científicas y de ingeniería presentes en la literatura científica respecto a la HGMS en metales pesados. Nuestro objetivo principal es poner a disposición de la comunidad, una recopilación que detalle y analice los aspectos más importantes y relevantes, dentro del punto de vista técnico-económico, de los trabajos presentes en la literatura, de modo que se exista una base para la aplicación en el diseño de nuevos HGMS considerando los mejores puntos de vista para generar soluciones asequibles.

Metodología

Separación Magnética de Alto Gradiente

Teoría de la Separación Magnética de Alto Gradiente

El método de separación magnética de alto gradiente 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 sub-micrométrico.

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 se explicó en la introducción. 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.

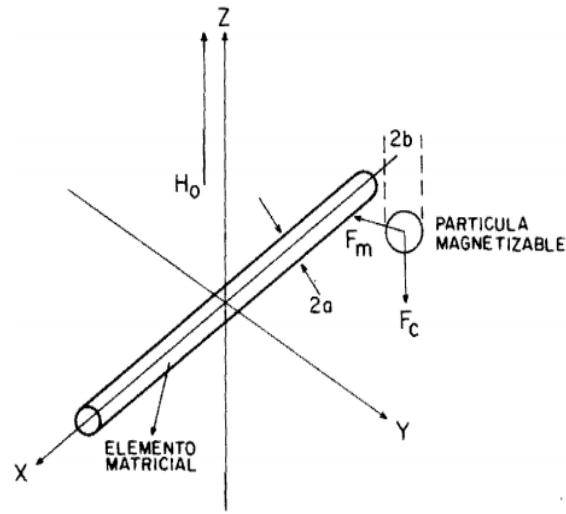
En el proceso de separación magnética, las partículas débilmente magnéticas (paramagnéticas) y las partículas magnéticas son retenidas mediante la acción de una fuerza de atracción magnética \vec{F}_m que se describe por la ecuación:

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

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} .

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.

Figura N° 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



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:

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

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

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:

$$\vec{H} = \nabla \psi$$

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.

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) 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 aplicar imanes permanentes al depósito de minerales magnetita se remonta al siglo XVII y Fuller aplicó la primera patente en 1792 para la separación del mineral de hierro mediante un imán (Singh et al., 2013).

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). 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 (Santillán-Lima, et al, 2017, 2019).

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 (Petrakis & Ahner, 1978).

Muchos procesos industriales dan lugar a efluentes líquidos que contienen 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 y las partículas magnéticas suspendidas en agua se adhieren completamente a los cables.

Ya en 1973, de Latour 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, de Latour 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 de 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 Fe₃O₄ para hacer la recolección más eficiente. Fe₃O₄ 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.

Finalmente 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 comenzaron a dejar 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 flujos 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 difíciles 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).

La mayoría de las zeolitas son ricas en Naq, Kq y Ca₂q, 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 1 mm. Por otro lado, las zeolitas finas utilizadas en los procesos de sorción de iones metálicos son muy difíciles de separar 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 grado. 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. Absorbiendo 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).

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) 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 REY 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 magnéticas estabilizadas escaparon de la captura en un filtro magnético, mientras que se retendrán 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.

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) 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 separación magnéticos de alto gradiente superconductor está compuesto por el imán superconductor del sistema es 3 T, 680 mm 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 bandas magnéticas se precipitan en el tanque de sedimentación por la gravedad, lo que ayuda a reducir la cantidad de bandas 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), 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.

Resultados y discusión

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

económicamente, por lo que la implementación en entornos como el de la descontaminación de metales pesados en aguas residuales es bastante factible, por la alta eficiencia de separación y

por la accesibilidad que hoy en día brindan. Por lo tanto, industrias, instituciones gubernamentales, etc., podrían implementar esta tecnología para contribuir a la mitigación del problema de los metales pesados en el tratamiento de aguas residuales.

Para el diseño de nuevos separadores magnéticos con más altos gradientes de campo, se podrían 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.

Conflicto de Interés

Los autores declaramos que no existen conflictos de interés de naturaleza alguna.

Fuente de financiamiento

Este trabajo de investigación ha sido ejecutado con financiación propia.

Agradecimiento

Los autores le agradecen a la Escuela Superior Politécnica de Chimborazo por su apoyo en esta investigación.

