

UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO



FACULTAD DE QUÍMICA

**Construcción de un dispositivo concentrador
gravimétrico del tipo tazón-ciclón para su
aplicación en arenas de playa**

TESIS

PARA OBTENER EL TÍTULO DE:

INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A:

JOSUE GUERRERO VIDAL

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD.MX.

2016





Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

JURADO ASIGNADO:

PRESIDENTE: **Profesor: Antonio Huerta Cerdán**

VOCAL: **Profesor: Faustino Juárez Sánchez**

SECRETARIO: **Profesor: Juan Manuel de la Rosa Canales**

1er. SUPLENTE: **Profesor: Samuel Kuperstein Aportela**

2° SUPLENTE: **Profesor: Juan Carlos Contreras Guzmán**

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: EDIFICIO D, FACULTAD DE QUÍMICA,
CIRCUITO INSTITUTOS S/N, COYOACÁN**

ASESOR DEL TEMA:

ANTONIO HUERTA CERDÁN

SUSTENTANTE:

JOSUE GUERRERO VIDAL

Agradecimientos

Es para mí un honor y causa de mi más profundo compromiso de agradecerle a México, a la Universidad Nacional Autónoma de México y a mis profesores la oportunidad de formarme e iniciarme académicamente.

Al honorable, paciente, generoso y virtuoso M. en C. Antonio Huerta Cerdán quien sin duda es una referencia.

A los jurados: M. en M. Juan Manuel de la Rosa Canales y Dr. Faustino Juárez Sánchez, por su tiempo, por confianza, por leer mi tesis y por sus acertados comentarios.

A mis padres: María Guadalupe y Daniel, por su amor, por ser la guía de todos mis pasos, por todo el apoyo brindado y por su dedicación de dar todo por sus hijos.

A mis hermanas: Abril y Daniela, por su comprensión y apoyo.

A mis amigos: Claudia, Antonio de Jesús, Guillermo, Rodrigo, Gaby, Ximena, Eliel, Leopoldo, Manuel, Isaura, Nydia, Ariadna, Avelino, Javier y Citlali, por sus palabras, apoyo y compañerismo.

A mi amigo y laboratorista: Antonio Salazar Pérez, por su tiempo, dedicación e incondicional apoyo.

A mis Amigos: David, Javier, Erick, por enseñarme y darme la oportunidad de saber que la de hermandad y coraje son armas para ser mejor día a día.

ÍNDICE

ÍNDICE.....	01
RESUMEN.....	04
INTRODUCCIÓN.....	05
HIPÓTESIS.....	06
OBJETIVOS.....	06
1. MARCO TEÓRICO.....	07
1.1 MINERÍA EN MÉXICO.....	08
1.1.1 HISTORIA DE LA MINERÍA EN MÉXICO.....	09
1.1.2 IMPACTO SOCIAL.....	11
1.1.3 SITUACIÓN ACTUAL.....	13
1.2 CONCENTRACIÓN DE MINERALES.....	15
1.2.1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	15
1.2.2 PRINCIPIOS DE CONCENTRACIÓN GRAVIMÉTRICA.....	17
1.2.3 TIPO DE CONCENTRADORES.....	22
1.3.4 EFICIENCIA DE LA CONCENTRACIÓN.....	24
1.3 MAGNETITA.....	25
1.3.1 IMPUREZAS DE LA ARENA.....	26
1.3.3 MINERALOGÍA DE LA MAGNETITA.....	27
1.3.2 HISTORIA DE LA MAGNETITA.....	28
1.4.3 APLICACIONES.....	29

1. 4 ESPECTROSCOPIA DE ABSORCIÓN ATÓMICA (EAA).....	30
1.5.1 COMPONENTES DEL ESPECTROFOTÓMETRO.....	30
1.5.2 DESCRIPCIÓN DE LA TÉCNICA DE EAA.....	31
2. DESARROLLO EXPERIMENTAL.....	32
2.1 METODOLOGÍA DE TRABAJO.....	33
2.2 DISEÑO DEL CONCENTRADOR TIPO TAZÓN-CICLÓN.....	34
2.3 SELECCIÓN DE MATERIALES.....	35
2.4 ARMADO DEL EQUIPO.....	36
2.5 ESTABLECIMIENTO DE PARÁMETROS DE TRABAJO.....	40
2.6 OPERACIÓN DEL CONCENTRADOR.....	41
2.7 CARACTERIZACIÓN EAA.....	42
3. RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS.....	44
3,1 ARMADO DEL CONCENTRADOR.....	45
3.2 EFECTO DEL TAMAÑO DE PARTÍCULA DE OPERACIÓN.....	50
3.3 EFECTO DE LA VELOCIDAD DEL FLUJO DE OPERACIÓN.....	54
3.4 EFECTO DEL TIEMPO DE RESIDENCIA DE LA PARTÍCULA.....	57
3.5 EFECTO DE CONCENTRACIÓN DE SÓLIDOS EN PESO EN LA PULPA DE ALIMENTACIÓN.....	59
3.6 BALANCES METALÚRGICOS.....	60

4. CONCLUSIONES.....	68
4.1 CONCLUSIONES.....	69
4.2 COMENTARIOS FINALES.....	70
5. BIBLIOGRAFÍA.....	71
5.1 BIBLIOGRAFÍA.....	72
APÉNDICE A.....	75
TABLA A. LISTA DE MATERIAL EMPLEADO EN LA CONSTRUCCIÓN DE EL TAZÓN-CICLÓN.....	76

Resumen

Como sabemos, en la actualidad la minería en México es muy importante y los procesos gravimétricos continúan teniendo una gran aplicación en la industria del beneficio de minerales, dado su bajo costo y la facilidad de traslado de equipos a sitios donde hay pocos servicios. Además de tener una relativa facilidad de operación por el bajo número de variables de control.

La concentración gravimétrica del tipo tazón-ciclón recientemente introducida al mercado, tiene principios similares a los de una columna de concentración (hidrociclón). En el presente estudio se ha diseñado, construido y experimentado un concentrador de este tipo, dado el criterio de concentración gravimétrica para concentrar menas de magnetita en arenas de playa, ya que en nuestro país se cuenta con 11 122 Km de línea costera tratando de disminuir los costos de los procesos de concentración convencionales.

En esta tesis se plantea la construcción de un tazón-ciclón para el laboratorio de beneficio de minerales del departamento de Ingeniería Química Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM, esto se inició con el diseño del equipo, la compra de los materiales, su construcción y la realización de pruebas de concentración para comprobar el correcto funcionamiento del equipo.

Las principales condiciones de operación obtenidas a través de este estudio sistemático del concentrador tipo tazón-ciclón construido en el laboratorio, fueron las siguientes: a) Tamaño de partícula malla #100 (149 μ m), b) Flujo de agua de 8.400 L/min, c) Tiempo de residencia de 30 minutos, d) Concentración de sólidos en peso en la pulpa en la alimentación de 1.61%.

Por último se realizaron los balances metalúrgicos al cambiar esta última condición para corroborar el funcionamiento del equipo al concentrar magnetita de las arenas de playa, obteniéndose % de Recuperación de Fe igual a 92.21

Introducción

Desde la época prehispánica, los nativos del valle de México usaron métodos muy rudimentarios, para explotar y beneficiar minerales tales como el oro, las piedras preciosas como el jade y la malaquita, las cuales eran utilizadas en la elaboración de ornamentos.

