

# Diseño y construcción de un prototipo para beneficio de minerales con fluidos magnetorreológicos a nivel de laboratorio

## Design and construction of a prototype for processing of minerals with magneto-reological fluids at a laboratory scale

## Desenho e construção de um protótipo para benefício de minerais com fluidos magneto-reológicos em escala de laboratório

Para citar este artículo / To reference this article  
/ Para citar este artigo: Ardila Barragán, M. A., Triviño Restrepo, M., Torres Barahóna, É. y Molina Gallego, C. P. (2015). Diseño y construcción de un prototipo para beneficio de minerales con fluidos magnetorreológicos a nivel de laboratorio. *Ingenio Magno*, 6(2), 48-60.

### Marco Antonio Ardila-Barragán

Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en Carbones y Carboquímica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia  
[marco.ardila@uptc.edu.co](mailto:marco.ardila@uptc.edu.co)

### María del Pilar Triviño-Restrepo

Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en Carbones y Carboquímica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia  
[pilar.trivino@uptc.edu.co](mailto:pilar.trivino@uptc.edu.co)

### Édgar Absalón Torres-Barahóna

Ingeniería Electromecánica, Grupo de Investigación en Energía y Nuevas Tecnologías, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia  
[edgar.torres@uptc.edu.co](mailto:edgar.torres@uptc.edu.co)

### Claudia Patricia Molina-Gallego

Facultad de Ingeniería, Grupo de Investigación en Carbones y Carboquímica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia  
[claudia.molina@uptc.edu.co](mailto:claudia.molina@uptc.edu.co)

Fecha de recepción: 15 de Abril de 2015

Fecha de aprobación: 9 de septiembre de 2015

## Resumen

Este artículo describe los procedimientos mediante los cuales se diseña y construye un equipo para beneficio de minerales con fluidos magnetorreológicos (FMR). Presenta de forma sintética una revisión del estado del arte, a nivel de equipos y procesos, con el fin de obtener un diseño conceptual y aplicar el modelo de French a la metodología del diseño mecánico. Con base en las fuentes bibliográficas se realizaron los cálculos y análisis para elementos de máquinas, selección de materiales, modelación y procesos de manufactura. Finalmente se presenta el equipo desarrollado y los resultados de las pruebas de operación. El proyecto se basa en investigaciones previas para obtener FMR a partir de magnetita y desarrollar un proceso de beneficio de minerales con FMR, enmarcadas en un proyecto macro direccionado a promover adaptaciones tecnológicas que permitan explorar el desarrollo de técnicas y tecnologías alternativas, tendientes a optimizar los procesos y garantizar un aprovechamiento sostenible de los recursos mineralógicos regionales y del país.

**Palabras clave:** fluidos magnetorreológicos, separación gravimétrica de minerales, beneficio de minerales, campos magnéticos, ferrofluidos.

## Abstract

This article describes the procedures through which an apparatus can be designed to benefit from minerals with Magneto-Reological Fluids (MRF). It synthetically presents a review of current research, at the level of equipment and processes with the goal of obtaining a conceptual design, and applying the French model to the mechanical design methodology. Based on the referenced bibliographical sources, calculations and analyses were performed for machine elements, material selection, modeling and manufacturing processes. Finally the developed apparatus is presented with the results of the trial runs. The project is based on prior research on obtaining MRF from magnetite, and developing a process to benefit from minerals with MRF; framed within a macro project, directed at promoting technological adaptations which allow the exploration and development of alternative techniques and technologies, aimed at optimizing processes and guaranteeing sustainable use of regional and national mineral resources.

**Keywords:** magnetoreological fluids, gravimetric separation of minerals, beneficiation of minerals, magnetic fields, ferrofluids.

## Resumo

Este artigo descreve os procedimentos mediante os quais é desenhado e construído um equipamento para o benefício de minerais com fluidos magneto-reológicos (FMR). Sinteticamente apresenta uma revisão do estado da arte, dos equipamentos e processos a fim de obter um desenho conceitual e aplicar o modelo de French à metodologia do desenho mecânico. Baseado nas fontes bibliográficas referenciadas foram realizados os cálculos e as análises para os elementos das máquinas, seleção de materiais, modelagem e processos de fabricação. Finalmente se apresenta o equipamento desenvolvido com os resultados das provas de operação. O projeto é baseado nas pesquisas anteriores para obter FMR a partir de magnetita, para desenvolver um processo de benefício de minerais com FMR; enquadrado dentro de um projeto orientado para promover adaptações tecnológicas que permitem explorar o desenvolvimento de técnicas e tecnologias alternativas, destinadas a otimizar os processos e garantir o uso sustentável dos recursos minerais regionais ou de todo um país.