Referencias bibliográficas

1. Abbasov, T., Gögebakan, V., & Karadağ, T. (2016). Particle capture modeling for an axial magnetic filter with a bounded non-Newtonian flow field. *Powder Technology*, 291, 223–228. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2015.12.043>
2. Anand, P., Friedlaender, F. J., & Etzel, J. E. (1985). Heavy metals removal by high gradient magnetic separation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 21(5), 2062–2064. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1985.1064013>
3. Bitton, G., & Mitchell, R. (1974). The removal of Escherichia coli-bacteriophage T7 by magnetic filtration. *Water Research*, 8(8), 549–551. [https://doi.org/10.1016/0043-1354\(74\)90063-3](https://doi.org/10.1016/0043-1354(74)90063-3)
4. Chang, Victor Luis ; Boisaitis, P. (1982). High Gradient Magnetic Separation : Recovery and Enrichment Analysis SEPARACION MAGNETICA DE ALTO GRADIENTE : ANALISIS. *Acta Científica Venezolana*, 33(2), 110–120.
5. Dauer, R. R., & Dunlop, E. H. (1991). High gradient magnetic separation of yeast. *Biotechnology and Bioengineering*, 37(11), 1021–1028. <https://doi.org/10.1002/BIT.260371106>
6. Feng, D., Aldrich, C., & Tan, H. (2000). Removal of heavy metal ions by carrier magnetic separation of adsorptive particulates. *Hydrometallurgy*, 56(3), 359–368. [https://doi.org/10.1016/S0304-386X\(00\)00085-2](https://doi.org/10.1016/S0304-386X(00)00085-2)
7. Franz, M., & Franzreb, M. (1998). Determination of the capture radii of magnetite bearing hydroxide flocs in magnetic filtration. *IEEE Transactions on Magnetics*, 34(6), 3902–3909. <https://doi.org/10.1109/20.728301>
8. Ge, W., Encinas, A., Araujo, E., & Song, S. (2017). Magnetic matrices used in high gradient magnetic separation (HGMS): A review. *Results in Physics*, 7, 4278–4286. <https://doi.org/10.1016/J.RINP.2017.10.055>
9. Halling, P. J., & Dunnill, P. (1980). Magnetic supports for immobilized enzymes and bioaffinity adsorbents. *Enzyme and Microbial Technology*, 2(1), 2–10. [https://doi.org/10.1016/0141-0229\(80\)90002-2](https://doi.org/10.1016/0141-0229(80)90002-2)

10. Hartikainen, T., Nikkanen, J. P., & Mikkonen, R. (2005). Magnetic separation of industrial waste waters as an environmental application of superconductivity. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 15(2 PART II), 2336–2339. <https://doi.org/10.1109/TASC.2005.849660>
11. Ijiri, Y., Poudel, C., Williams, P. S., Moore, L. R., Orita, T., & Zborowski, M. (2013). Inverted linear Halbach array for separation of magnetic nanoparticles. *IEEE Transactions on Magnetics*, 49(7), 3449–3452. <https://doi.org/10.1109/TMAG.2013.2244577>
12. Kelland, D. R. (1973). High Gradient Magnetic Separation Applied to Mineral Beneficiation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 9(3), 307–310. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1973.1067683>
13. Kim, S. B., Nakada, C., Murase, S., Okada, H., & Ohara, T. (2007). Development of magnetic chromatograph system for magnetic particle and ion separation with superconducting magnet. *Physica C: Superconductivity and Its Applications*, 463–465(SUPPL.), 1306–1310. <https://doi.org/10.1016/J.PHYSC.2007.04.305>
14. Kim, Y. G., Song, J. Bin, Yang, D. G., Kim, W. J., Kim, S. H., & Lee, H. (2015). Purification of chemical mechanical polishing wastewater via superconducting high gradient magnetic separation system with optimal coagulation process. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 25(3). <https://doi.org/10.1109/TASC.2014.2365559>
15. Melville, D., Paul, F., & Roath, S. (1975). High Gradient Magnetic Separation of Red Cells from Whole Blood. *IEEE Transactions on Magnetics*, 11(6), 1701–1704. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1975.1058970>
16. Mishima, F., Terada, T., Akiyama, Y., & Nishijima, S. (2011). High gradient superconducting magnetic separation for iron removal from the glass polishing waste. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 21(3 PART 2), 2059–2062. <https://doi.org/10.1109/TASC.2010.2091100>
17. Nishijima, S., & Takeda, S. I. (2006). Superconducting high gradient magnetic separation for purification of wastewater from paper factory. *IEEE Transactions on*