En 1521 con la llegada de Hernán Cortez a México se da el inicio del comercio de bienes minerales desde México hasta España y en 1532 se inicia la explotación de minas por los españoles en nuestro país. Hasta mediados del siglo XVI cuando la sed de riqueza impulsó a los españoles a emprender el descubrimiento mediante la exploración de minas, comenzó la verdadera industria minera en el país, que actualmente es muy importante para el desarrollo económico de México. [1]

Los procesos gravimétricos continúan teniendo una gran aplicación en la industria del beneficio de los minerales, dado sus bajos costos, la facilidad de traslado de equipos a sitios en donde hay pocos servicios, de tener una relativa facilidad de operación por el bajo número de variables de control, sin embargo, como desventaja estos equipos presentan una baja capacidad.

En años recientes se ha incrementado la fabricación de equipos cada vez más económicos que permitan al industrial su aplicación en la concentración en minerales auríferos. Uno de los equipos de reciente construcción y aplicación en el beneficio de minerales es el denominado tazón-ciclón del cual cabe mencionar, se carece de importante información bibliográfica. Resulta entonces interesante investigar la concentración gravimétrica vía tazón-ciclón y su aplicación en otro tipo de menas que estén dentro de la condición del criterio de concentración, de tal forma que se pueda operar en circuitos que complementen la concentración en menas del tipo arenas de playas con materiales paramagnéticos. Además de su aplicación, es importante por tanto analizar las variables de control que gobiernan a dicho proceso.

Hipótesis

Separar menas de magnetita contenidas en arenas de playa, empleando un equipo del tipo tazón-ciclón a partir del control de sus variables de operación, fabricado en las instalaciones del Departamento de Ingeniería Metalúrgica.

Objetivos

a) Construir un equipo de concentración del tipo tazón-ciclón y de fácil operación a nivel laboratorio, para el tratamiento de menas de magnetita e ilmenita que será de gran utilidad como equipo de concentración en el laboratorio de Beneficio de Minerales de la Facultad de Química, UNAM.

b) Determinar el efecto de las variables flujo de agua, tamaño de partícula, tiempo de residencia, concentración de sólidos en peso en la pulpa en la alimentación; en menas de magnetita.

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO

1.1 Minería en México

El sector minero en México es muy importante para el desarrollo del país. Según publicaciones recientes del Programa de Desarrollo Minero (Prodemin) 2013-2018, ya que la industria minera representa la cuarta fuente generadora de divisas, por detrás únicamente de la industria automotriz, la industria del petróleo y la industria eléctrica y electrónica. La minería es una de las actividades económicas de mayor tradición en México, practicada desde la época prehispánica y fuente de la expansión regional desde la época de la colonia. En el México independiente, la participación de la industria minera fue muy importante para el desarrollo económico del país, pero nunca exenta de conflictos sociales, dada la concentración de la riqueza de esta industria en pocas manos y una gran explotación que se hizo y se sigue ejerciendo sobre los trabajos mineros.

México es un territorio atractivo para los inversionistas ya que es el primer productor de plata, undécimo de oro y duodécimo de cobre. También es el segundo mayor productor de fluorita, el tercero más grande de bismuto y el quinto más grande de plomo. Según datos de la Secretaría de Economía la producción minera de México se divide en 34.18% oro, 19.7% cobre, 18.5% plata, 6.5% zinc, 4.6% hierro, 2.8% plomo, 1.6% carbón y 8.2% el resto en otros minerales [2].



Figura 1.1 Participación de los metales y minerales en el valor de la producción minero-metalúrgica en 2015 (213,462 Millones de pesos). Fuente INEGI. [3]

1.1.1 Historia de la minería en México

La minería es una actividad económica que siempre ha estado presente en el proceso histórico de México. Su importancia socio-económica requiere de la comprensión de los factores que la regulan y de los problemas que la aquejan; por ello se hace necesario conocer su historia, su geografía y sus técnicas de explotación y beneficio. [4]

Los antecedentes históricos pueden dividirse en cuatro periodos importantes:

- *Época prehispánica*, principalmente en el centro y sur del país se desarrolló la minería. Los nativos del valle de México recolectaban los minerales y metales en los ríos y lechos de torrentes. Posteriormente utilizaron métodos muy rudimentarios para explotar y beneficiar minerales tales como el cinabrio, calcita verde, fluorita, minerales de plata y plomo. También utilizaban metales como el oro y el cobre para la elaboración de ornamentos. [5]
- *Época de la colonia*, en este periodo los colonizadores europeos buscaban oro principalmente, ya que el mercantilismo marcaba como mayor fuente de riqueza los metales preciosos. Por esta razón, gran cantidad de españoles vinieron al denominado “nuevo mundo”. Los principales minerales extraídos eran el oro y la plata.

Junto con el desarrollo de la industria minera, se dio el desarrollo de la metalurgia, desarrollando distintas técnicas de extracción de metales a partir de los minerales, técnicas de concentración, de fundición, laminación y técnicas de acuñación bajo estricta supervisión y permiso de la corona española. [5]

- *México independiente*, en este lapso de tiempo la minería atravesó por una época de anarquía, al no tener ningún tipo de reglamentación; en cuanto a permisos e impuestos se refiere. Hasta el 1° de marzo de 1885 que la ley minera de los Estados Unidos Mexicanos comenzó a regir en toda la República Mexicana y así reorganizó la industria minera. Fue también en esta época que los avances tecnológicos de la Revolución industrial alcanzaron y mejoraron la industria minera. [4]
- *Porfiriato y Revolución*, a diferencia de los periodos anteriores, se comenzó a extraer una gran cantidad de metales de otra naturaleza como plomo, zinc, estaño y cobre. También en esta época se dan los primeros levantamientos de trabajadores mexicanos ocasionados por los abusos a los que eran sometidos, lo cual deriva en el inicio de La Revolución Mexicana. Hasta que en el año de 1917 se incluyó en la Constitución, el artículo 27 que permitía a México recuperar el control directo de los recursos minerales. [4]

1.1.2 Impacto Social

Las minas son por lo general el motor económico de muchas comunidades mexicanas. Hoy en día, las compañías mineras modernas tienden a trabajar con las comunidades de una manera cercana, buscando desarrollar programas económicos y proyectos que provean más que sólo empleos directos en la mina. Mediante la participación voluntaria en las comunidades, las compañías mineras en conjunto con otros actores locales (gobiernos locales, instituciones educativas, empresarios y agricultores) pueden generar sinergias de trabajo para garantizar que la población local, incluyendo los segmentos más pobres, puedan verse beneficiados por la presencia de nuevas inversiones, compartiendo el desarrollo potencial de la economía local.