**Palavras Chave:** fluidos magneto-reológicos, separação gravimétrica de minerais, beneficio de minerais, campos magnéticos e ferrofluidos.

## 1. Introducción

La investigación del diseño y construcción del equipo para beneficio de minerales con fluidos magnetorreológicos (FMR) se llevó a cabo para probar los ferrofluidos de magnetita mineral (Ardila *et al.*, 2010) obtenidos en el Laboratorio de Carbones y Carboquímica de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia (UPTC). Como antecedentes tecnológicos para obtener un diseño conceptual de equipo, se parte de los desarrollos hechos por Rosenzweig (1969), Reimers, Rholl y Khalafalla (1974), Homer, Quets y Hatwell (1975), Nakatsuka (1993) y otros investigadores.

En términos metodológicos se hace una correlación de fases entre el problema de diseño y el método French (Cross, 1999). Se parte de una necesidad, hasta llegar a unos dibujos de trabajo y continuar con el proceso de cálculo, modelación y fabricación del equipo.

Los parámetros de operación y control del equipo se fundamentan en el estudio de la separación ferrohdrostática de partículas en fluidos magnéticos, que es una técnica de flotación basada en la ley de Arquímedes, según la cual una fuerza magnética de empuje, inducida y opuesta a la gravedad, actúa sobre las partículas magnéticas suspendidas en el líquido. Esta fuerza de empuje se puede controlar con precisión para hacer flotar partículas con densidades del orden de los 20.000 kg/m<sup>3</sup>. La selectividad es muy alta y se pueden separar partículas de mezclas con una diferencia de densidad hasta de 30 kg/m<sup>3</sup> (Svoboda, 2004).

## 2. Marco teórico

Uno de los pioneros en las técnicas de separación de material con medio ferromagnético fue Rosenzweig, que en 1969 patentó un método que marcó el inicio de numerosas patentes similares en Estados Unidos, Japón, Israel, Francia y la Unión Soviética.

Cabe señalar que a pesar del progreso considerable en los últimos 35 años, la separación ferrohdrostática continúa en su fase experimental. Numerosas organizaciones se han ocupado de este problema presentando prototipos de separadores ferrohdrostáticos (SFH), pero no todos se han podido aplicar a gran escala de producción (Guvarevich y Vidsota, 1994). A continuación se hace una descripción sintética de los principales prototipos desarrollados a través del tiempo, tomados como modelos de referencia en el proyecto.

El equipo de Ronsenweig (1969) incluye un canal en desnivel, el cual direcciona el material por tratar, que a su vez es puesto en el espacio de un magneto cuyas caras tienen una inclinación para formar un gradiente de campo magnético. El canal puede ser con o sin fondo, o completamente cerrado. En la parte inferior de esta garganta hay un sistema de separadores.

Reimers, Rholl y Khalafalla (1974) diseñaron un proceso y un dispositivo magnetogravimétrico para separación de partículas mediante fuerzas de levitación no verticales. El campo magnético es generado por un magneto permanente cuyos polos son un material no magnético en forma de herradura, y entre ellos está una celda, donde va el fluido. En la parte superior tiene

un tubo de alimentación y en la inferior presenta dos salidas para los flotados y los hundidos. El soporte del equipo presenta un ángulo de inclinación.

Homer, Quets y Hatwell (1975), desarrollaron procesos y equipos para separación de partículas de diferentes densidades con fluidos magnéticos, que de acuerdo con la patente plantea el uso electroimanes, manteniendo un gradiente de campo magnético. Los minerales a beneficiar caen sobre el fluido en el punto crítico del campo magnético, las partículas más livianas levitan y continúan dentro de él, mientras que las más densas caen directamente. Se separan pequeñas partículas de 5 mm hasta 1  $\mu$ m de diámetro por diferencia de densidad. El equipo es compatible con trituradoras, molinos, separadores magnéticos.

En Japón, Nakatsuka (1993) desarrolla un modelo para tratar escoria de metal, utilizando FMR y un imán permanente de tierras raras. Este sistema redujo el gasto de electricidad y agua, el tratamiento es fácil y se aumenta la eficiencia de recuperación. En la estructura del separador el máximo de campo magnético está ligeramente inclinado, y la fuerza de levitación magnética sobre los cuerpos no magnéticos tiene un componente horizontal que permite que estos floten espontáneamente y se separen. Se tratan minerales de aluminio, cinc, cobre y plomo, con tamaños menores a 30 mm de diámetro. Otra técnica desarrollada es la del equipo Magstream (Kojovic, 1994), similar a un proceso de medios densos en centrífuga, donde se alcanza la separación por una combinación de densidad de las partículas y propiedades magnéticas.