- Applied Superconductivity, 16(2), 1142–1145.
<https://doi.org/10.1109/TASC.2006.871346>
18. Oberteuffer, J. A. (1973). High Gradient Magnetic Separation. *IEEE Transactions on Magnetics*, 9(3), 303–306. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1973.1067673>
19. Oder, R. R. (1976). High gradient magnetic separation theory and applications. *IEEE Transactions on Magnetics*, 12(5), 428–435. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1976.1059076>
20. Okada, H., Okuyama, H., Uda, M., & Hirota, N. (2006). Removal of aerosol by magnetic separation. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 16(2), 1084–1087. <https://doi.org/10.1109/TASC.2006.870000>
21. Pasteur, A., Tippkotter, N., Kampeis, P., & Ulber, R. (2014). Optimization of High Gradient Magnetic Separation Filter Units for the Purification of Fermentation Products. *IEEE Transactions on Magnetics*, 50(10). <https://doi.org/10.1109/TMAG.2014.2325535>
22. Petrakis, L., & Ahner, P. F. (1978). High gradient magnetic separations in water effluents. *IEEE Transactions on Magnetics*, 14(5), 491–493. <https://doi.org/10.1109/TMAG.1978.1059825>
23. PR, L., SE, B., J, D., P, H., MJ, D., IJ, B., & D, S. (1998). Recent developments of magnetic beads for use in nucleic acid purification. *Journal of Chromatography. A*, 816(1), 107–111. [https://doi.org/10.1016/S0021-9673\(98\)00064-8](https://doi.org/10.1016/S0021-9673(98)00064-8)
24. Qi, Z., Joshi, T. P., Liu, R., Li, Y., Liu, H., & Qu, J. (2018). Adsorption combined with superconducting high gradient magnetic separation technique used for removal of arsenic and antimony. *Journal of Hazardous Materials*, 343(October), 36–48. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2017.09.007>
25. S, B., DA, J., PE, L., & TA, H. (2003). Protein separations using colloidal magnetic nanoparticles. *Biotechnology Progress*, 19(2), 477–484. <https://doi.org/10.1021/BP0200853>
26. Santillán Lima, J. C., Llanga Vargas, A., Mayorga, W., & Valdiviezo, S. (2016). Evaluación del requerimiento tecnológico para servicios educativos, propuesta de infraestructura de red inalámbrica del Campus La Dolorosa de la Universidad Nacional de Chimborazo. II Congreso Internacional Educación Contemporánea, Calidad

- Educativa y Buen Vivir. In II Congreso Internacional Educación Contemporanea, Calidad Educativa y Buen Vivir.
27. Santillán-Lima, J. C., Molina-Recalde, A. P., Molina-Granja, F. T., Vásquez-Barrera, M. F., Rivadeneira, E. P., & Lozada-Yáñez, R. M. (2019). Las redes sociales en el rendimiento académico. Colegios particulares de la ciudad de Riobamba (Ecuador). *Revista Espacios*, 40(8).
 28. Singh, V., Nag, S., & Tripathy, S. K. (2013). Particle flow modeling of dry induced roll magnetic separator. *Science Direct*, 244, 85–92. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2013.03.053>
 29. Takayasu, M., Kelland, D. R., & Minervini, J. V. (2000). Continuous magnetic separation of blood components from whole blood. *IEEE Transactions on Applied Superconductivity*, 10(1), 927–930. <https://doi.org/10.1109/77.828383>
 30. Tripathy, S. K., Banerjee, P. K., & Suresh, N. (2014). Separation analysis of dry high intensity induced roll magnetic separator for concentration of hematite fines. *Powder Technology*, 264, 527–535. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2014.05.065>
 31. Tsouris, C., Noonan, J., Ying, T. yu, & Yiaccoumi, S. (2006). Surfactant effects on the mechanism of particle capture in high-gradient magnetic filtration. *Separation and Purification Technology*, 51(2), 201–209. <https://doi.org/10.1016/j.seppur.2006.02.001>
 32. Wang, Y., Gao, D., Zheng, X., Lu, D., & Li, X. (2018a). Study on the demarcation of applied magnetic induction for determining magnetization state of matrices in high gradient magnetic separation. *Minerals Engineering*, 127, 191–197. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2018.08.005>
 33. Wang, Y., Gao, D., Zheng, X., Lu, D., & Li, X. (2018b). Rapid determination of the magnetization state of elliptic cross-section matrices for high gradient magnetic separation. *Powder Technology*, 339, 139–148. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2018.08.012>
 34. Yadidia, R., Abeliovich, A., & Belfort, G. (2002). Algae removal by high gradient magnetic filtration. *Environmental Science and Technology*, 11(9), 913–916. <https://doi.org/10.1021/ES60132A013>

35. Zheng, X., Wang, Y., Lu, D., & Li, X. (2017). Theoretical and experimental study on elliptic matrices in the transversal high gradient magnetic separation. *Minerals Engineering*, 111, 68–78. <https://doi.org/10.1016/J.MINENG.2017.06.007>

© 2021 por los autores. Este artículo es de acceso abierto y distribuido según los términos y condiciones de la licencia Creative Commons Atribución-NoComercial-CompartirIgual 4.0 Internacional (CC BY-NC-SA 4.0) (<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>).