Algunos de los beneficios colaterales que la minería brinda a las comunidades son: empleo en las industrias de construcción y servicios, educación, vivienda, electricidad, caminos, agua potable, servicios médicos, así como mejoras generales para incrementar la calidad de vida dentro de la comunidad, todo esto se traduce en el desarrollo económico de las comunidades, lo cual va generando un efecto de bola de nieve hacia todo el país. [2]

Las actividades relacionadas con la minería continúan siendo un componente importante del mercado laboral mexicano al proporcionar oportunidades de ingreso para mucha gente. Las inversiones en el sector minero han aumentado el empleo en zonas que tradicionalmente han tenido altas tasas de desempleo. La minería es hoy en día el segundo sector más importante en México, sólo detrás del petróleo, pero por delante del turismo, según la CAMIMEX. El número de empleos directos generados en la industria minera a Junio de 2013 ha aumentado a 338,143, mientras que el empleo indirecto alcanza los 1.6 millones de plazas, de acuerdo a datos del Instituto Mexicano del Seguro Social. En Junio de 2013, el empleo en el sector minero reportó un crecimiento de 3.1% en comparación con el mismo mes del año anterior. Los trabajos en el sector tienden también son 36% mejor remunerados que los trabajos en otros sectores. [2]

En 2012 la inversión del sector minero fue de US\$ 8.04 billones, que combinada con la inversión previa reportada en los datos desde 2007, la industria minera ha invertido U\$ 25.64 billones de dólares, lo que representa una cantidad increíble e histórica para este sector de la economía mexicana.

La plata es producida tanto como plata primaria como un subproducto de las operaciones de oro y metales básicos. En México existen ambos tipo de minas, en 2012, la producción mexicana de plata sumó 158.6 millones de onzas (4,496 ton), lo que condujo a México a ser el mayor productor mundial de plata.

Los estados con mayor producción minera son Sonora, Zacatecas, Chihuahua, Coahuila y Durango; en la categoría de los metales, la plata y el oro son los minerales más prominentes, seguidos por el cobre, zinc y plomo. En cuanto a los minerales no metálicos, el cemento y la bentonita dominan el panorama. [2]

1.1.3 Situación Actual

Hoy en día la producción minera en México se compone principalmente del procesamiento de menas de Oro (34.18%); Cobre (19.7%); Plata (18.5%); Zinc (6.5%); Fierro (4.6%); Plomo (2.8%); Carbón (1.6%) y otros (8.2%). Como se aprecia en la figura 1.1.3.1.

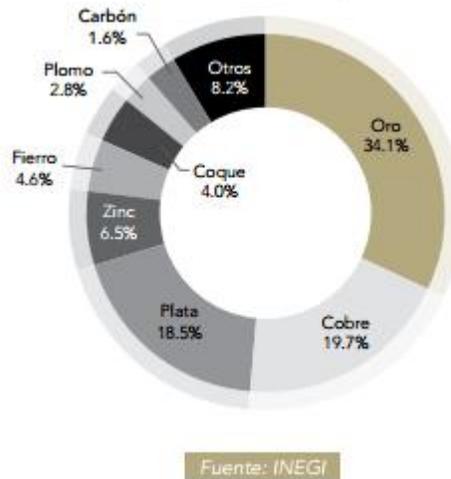


Figura 1.1.3.1 Participación de los metales y minerales en el valor de la producción minero-metalúrgica en 2015 (213 462 millones de pesos).[7]

La industria minera mexicana es un sector productivo que a través de su aportación económica, histórica y cultural, ha sido y seguirá siendo una de las palancas estratégicas que apoyen el desarrollo y crecimiento de México. En 2015 representó el 8.8% del PIB Industrial y 3.0 del PIB Nacional de acuerdo con datos de INEGI (3.9% del PIB Nacional considerando la minería ampliada). Con un crecimiento en la producción de este sector en apenas 1.7%, la balanza comercial minero-metalúrgica resultó aun positiva pero afectada por tercer año al descender 23.8%, este sector disminuyó nuevamente la generación de divisas respecto a 2014, tras alcanzar 14 mil 579 millones de dólares, ahora por debajo del sector automotriz, el electrónico, las remesas, el petróleo y el turismo, y por arriba de la actividad agroindustrial.[2]

Se estima que el sector minero mexicano alcanzará un valor de mercado de 17 mmd en el 2016, ya que el país se beneficiará de un entorno empresarial estable y de mejores políticas regulatorias.

Las principales entidades productoras del sector fueron Sonora con una participación de 24.9%, Zacatecas con 21%, Chihuahua con 12.2% y Coahuila con 4.5%.

La distribución de las minas y los minerales más importantes se muestran en la figura 1.1.3.2



Figura 1.1.3.2 Mapa de minas en México. Fuente: Proveedores de Minería.com

1.2 Concentración de minerales

Existen diferentes operaciones de concentración de minerales realizadas en equipos de formas y métodos distintos; estas pueden ser en seco o en agua dependiendo del tamaño del material a concentrar, la naturaleza del mismo y la operación posterior que se necesita.

Para todos ellos la operación básica es la separación por tamaños que permite separar un conjunto de partículas en dos o más porciones conforme a su tamaño, la concentración de minerales vía húmeda tiene como base la velocidad con que las partículas se mueven a través del fluido.

1.2.1 Fundamentos Teóricos

En el procesamiento de minerales la concentración usualmente se realiza a través de la vía húmeda en partículas minerales finas.

En el proceso de clasificación sólo se separan por tamaños el mineral y en el proceso de concentración se aprovechan las propiedades físicas (densidad, magnetismo, etc.) o fisicoquímicas (flotabilidad) de los minerales o metales, siendo los procesos más comunes los siguientes:

- **Gravimétrica:** la separación se efectúa aprovechando la diferencia de densidades de las especies minerales a separar; se utiliza particularmente en la concentración de minerales muy densos o muy livianos. Cuanto mayor sea la diferencia de densidades de los minerales, más efectiva será su separación. La concentración por gravedad no usa reactivos, pero sí usa una cantidad considerable de agua.

- Separación magnética: proceso de concentración en el cual se aprovecha la atracción de ciertos minerales hacia un campo magnético, para separarlos de otros que no son afectados o que son afectados en menor medida.[6]
- Por flotación: la flotación es un proceso físico químico complejo. Al igual que otras técnicas de concentración requiere que las especies minerales útiles tengan un grado de liberación adecuado. El proceso se basa en la adhesión selectiva de partículas de especies minerales a burbujas de aire dispersas en un medio acuoso. El desarrollo de la flotación está vinculado al descubrimiento progresivo de ciertas sustancias químicas de carácter orgánico, que incorporadas a una pulpa, presentan la facultad de conferirle propiedades de hidrofobicidad y a la vez de flotabilidad en forma selectiva o semi-selectiva a ciertas especies minerales útiles. La flotación se usa para separaciones complejas de minerales que no se prestan para separación por gravedad u otros métodos debido a propiedades similares de gravedad específica, propiedades magnéticas, u otras propiedades físicas. Este proceso es realizado con reactivos de flotación que permiten la selectividad de la mena promoviendo que una parte de la mena (valor) sea afín al agua (hidrofílica) y que las partículas floten. Entre las variables más importantes de la flotación están: Tamaño de partícula, tipo de reactivos, dosificación de los reactivos, densidad de la pulpa, aireación y acondicionamiento, regulación del pH, tiempo de residencia, temperatura, calidad del agua, etc. [6]

1.2.2 Principios de concentración Gravimétrica vía húmeda

Los concentradores gravimétricos consisten en una columna de separación en la cual se eleva un fluido a una velocidad uniforme (fig.1). Las partículas que se introducen se asientan o se elevan según sus densidades y de sus velocidades terminales son mayores o menores que la velocidad ascendente del fluido. [8]