### A. Análisis de fuerzas sobre una partícula en un fluido magnetorreológico

La técnica para la obtención de flotados y hundidos de un mineral no magnético consiste en la levitación y el hundimiento selectivos, con base en las densidades de la partícula y del medio de separación. Cuando un FMR

se expone a un campo magnético externo, aumenta su densidad con el incremento de la intensidad del campo. Este comportamiento, de acuerdo con Svoboda (2004), se puede modelar con base en las siguientes consideraciones (figura 1).

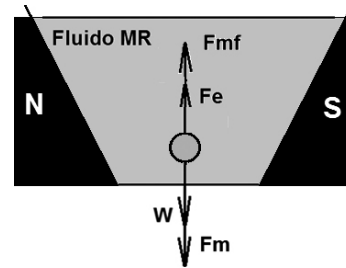


Figura 1. Análisis de fuerzas en el campo

A partir de este modelo, y haciendo un análisis de las fuerzas presentes, se determina la densidad de corte o equivalente a la de una partícula de mineral, para mantenerse levitando dentro del FMR. A partir de la sumatoria de fuerzas se obtiene:

$$W = mg = \rho_p V_p g \quad [1]$$

Donde  $W$  es la fuerza gravitacional,  $m$  es la masa de la partícula,  $g$  es la gravedad local,  $\rho_p$  es la densidad de la partícula y  $V_p$  es el volumen de la partícula.

La fuerza de tracción magnética,  $F_m$ , viene dada por:

$$F_m = \frac{1}{\mu_0} k_p V_p B \nabla B \quad [2]$$

Donde  $k_p$  es la susceptibilidad magnética volumétrica de la partícula,  $B$  es la intensidad del campo magnético,  $\nabla B$  es el gradiente de campo y  $\mu_0$  es la permeabilidad magnética en vacío.

La fuerza de flotación clásica de Arquímedes,  $F_e$ , es:

$$F_e = V_f g \rho_f \quad [3]$$

Donde  $\rho_f$  es la densidad del fluido y  $V_f$  es el volumen del fluido desalojado por la partícula.

La fuerza de flotación debida al campo magnético que actúa sobre el fluido,  $F_{mf}$ , es:

$$F_{mf} = \frac{1}{\mu_o} J_f V_p \nabla B \quad [4]$$

Donde  $J_f$  es la polarización magnética.

La fuerza neta sobre la partícula corresponde a la sumatoria de las fuerzas que actúan y se puede escribir así:

$$F_p = \frac{\nabla B}{\mu_o} V_p (k_p B - J_f) + V_p (\rho_p - \rho_f) \quad [5]$$

Para separar partículas por diferencia de densidades se requiere establecer una densidad de corte en el FMR  $\rho_{pc}$ . Así, la fuerza neta que actúa sobre la partícula es igual a cero:

$$0 = \frac{\nabla B}{\mu_o} V_p (k_p B - J_f) + V_p (\rho_p - \rho_f) \quad [6]$$

De donde se obtiene:

$$\rho_{pc} = \rho_f + \frac{J_f}{\mu_o g} \nabla B \quad [7]$$

Se confirma entonces que la densidad del punto de corte corresponde a la misma densidad aparente del FMR; sin embargo, para una partícula que ingresa al fluido con una velocidad inicial, las ecuaciones de movimiento se establecen a partir de:

$$\sum F = ma \quad [8]$$

En un análisis para pequeñas partículas es necesario contemplar las fuerzas de arrastre, tanto para el descenso como para el ascenso. Para partículas grandes a bajas velocidades, el efecto de fuerzas de arrastre se puede

ignorar. En caso de contemplarse, se debe tener en cuenta que estas fuerzas vienen dadas por:

$$F_d = (v_f - v_p) 6\pi\eta b \quad [9]$$

Donde  $v_f$  y  $v_p$  son las velocidades del fluido y de la partícula, respectivamente,  $\eta$  es la viscosidad dinámica del fluido y  $b$  el radio de la partícula.

Teniendo en cuenta la densidad de punto de corte  $\rho_{pc}$  para una fuerza neta cero, entonces se tiene:

$$\rho_{pc} = \rho_f + \frac{J_f}{\mu_o g} \nabla B \pm \frac{9\eta v}{2gb^2} \quad [10]$$

Donde el signo positivo indica descenso y el signo negativo, ascenso.

Las ecuaciones de movimiento vienen establecidas por:

$$F_e + F_{mf} - W - F_m \pm F_d = ma \quad [11]$$

Para una partícula no magnética la fuerza de tracción magnética es cero:

$$F_e - W - F_{mf} \pm F_d = ma \quad [12]$$

Como:

$$a = d^2 z / dt^2 = dv / dt \quad [13]$$

Lo anterior también depende de si la partícula entra con una velocidad inicial (figura 2).

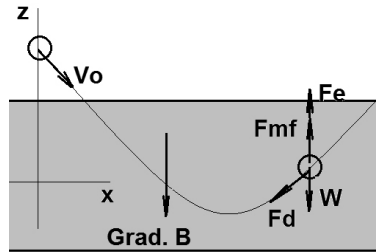


Figura 2. Análisis de fuerzas para la trayectoria de la partícula

Fuente: Triviño et al. (2012).

Se tiene así:

$$d^2x/dt^2 = dv_x/dt = \frac{1}{\rho_p V_p} (Fd_x) \quad [14]$$

$$d^2z/dt^2 = dv_z/dt = \frac{1}{\rho_p V_p} (Fe + Fmf - Fd_z - W) \quad [15]$$

Para nuestro caso de estudio,  $F_d \approx 0$ .

Luego:

$$d^2x/dt^2 = dv_x/dt \approx 0 \quad [16]$$

$$d^2z/dt^2 = dv_z/dt = \frac{1}{\rho_p V_p} (Fe + Fmf - W) \quad [17]$$

De donde se obtiene:

$$\frac{d^2z}{dt^2} = \frac{1}{\rho_p V_p} + \left( \frac{1}{\mu_o} J_f V_p \nabla B + V_p g (\rho_f - \rho_p) \right) \quad [18]$$

Estas corresponden a las ecuaciones de movimiento de la partícula en el fluido ante la presencia de un campo magnético.

### 3. Metodología

A partir del análisis de operaciones (Konz, 2007), se define la ubicación de los elementos y la distribución del sistema, para verificar el flujo y balance de carga representado en el diagrama de la figura 3. Para el proceso de diseño del equipo se aplica el método de French (Cross, 1999), a partir del cual se correlaciona la necesidad de diseñar un equipo, para beneficio de minerales por métodos gravimétricos (figura 4), mediante FMR. Para ello se aplicaron técnicas de análisis de información, creatividad y análisis funcional (Alcaide, Diego y Artacho, 2004), entre otros procedimientos. A su vez se tuvieron en cuenta conceptos de diseño para manufactura, ensamble, usabilidad, tamaño del cuerpo humano, postura, alcance y movilidad, fuerza y potencia, y rapidez y acción controlada (Boothroyd, Dewhurst y Knight, 2002).

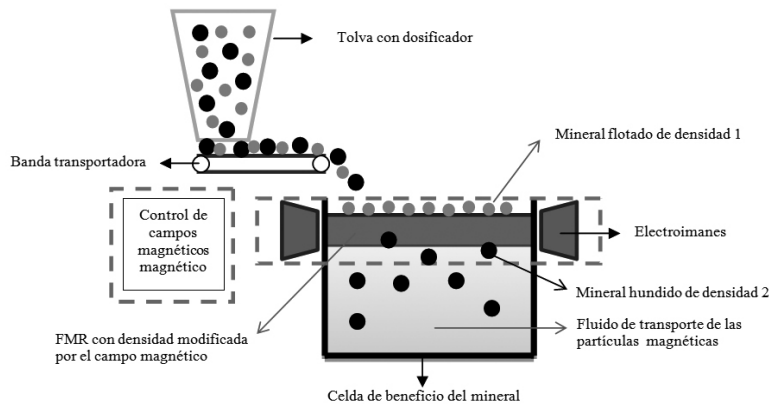


Figura 3. Diagrama de flujo y configuración del proceso

Fuente: Triviño *et al.* (2012).