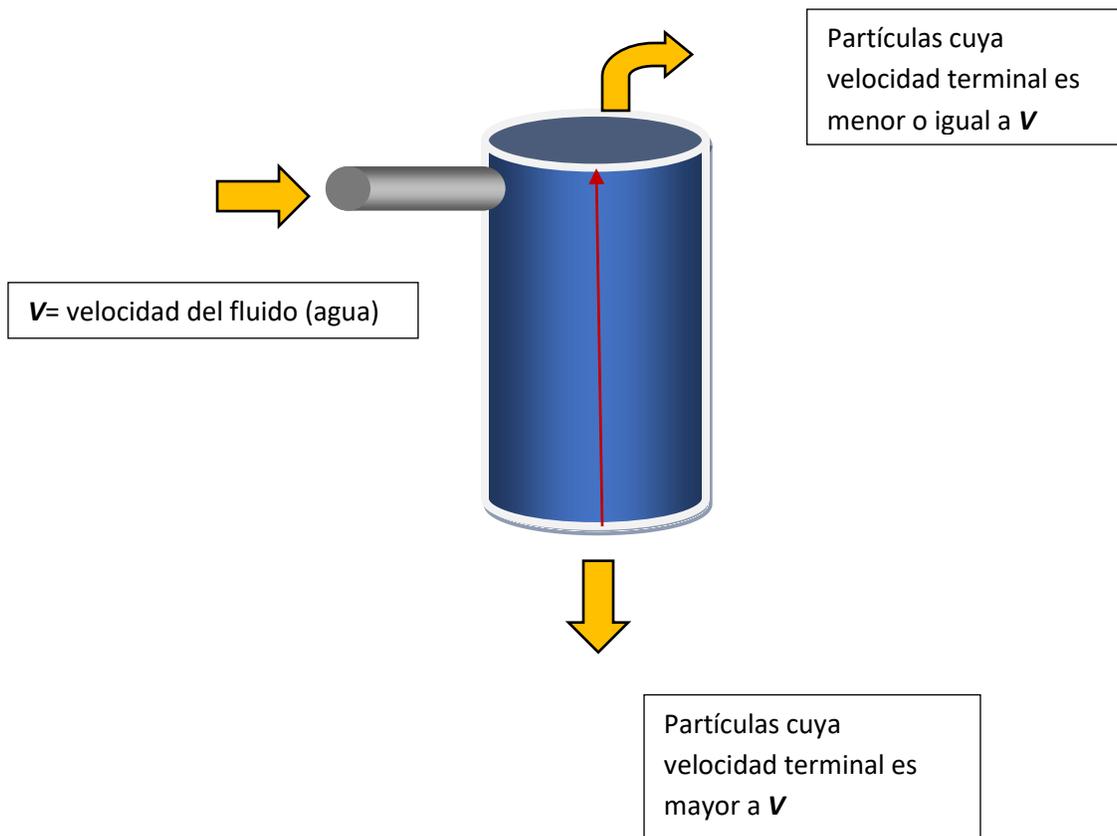


Figura 1.2.1.1 Columna de concentración [9]

Las partículas dentro de los rectores experimentan asentamientos que pueden ser del tipo libre u obstruido.

Asentamiento libre

El asentamiento libre se refiere al asentamiento de partículas en un volumen de un fluido, el cual es mucho mayor con respecto al volumen total de las partículas por lo tanto el volumen del conjunto de partículas es despreciable. Para pulpas bien dispersadas, predomina el asentamiento libre cuando el porcentaje de sólidos en la pulpa es menor al 15%. [8]

Si se considera una partícula esférica de diámetro d y densidad ρ_s que cae por gravedad en un fluido viscoso de densidad ρ_f , se tiene entonces que sobre la partícula actúan tres fuerzas: hacia abajo la fuerza de gravedad, hacia arriba la fuerza de empuje debido al fluido desplazado y hacia arriba la fuerza de arrastre que actúa (fig. 1.2.1.2).

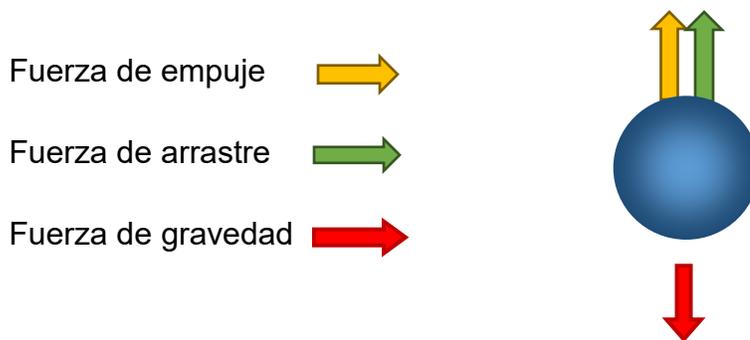


Figura 1.2.1.2 Diagrama de fuerzas sobre una partícula en un medio fluido. [6]

Por lo tanto las fuerzas que actúan en el asentamiento libre están referidas en las siguientes ecuaciones:

$$\text{La fuerza de gravedad es: } F_g = ma \quad (\text{Ec.1.2.2.1})$$

$$\text{La fuerza de empuje es: } F_e = ma \frac{\rho_s}{\rho_f} \quad (\text{Ec.1.2.2.2})$$

$$\text{La fuerza de arrastre es: } F_a = C_D \rho_f A \frac{v^2}{2} \quad (\text{Ec.1.2.2.3})$$

Realizando el balance de fuerzas correspondiente:

$$F_T = F_g - F_e - F_a \quad (\text{Ec.1.2.2.4})$$

Por lo tanto:

$$m \frac{dV}{dt} = ma - \frac{m\rho_l g}{\rho_s} - \frac{C_D \rho_l A V^2}{2} \quad (\text{Ec.1.2.2.5})$$

Si las tres fuerzas se equilibran ($dV/dt=0$ y $V=V_t$) la velocidad de sedimentación es constante y se denomina velocidad terminal de sedimentación por lo que se obtiene la siguiente expresión:

$$V_t^2 = \frac{2g(\rho_s - \rho_l)m}{A\rho_s C_D \rho_l} \quad (\text{Ec.1.2.2.6})$$

Considerando partículas esféricas ($V=\pi D^3/6$) sustituyendo los valores de m y A en la ecuación anterior, se obtuvieron las siguientes ecuaciones:

$$V_t^2 = \frac{4(\rho_s - \rho_l)gd}{3C_D \rho_l} \quad (\text{Ec.1.2.2.7})$$

El coeficiente de arrastre C_d está en función del número de Reynolds. En la región de flujo laminar o Región de Stokes.

$$C_d = \frac{24}{Re} = \frac{24\mu}{dV\rho_l} \quad (\text{Ec.1.2.2.8})$$

Sustituyendo C_d en la ecuación general de sedimentación se obtiene la Ley de Stokes para partículas sedimentando libremente en flujo laminar

Por lo tanto, la velocidad terminal de una partícula (v), correspondiente a la Ley de Stokes, en donde la fuerza de arrastre sobre una partícula esférica se debe únicamente a la resistencia viscosa, la cual que se expresa como:

$$V = \frac{gd^2(\rho_s - \rho_f)}{18\mu} \quad (\text{Ec.1.2.2.9})$$

Donde:

“g” es la aceleración de la gravedad y μ corresponde a la viscosidad del fluido; aplicable a partículas menores de 50 μm . [10]

Para partículas mayores a 50 μm el fluido stokesiano sufre una modificación, en donde se considera que la fuerza de arrastre sobre una partícula esférica se debe únicamente a la resistencia turbulenta y se expresa este flujo newtoniano como:

$$V = \left(\frac{3.33gd(\rho_s - \rho_f)}{\rho_f} \right)^{\frac{1}{2}} \quad (\text{Ec.1.2.2.10})$$

Las ecuaciones 1.2.2.9 y 1.2.2.10 muestran que la velocidad terminal de una partícula en un fluido particular, está dada en función de la densidad y del tamaño de la partícula. Por lo que a) si dos partículas tienen la misma densidad, la mayor velocidad terminal la tiene la de diámetro mayor y b) si son del mismo diámetro, su velocidad está determinada por la de mayor densidad siendo la que alcanza más rápidamente la velocidad terminal.