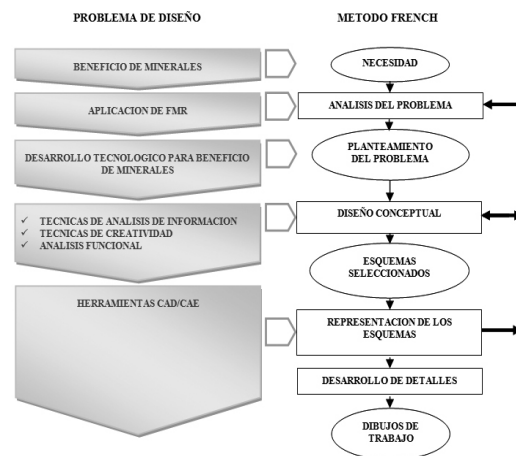


Figura 4. Correlación del problema de diseño con el método French

Fuente: Triviño *et al.* (2012).

El cálculo de los elementos mecánicos se hizo con base en los fundamentos de diseño establecidos por Shigley (1981). El análisis de diseño de máquinas se hizo a partir del estudio de casos prácticos planteados por Norton (1999). Igualmente, se aplicaron los conceptos del proceso de diseño y análisis de mecanismos relacionados por Sandor y Erdman (1998).

El estudio de resistencia de materiales se llevó a cabo de acuerdo con los principios expuestos por Hibbeler (1998), en tanto los procedimientos de selección de

materiales se hicieron con base en el libro y la licencia académica del *software* CES Edupack, de Ashby (2005) (adquirido por la UPTC). La selección de componentes mecánicos se realizó en el *handbook* de Parmley (1985). La modelación y elaboración de planos de ingeniería, de ensamble y de fabricación se basó en la propuesta de Jensen, Helsel y Short (2002). Finalmente se realiza la selección de procesos de manufactura según Schey (2002). El proyecto concluye con la construcción y las pruebas de funcionamiento del equipo.

## 4. Resultados

### A. Descripción y configuración del proceso de Beneficio de minerales con FMR

En el proceso de separación gravimétrica flotan las partículas de mineral de densidad menor a la densidad de corte del FMR (densidad equivalente a la intensidad del campo magnético) y se hunden las partículas de mineral con densidad mayor. De acuerdo con el análisis de operaciones, el proceso se puede representar de forma esquemática (figura 3).

### B. Sistema de alimentación

Está constituido por una tolva con dosificador de banda transportadora; suministra el mineral por tratar de manera uniforme, de acuerdo con la capacidad de la celda de beneficio.

### C. Celda de beneficio

Contenedor no metálico del FMR y de la carga de mineral por tratar. Es permeable a los campos magnéticos. Es también el dispositivo en el que el FMR modifica su densidad por acción del campo, para llevar a cabo el proceso de beneficio del mineral.

### D. Separación de hundidos

Este proceso se hace con una banda transportadora sobre la que se depositan los componentes separados,

mediante una serie de canaletas que le facilitan la acumulación de las partículas en el proceso de beneficio.

### E. Separación de flotados

El sistema de separación de flotados está constituido por un tornillo sinfín accionado por un motor de corriente continua. Su velocidad facilita la extracción de los componentes flotados, en tanto un sistema posterior permite la recuperación de fluido magnético que fluye adherido a las partículas flotadas.

### F. Recuperación y recirculación del FMR

Una vez los flotados y los hundidos son evacuados, en sus respectivos circuitos caen por gravedad sobre una malla de acero vibratoria, donde se separan el FMR de los materiales sólidos, para ser recogidos en colectores independientes. El fluido finalmente se recircula hacia la celda de beneficio.

### G. Diseño de circuito de control

El control corresponde a un sistema de lazo abierto en el que los parámetros son establecidos por el usuario, en función de las características del material por beneficiar. La unidad de control dirige el funcionamiento de los diferentes subsistemas (figura 5).



Figura 5. Bloques del sistema de control utilizado

Fuente: Triviño *et al.* (2012).



### H. Diseño del equipo

A partir del análisis de fuerzas se diseña el circuito magnético, con gradiente de campo vertical y capacidad

para modificar la densidad aparente de 350 ml de FMR (figura 6).

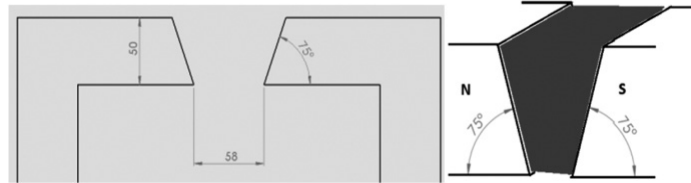


Figura 6. Celda de separación de minerales en FMR en función del campo magnético

Fuente: Triviño *et al.* (2012).

### I. Pruebas del circuito magnético

El comportamiento del campo es aproximadamente lineal y, omitiendo los datos extremos, se establece un

gradiente de campo magnético de 8,9433 Gauss/mm, en dirección descendente (figura 7).

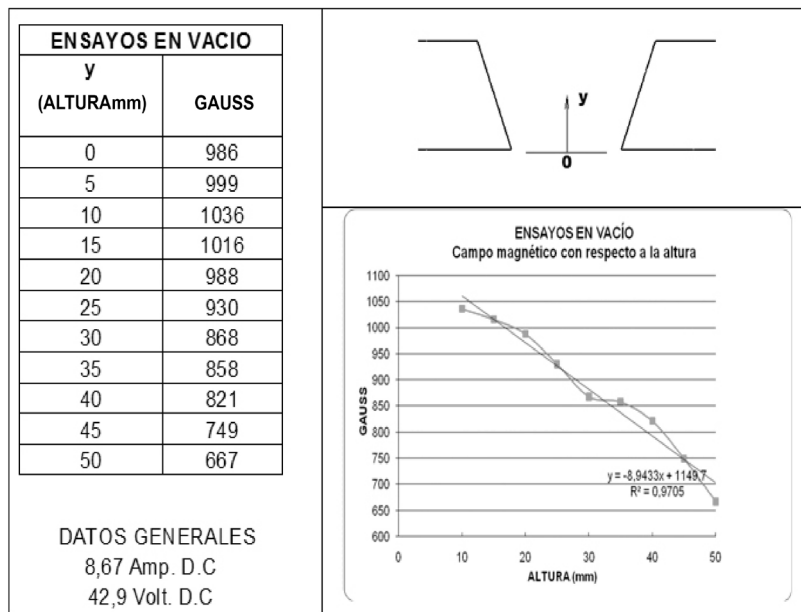


Figura 7. Comportamiento del circuito magnético dirección vertical

Fuente: Triviño *et al.* (2012).

La variación del campo magnético en sentido transversal es de 805 Gauss en los extremos y de 1013 Gauss en

la región central, para condiciones de carga de 8,67 A y 42.9 V. Tomando como valor promedio 900 Gauss,

la variación es, en promedio, de 100 Gauss (es mayor hacia el centro del entrehierro) (figura 8).

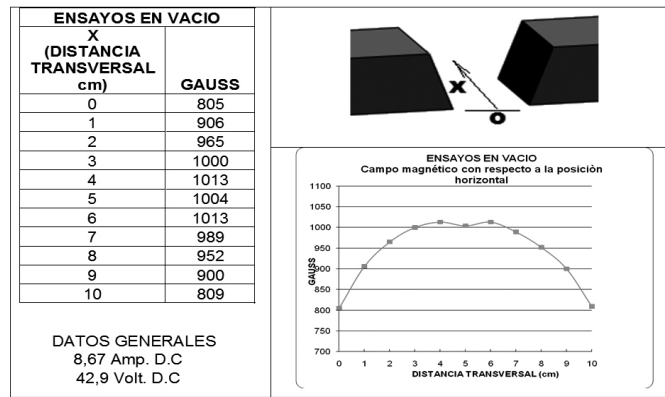


Figura 8. Comportamiento del circuito magnético dirección horizontal

Fuente: Triviño *et al.* (2012).

El comportamiento del campo magnético con la corriente del circuito registra que el entrehierro empieza su

saturación a los 800 Gauss, para las condiciones de carga en corriente directa (figura 9).

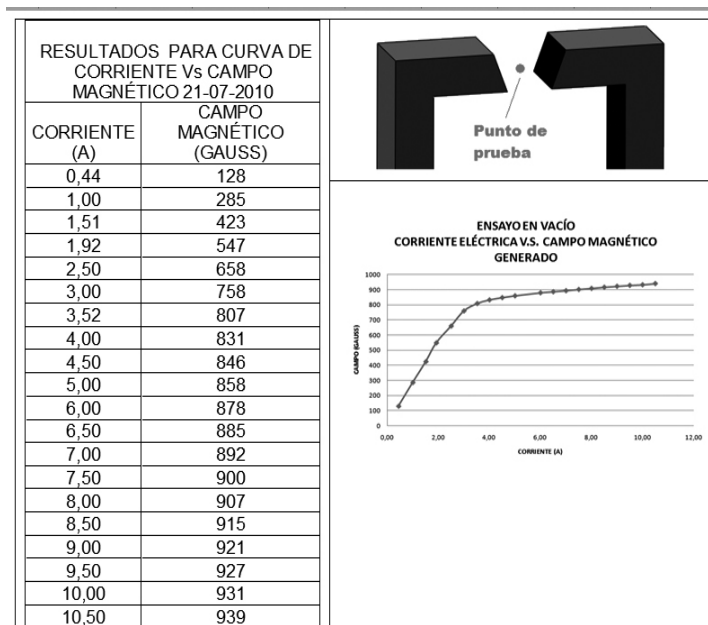


Figura 9. Prueba de saturación magnética

Fuente: Triviño *et al.* (2012).