Para dos partículas de densidades (ρ_a, ρ_b) y diámetros (d_a, d_b) diferentes que en un fluido de densidad ρ_f a la misma velocidad de asentamiento, se tiene que:

$$\frac{d_a}{d_b} = \left(\frac{\rho_a - \rho_f}{\rho_b - \rho_f} \right)^n \quad (\text{Ec.1.2.2.11})$$

Donde:

$n=0.5$ para partículas pequeñas que obedecen la ley de Stokes.

$n=1.0$ para partículas grandes que obedecen la ley de Newton.

Asentamiento obstruido

A medida que el % de sólidos en peso aumenta en la pulpa, las partículas interfieren unas con otras en sus movimientos de caída libre. Por esta razón el sistema empieza a comportarse como un medio pesado cuya densidad es mayor a la del líquido.

A este sistema, en el que las partículas se mueven con una velocidad ligeramente menor a su velocidad máxima debido a la interferencia entre partículas, se denomina asentamiento retardado.

La resistencia al movimiento de las partículas es mayor debido a la turbulencia creada. Cuanto más baja sea la densidad de las partículas, más marcado será el efecto de la reducción de la densidad efectiva y mayor será la reducción de la velocidad máxima. De forma similar, cuanto mayor es el tamaño de partícula, mayor es la reducción en la velocidad de caída a medida que la densidad de pulpa aumenta. Esto es importante en el diseño del concentrador, el asentamiento retardado reduce el efecto del tamaño de partículas, mientras que aumenta el efecto de la densidad en la concentración. [9]

El radio de asentamiento retardado siempre es mayor que el radio de asentamiento libre. Cuanto mayor sea la densidad de pulpa, mayor será la diferencia entre ambas razones.

En la práctica, los concentradores de asentamiento retardado son usados para aumentar el efecto de la densidad en la separación, mientras que los concentradores de asentamiento libre trabajan con pulpas menos densas para incrementar el efecto del tamaño en la separación.

Para dos partículas de densidades (ρ_a, ρ_b) y diámetros (d_a, d_b) diferentes que caen en un fluido de densidad ρ_p a la misma velocidad de asentamiento, se tiene que:

$$\frac{d_a}{d_b} = \left(\frac{\rho_a - \rho_p}{\rho_b - \rho_p} \right)^1 \quad (\text{Ec.1.2.2.12})$$

Donde ρ_p es la densidad de la pulpa.

1.2.3 Tipos de concentradores

Dependiendo de la dirección del flujo de la corriente portadora de las partículas, los Concentradores se agrupan en:

- Concentradores hidráulicos o de corriente vertical, son normalmente del tipo de asentamiento obstruido.
 - Concentradores de corriente horizontal, son principalmente de sentamiento libre.
-
- Concentradores hidráulicos o de corriente vertical

En ellos se utiliza agua adicional a la pulpa de alimentación introducida en dirección opuesta a las partículas que se están asentando. Por lo general este tipo de concentradores consiste en una serie de columnas de separación, donde se hace pasar una corriente vertical de agua que permite la concentración del mineral (Fig. 1.2.3.1).

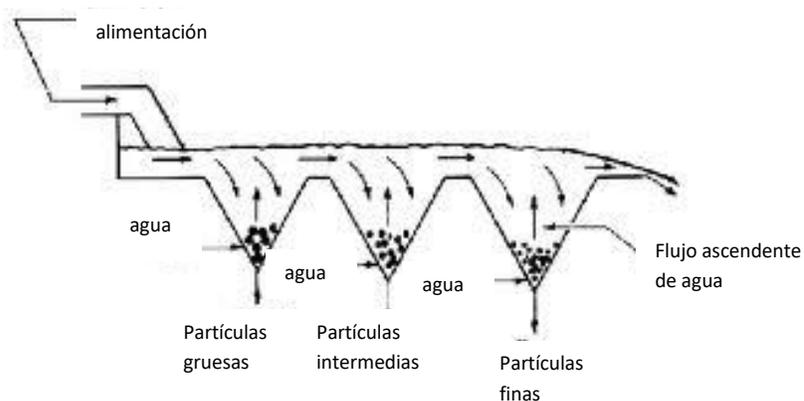


Figura 1.2.3.1 Concentrador hidráulico [7]

- Concentrador corriente horizontal
 - concentrador mecánicos

En el proceso de concentración el material de más baja velocidad de asentamiento es llevado en el derrame de líquido y el de más alta velocidad de asentamiento se queda en el fondo del equipo para posteriormente ser separado mediante algún medio mecánico.

Este tipo de concentradores son capaces de soportar alimentaciones irregulares y fáciles de controlar. Pero su capacidad se ve restringida cuando tratan materiales extremadamente finos. [7]

- Hidrociclones

Este es el método de clasificación más utilizado en planta concentradora en los circuitos de molienda fina que preceden a la flotación, debido a su funcionamiento por acción centrífuga acelerando la concentración de partículas finas.

Dentro del ciclón la partícula permanece un corto tiempo por lo que el circuito del molino se puede balancear rápidamente si se cambia cualquier variable y se reduce la oxidación de las partículas de los minerales sulfurados para después introducirlas al circuito de flotación

Normalmente estos ciclones tienen un diámetro que varía de 6 a 33 pulgadas y un ángulo en la sección cónica que varía de 15 a 20 grados. Estos son alimentados normalmente con una bomba centrífuga especialmente diseñada con una presión que varía entre 5 y 40 psi. [6]

1.2.4 Eficiencia de la concentración

Esta es una relación entre la fracción de la alimentación que se va a la corriente de descarga (underflow) para cada intervalo de tamaño. Por lo tanto el flujo másico de la descarga (T) entre el flujo másico de la alimentación (P) en las respectivas fracciones en peso retenidas en la malla i como se muestra en la siguiente ecuación:

$$E = \frac{\text{Peso de las partículas de tamaño } i \text{ en el underflow}}{\text{Peso de las partículas de tamaño } i \text{ en la alimentación}} = \frac{T}{P} \quad (\text{Ec.1.3.4.1})$$

Cuando todas las partículas más finas son arrastradas por la corriente de derrame (overflow) y las más gruesas por la corriente de descarga (underflow), se dice que es una concentración ideal. Pero esto no ocurre ya que siempre habrá partículas finas en la descarga. [8]

1.3 Magnetita

Es un mineral de hierro que forma parte de un grupo de minerales llamados óxidos; usualmente la magnetita puede ser identificada a causa de su gran magnetismo, y por su color oscuro. Debe su nombre de la ciudad griega de Magnesia. No es muy abundante, pero puede encontrarse en diferentes tipos de rocas ígneas, metamórficas y sedimentarias, hasta en algunos meteoritos. La mayoría de las rocas ígneas que se forman en las profundidades contienen una pequeña cantidad de cristales de magnetita. La magnetita también puede encontrarse en las rocas metamórficas que se formaron de las rocas sedimentarias ricas en hierro. En la antigüedad se la conocía como piedra imán.