### J. Modelación y parametrización del equipo a escala de laboratorio

Como resultado del diseño se obtuvo un equipo para beneficio de minerales con FMR, modelado en Solid

Works (licencia de la UPTC) (figura 10) y construido a partir del modelo que se muestra en la figura 11.

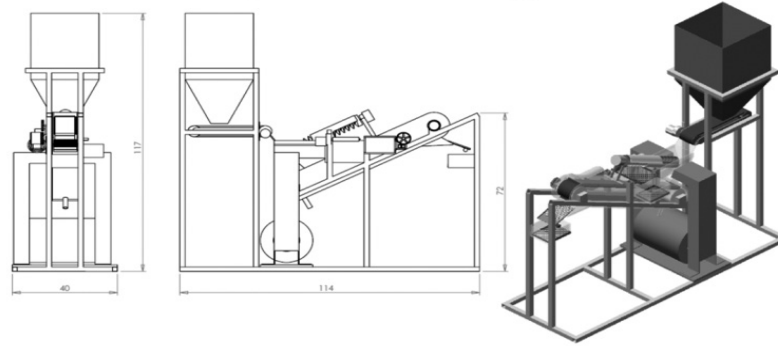


Figura 10. Modelo 3D

Fuente: Triviño *et al.* (2012).

### K. Resultados de las pruebas de operación

Las pruebas de operación del equipo se realizaron a partir de una muestra de 1000 g de carbón coquizable, sometida a molienda, de donde se obtuvo una primera fracción de 458 g pasantes por un tamiz estándar 8. También se obtuvo una segunda fracción de 542 g

pasantes por un tamiz estándar 4. Los resultados de las pruebas del equipo para beneficio de minerales con FMR, medidos en la separación de cenizas de los carbones flotados, a diferentes densidades y granulometrías, se presentan en la tabla 1.

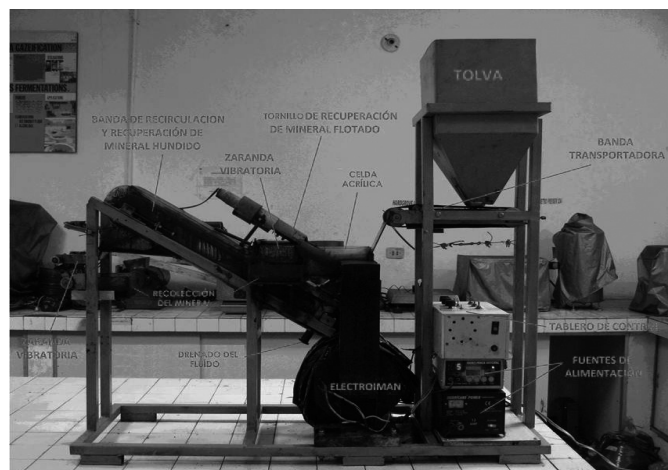


Figura 11. Modelo físico del prototipo

Fuente: Triviño *et al.* (2012).

**Tabla 1. Resultados de las pruebas de separación de cenizas para una muestra de carbón, en el equipo de beneficio de minerales con FMR**

CARBON Y TAMAÑO DE GRANO	Peso Muestra inicial (Pmi) (g)	Czi %	DENSIDAD EQUIVALENTE DEL FMR (g/cm <sup>3</sup> )	Peso Muestra flotada (Pfl) (g)	Czf %	Czs %	Eficiencia Proceso beneficio %
Muestra inicial	1000	15.40	-	-	15.40	0	-
Tamiz ASTM No. 4	542.0	14,86	1.23	466.0	13.56	1.3	86
Tamiz ASTM No. 8	458.0	15.40	1.36	343.5	14,00	1.4	75

**Czi: cenizas de la muestra inicial; Czf: cenizas de la muestra flotada; Czs: cenizas separadas.**

La eficiencia del proceso se da en función del peso de carbón flotado con respecto a la muestra inicial de cada tamiz.

## 5. Conclusiones

Los resultados de las pruebas de operación del equipo registran 1,3% y 1,4% de separación de cenizas en las fracciones flotadas, para granulometrías pasantes por los tamices ASTM 4 y 8, respectivamente. En términos de rendimiento de proceso, se observa que de una carga de 542 g, con cenizas iniciales de 14,86% y granulometría pasante por tamiz 4, se recuperaron 466 g con 13,56% de cenizas; es decir, la eficiencia del proceso para estas condiciones es del 86%. En los mismos términos, para los resultados de la muestra pasante por tamiz 8, la eficiencia es del 75%.

Con base en los resultados obtenidos, se concluye que el equipo es funcional y el proceso es técnicamente viable. Como consecuencia de este mismo análisis, se evidencia la necesidad de optimizar el diseño del equipo a nivel de sistemas de control, para lograr mayores niveles de precisión y eficiencia en el proceso.

A través de esta investigación se ha desarrollado en laboratorio la adaptación tecnológica de un modelo de utilidad para un equipo de beneficio de minerales, con FMR.

Estos son igualmente producidos a partir de magnetita mineral de yacimientos colombianos.

## 6. Agradecimientos

Los autores agradecen el apoyo recibido por parte de Colciencias, la Gobernación de Boyacá, la Dirección de Investigaciones de la Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia y el Centro de Investigaciones de la Universidad Santo Tomás seccional Tunja, así como a los semilleros de investigación que participaron en este proyecto.

## Referencias

- Alcaide, M. J. Diego, J. A. y Artacho, M. A. (2004). *Diseño de producto. Métodos y técnicas*. Bogotá: Alfaomega:
- Ardila, M. A. Triviño, M. P., Torres, E. A. y Molina, C. P. (2010). Obtención de ferrofluidos a partir de magnetita mineral y determinación del efecto del tipo de fluido de transporte y la concentración de magnetita sobre la densidad. *InvestigiumIre*, 1(3), 69-73.
- Ashby, M. F. (2005). *Materials selection in mechanical design*. Cambridge: Elsevier
- Boothroyd, G., Dewhurst, P. y Knight, W. (2002). *Product design for manufacture and assembly*. Nueva York: Marcel Dekker Inc.

Cross, N. (1999). *Métodos de diseño. Estrategias para el diseño de productos*. Ciudad de México: Limusa y Noriega Editores.

Gubarevich, V. N. y Vidsota, S. V. (1994). Theoretical principles, present status and prospects for development of material separation in magnetic fluids. *Magnetic and Electrical Separation*, 5, 169-192.

Hibbeler, R. C. (1998). *Mecánica de materiales*. Ciudad de México: Prentice Hall-Pearson.

Homer, F., Quets, J. y Hatwell, U. (1975) Apparatus and process for the separation of particles of different density with magnetic fluids. (U.S. Patent 4.062.765).

Jensen, C., Helsel, J. y Short, D. R. (2002). *Dibujo y diseño en ingeniería*. Ciudad de México: McGraw-Hill.

Kojovic, T. (1994). Application of magstreamin mineral sands separation. *Magnetic and Electrical Separation*, 5, 231-263.

Konz, S. (2007). *Diseño de sistemas de trabajo*. México: Limusa.

Nakatsuka, K. (1993). Trends of magnetic fluid applications. *Journal of Magnetism and Magnetic Materials*, 122, 387-394.

Norton, R. L. (1999). *Diseño de máquinas*. Ciudad de México: Prentice Hall-Pearson.

Parmley, R. O. (1985). *Mechanical components handbook*. Chicago: McGraw Hill.

Reimers, G. Rholl, S. y Khalafalla S. (1974). Device and process for magneti-gravimetric particle separation using non-vertical levitation forces. (U.S. Patent 5.788.465).

Rosensweig, R. E. (1969). Material separation using ferromagnetic liquid techniques. (U.S. Patent 3.485.969).

Sandor, G. y Erdman, A. (1998). *Diseño de mecanismos. Análisis y síntesis*. Ciudad de México: Prentice Hall-Pearson.

Schey, J. A. (2002). *Procesos de manufactura*. Ciudad de México: McGraw-Hill.

Shigley, J. E. (1981). *Diseño en ingeniería mecánica*. Ciudad de México: McGraw-Hill.

Svoboda, J. (2004). Densimetric separation of coal using magnetic fluids. *Physical Separation in Science and Engineering*, 13(3-4), 127-139.

Triviño, M. P., Ardila, M. A., Torres, E. A. y Molina, C. P. (2012). *Informe Final proyecto de investigación "Desarrollo de materiales, procesos y equipos magnetorreológicos para beneficio de minerales"*. Tunja: UPTC, USTA, Colciencias y Gobernación de Boyacá.