La magnetita presenta una densidad de 5.18 g/cm^3 , cristaliza en el grupo espacial $Fd3m$ y su celda unidad en el sistema cúbico, con parámetro de red $a = 0,8395 \text{ nm}$, está compuesta por 8 fórmulas moleculares para un total de 56 iones: 32 oxígenos y 24 hierros. En la estructura los dos diferentes sitios cristalinos (que resultan tener geometría de tetraedros y octaedros en relación con los átomos de oxígeno) forman la base para dos subredes cúbicas yuxtapuestas con contribuciones de momento magnético desiguales y anti paralelos. (Fig. 1.3)

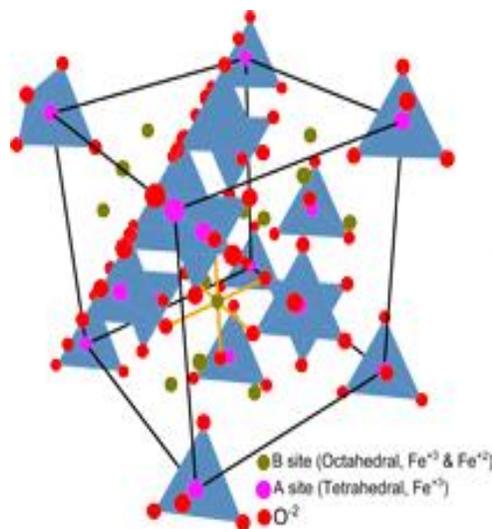


Figura 1.3 Estructura cristalina de la magnetita con el grupo espacial $Fd3m$ de red cúbica. [11]

1.3.1 Impurezas de la arena

La arena de playa puede estar formada por restos orgánicos (conchas, esqueletos de animales, caracolas, etc.) o por restos de rocas y minerales procedentes, de la erosión de barrancos y de la sedimentación marina.

Cada playa y zona arenosa tiene su propia historia geológica que al mismo tiempo, depende de su localización geográfica, de la dirección del viento y del movimiento de las corrientes marinas entre otros factores.

La arena de estudio puede contener magnetita, cuarzo, feldespatos, ilmenita, zircón, principalmente. Cómo se observa en la tabla 1.3.1.

Tabla 1.3.1 Densidades de impurezas presentes en minerales de magnetita

Componente	Densidad (g/cm ³)
Magnetita	5.40
Cuarzo	2.65
Feldespato	2.61
Ilmenita	4.70
Zircón	4.63
Sílice	2.63

1.3.2 Mineralogía de la magnetita

Tabla 1.3.2 Propiedades de la magnetita.

Brillo	Metálico
Color	Negro
Raya	Negra
Dureza	5.5-6.5
Exfoliación	Irregular
Fractura	Irregular
Transparencia	Opaco
Densidad	5.4 g/cm ³



Figura 1.4.1 Magnetita [12]

1.3.3 Historia de la magnetita

Desde las rutas comerciales hasta la conquista, el desfile de la historia humana habría sido muy diferente sin las propiedades magnéticas de este mineral negro. Mucha gente asume que el nombre de la magnetita se deriva de sus propiedades magnéticas, pero el término 'magnet' (imán) en realidad proviene del mineral. "*Magnetita*" lleva su nombre por la región de Magnesia de Tesalia, Grecia, el hogar de los imanes y un importante centro de producción de hierro. La importancia histórica de los depósitos minerales de esta región se refleja en otros dos elementos, magnesio y manganeso, que también fueron nombrados por esta región. [12]

Desde el año 800 a.C (primeros escritos por los griegos sobre la propiedad magnética), los dos minerales de hierro económicamente más importantes son la hematita y la magnetita. Aunque la hematita es más abundante que la magnetita, ésta última tiene un mayor contenido de hierro, por lo que los depósitos de mineral de hierro de magnetita son muy codiciados. Los depósitos de magnetita económicos se encuentran principalmente en capas de las rocas ígneas que se formaron desde el lento enfriamiento del magma, depósitos sedimentarios minerales pesados, y a comienzos de precipitaciones marinas del Proterozoico (hace 2.5 a 1.6 mil millones de años). El hierro de los depósitos de magnetita y hematita es la fuente del acero utilizada casi universalmente a través de la infraestructura física de nuestra sociedad moderna. Sin estos dos minerales, la sociedad humana, literalmente, no habría llegado a la edad de hierro, y mucho menos a la civilización moderna.

La importancia de mineral de hierro en la sociedad humana es más que obvia, pero la magnetita también ha jugado un papel más sutil, pero de todos modos históricamente importante en la civilización humana. Al principio, la gente descubrió que al golpear imanes de magnetita contra piezas de hierro se podría magnetizar este último. Este hierro magnetizado se utilizó para hacer los primeros

compases, que expandió en gran medida nuestra capacidad de navegar los océanos del mundo. Así que la magnetita no sólo proporcionó la base para gran parte de la infraestructura de la sociedad humana, sino que también jugó un papel importante en la exploración y la ruta comercial de desarrollo, junto con las implicaciones históricas de una mayor interacción entre las culturas ampliamente separadas. [12]

1.3.4 Aplicaciones de la magnetita

- Se utiliza como mineral: unido con la hematita es una de las menas más importantes, al contener un 72% de hierro (es el mineral con más contenido en hierro).
- En las calderas (industrias): la magnetita es un compuesto muy estable a altas temperaturas, aunque a bajas temperaturas o en presencia de aire húmedo a temperatura ambiente se oxide lentamente y forme óxido férrico. Su gran estabilidad a altas temperaturas hace que sea un buen protector del interior de los tubos de la caldera. Es por ello que se hacen tratamientos químicos en las calderas industriales que persiguen formar en el interior de los tubos capas continuas de magnetita.
- En la construcción: se usa como añadido natural de alta densidad (4,65 hasta 4,80 kg/L) en hormigones, especialmente para protección radiológica.
- En los seres vivos: la magnetita es usada por diferentes animales para orientarse en el campo magnético de la tierra. Entre ellas las abejas y los moluscos. Las palomas tienen en el pico pequeños granos de magnetita que determinan la dirección del campo magnético y les permiten orientarse. También pequeñas bacterias tienen cristales de magnetita de 40 hasta 100 nm en su interior, rodeadas de una membrana dispuestas de modo que forman una especie de brújula y permiten a las bacterias nadar siguiendo líneas del campo magnético.[12]

1.4 Espectroscopia de Absorción Atómica (EAA)

El término espectroscopia se refiere a la observación y el estudio del espectro, que se tiene de una especie tal como una molécula, un ion o un átomo, cuando estas especies son excitadas por alguna fuente de energía que sea apropiada para el caso.

La Espectroscopia de Absorción Atómica tiene como fundamento la absorción de radiación de una longitud de onda determinada. Esta radiación es absorbida selectivamente por átomos que tengan niveles energéticos cuya diferencia en energía corresponda en valor a la energía de los fotones incidentes. La cantidad de fotones absorbidos, está determinada por la ley de Beer, que relaciona ésta pérdida de poder radiante, con la concentración de la especie absorbente. [13]

1.4.1 Componentes de un espectrómetro de absorción atómica

Los principales componentes de un espectrómetro de absorción atómica son:

- a) Una fuente de radiación que emita una línea específica correspondiente a la necesaria para efectuar una transición en los átomos del elemento analizado.
- b) Un nebulizador, que por aspiración de la muestra líquida, forme pequeñas gotas para una atomización más eficiente.
- c) Un quemador, en el cual por efecto de la temperatura alcanzada en la combustión y por la reacción de combustión misma, se favorezca la formación de átomos a partir de los componentes en solución.
- d) Un sistema óptico que separe la radiación de longitud de onda de interés, de todas las demás radiaciones que entran a dicho sistema.
- e) Un detector o transductor, que sea capaz de transformar, en relación proporcional, las señales de intensidad de radiación electromagnética, en señales eléctricas o de intensidad de corriente.

- f) Un amplificador o sistema electrónico, que como su nombre lo indica amplifica la señal eléctrica producida, para que en el siguiente paso pueda ser procesada con circuitos y sistemas electrónicos comunes.
- g) Por último, se requiere de un sistema de lectura en el cual la señal de intensidad de corriente, sea convertida a una señal que el operario pueda interpretar (ejemplo: absorbancia). Este sistema de lectura, puede ser una escala de aguja, una escala de dígitos, un graficador, una serie de datos que pueden ser procesados a su vez por una computadora, etc.

La técnica más ampliamente utilizada hoy en día es la EAA, para determinar elementos metálicos. Esta técnica es de costo relativamente bajo y se aplica a una gran cantidad de muestras.[13]

1.4.2 Descripción de la técnica de EAA

La muestra en forma líquida es aspirada a través de un tubo capilar y conducida a un nebulizador donde está se desintegra y forma un rocío. Las gotas producidas son conducidas a una flama, donde se producen una serie de eventos que originan la formación de átomos. Estos átomos absorben cualitativamente la radiación emitida por la lámpara y la cantidad de radiación absorbida está en función de su concentración. La señal de la lámpara una vez que pasa por la flama llega a un monocromador, que tiene como finalidad el discriminar todas las señales que acompañen la línea de interés. Esta señal de radiación electromagnética llega a un detector o transductor y pasa a un amplificador y por último a un sistema de lectura. [13]

CAPÍTULO 2

DESARROLLO EXPERIMENTAL

2.1 Metodología de trabajo

A continuación se presenta un diagrama de bloques en el cual se muestran los puntos más importantes del desarrollo experimental de esta tesis.



Figura 2.1 Diagrama del desarrollo experimental.

2.2 Diseño del concentrador tipo tazón-ciclón.

Después de haber realizado una búsqueda bibliográfica con respecto a los recientemente creados concentradores tazón-ciclón y no haber encontrado documentación teórica al respecto, se realizó una investigación bibliográfica audiovisual vía internet sobre el denominado "blue-bowl" o tazón azul, con el fin de determinar las dimensiones del equipo a construir para separar en este caso, minerales de magnetita e ilmenita de arena de playa. [14][15][16]

Una vez determinadas las relaciones dimensionales del equipo se efectuó el trazo de un plano con las dimensiones de las diferentes partes del equipo de concentración las cuales estuvieron clasificadas como:

a) Tazón; pieza que es de suma importancia ya que en ella se llevará a cabo la concentración del mineral de interés, en éste se genera un vórtice por el cual las partículas de baja densidad saldrán por el derrame, las partículas de alta densidad permanecerán en el tazón mismo y un alimentador de flujo laminar tangencial por donde entrará el fluido de agua.

b) Bomba; es el elemento encargado de circular, alimentar en forma constante y recircular el fluido de agua para realizar la separación gravimétrica. Esta es una bomba para lodos sumergible la cual puede transportar partículas finas en los contenedores y a su vez recircular a las mismas dentro del concentrador.

c) Ductos de fluidos; estos deben de ser flexibles y relativamente resistentes a la abrasión, dado el bajo porcentaje de sólidos en peso en la pulpa, así como el movimiento de ésta.

d) Llave o válvula; elemento de control que ayuda a regular el flujo.

e) Contenedores y trampas; consta de 4 contenedores de los cuales el exterior sólo se utiliza para contener a todo el equipo y fluido (contenedor primario) y en forma de ortoedro. Los otros tres serán empleados como elementos trampa de retención, dos de ellos de forma cono truncado y uno de forma cilíndrica. Un cono truncado deberá tener mayor altura y un diámetro similar al del tazón ya que éste

servirá de base. El segundo cono trunco será de menor tamaño y a su vez el cilindro recto menor que éste.

2.3 Selección de materiales

Una vez efectuada la revisión audiovisual del concentrador, se escribió un listado de las partes más importantes del equipo así como los materiales a utilizar para la construcción del mismo. [16]

La selección del material estuvo en función de las condiciones de uso y operación bajo las cuales estaría operando el equipo.

Para la sección tazón se empleó un material ligero que pudiese soportar la acción de la corrosión y de fácil maquinado para su geometría. La elección del material fue aluminio.

Para el caso de bomba y ductos de fluidos se consideró también el soporte de altas resistencias al desgaste y manejo de pulpas.

En cuanto a la elección de los contenedores se tomó en cuenta las dimensiones de cada uno de ellos; para que tuvieran la capacidad de soportar la recirculación de agua y que quedaran uno dentro del otro para generar una especie de filtro o trampa para los medios y las colas.

En el anexo A se presenta la lista de materiales comprados y empleados en la construcción del concentrador.

2.4 Armado del equipo

A través del apoyo del Taller Mecánico del Departamento de Ingeniería Metalúrgica se fabricó el alimentador tangencial del fluido al tazón, que consistía de una pieza de aluminio que posteriormente se uniría al molde.

Una vez entregada la pieza fabricada tal y como se especificó en el plano, Figura 2.4.1, se unieron las piezas a través de un pegamento adhesivo, previa limpieza y secado de superficies.

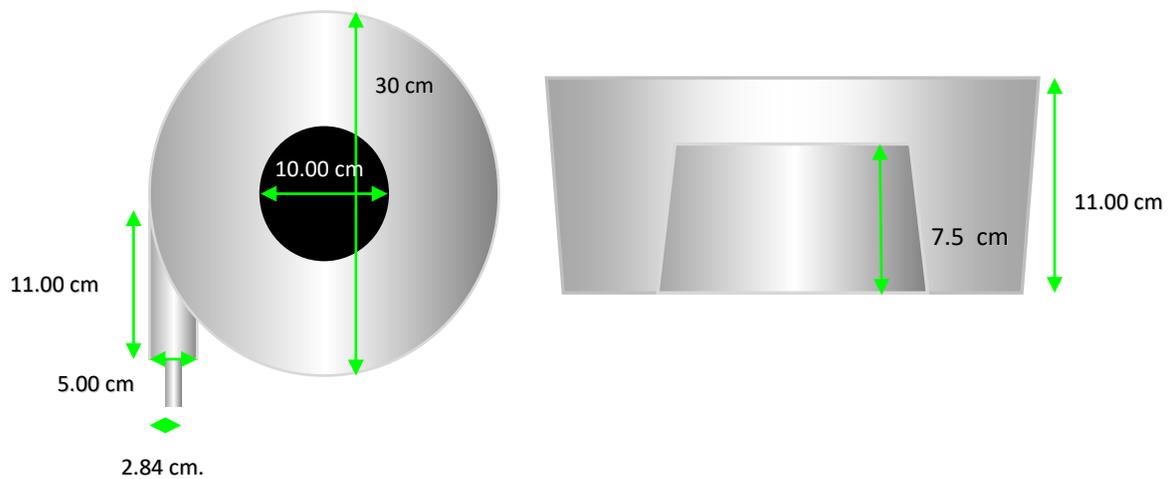


Figura 2.4.1.- Plano del concentrador tipo tazón-ciclón.



Figura 2.4.2.- Concentrador fabricado en el taller mecánico del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, UNAM.

Una vez que el taller mecánico entregó el concentrador, figura 2.4.2, se tomó el cono trunco de mayor capacidad y se le hicieron unos cortes de manera que se pudiese asentar el concentrador, como se muestra en la figura 2.4.3.

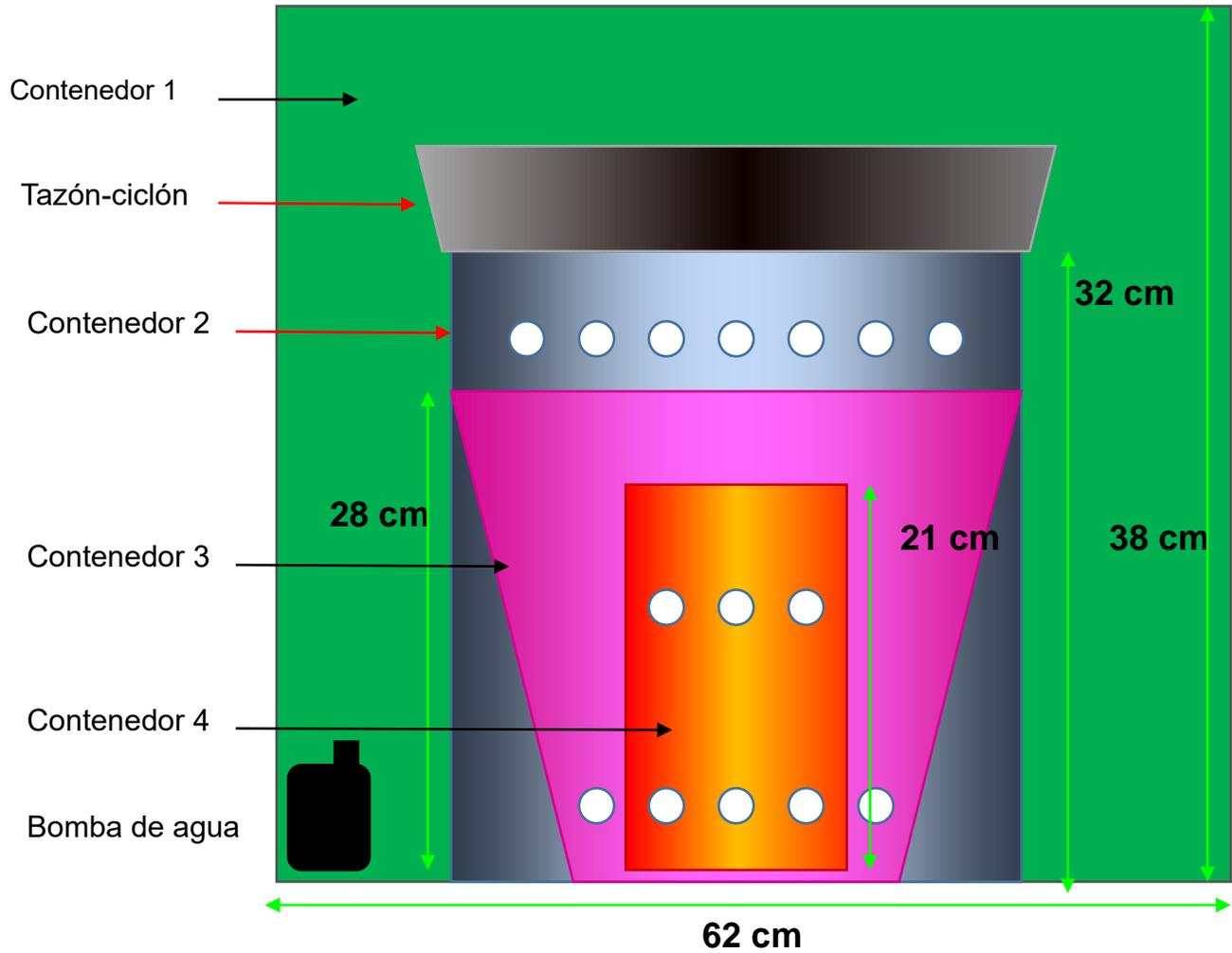


Figura 2.4.3.- Plano de contenedores del concentrador tipo tazón-ciclón.

Después se perforó con la ayuda de un taladro, con el fin de retener los finos, conforme al plano de contenedores del concentrador tipo tazón-ciclón (Figura 2.4.3 y 2.4.4).



Figura 2.4.4.-Proceso de armado de la trampa principal (trampa para finos).

De igual manera se perforó el segundo como truco y el cilindro recto para que estos contenedores cumplan la función de trampas para medios (Figura 2.4.5). Ayudando también a que las partículas finas no lleguen hasta el contenedor primario porque estas podrían ser arrastradas por nuestra bomba hasta el concentrador.



Figura 2.3.5.-Contenedores o trampas para retener medios a) cilíndrico y b) cónico (perforados por taladro).

Se unió la válvula de esfera o bola a los conectores macho; uno de cada lado con el posterior sellado de coplee - conector.

Posteriormente se cortó la manguera en dos tramos y se colocaron en las uniones de cada coplee; cada una de estas uniones se aseguró con una abrazadera.

Con la ayuda de unos cinchos y el taladro esta union fue fijada en el contenedor primario tal como se muestra en la figura 2.4.6.



Figura 2.4.6.Union de llave, conector macho, coplee y manguera; con abrazaderas, cemento azul para pvc y cinchos de plástico.

Por último se conectó un extremo de la manguera a la bomba y otro a la boquilla del concentrador.

Posteriormente se revisó la funcionalidad del equipo, realizando pruebas para asegurar que no existieran fugas de agua, obstrucciones en la bomba y lo más importante; la separación del mineral.

Este dispositivo concentrador fue construido tomando como base los fundamentos teóricos de un hidrociclón pero reduciendo la altura de la columna y aumentando el diámetro de del vórtice para prolongar el tiempo de residencia de la partícula con el fin de lograr la permanencia de mayor cantidad de partículas con valor, en el Tazón-Ciclón.

2.5 Establecimiento de parámetros de trabajo en el concentrador del tipo tazón-ciclón.

Se efectuaron los cálculos correspondientes a las velocidades terminales para cada tamaño de partícula (número de malla) para el mineral de arena de playa experimentado, con lo que se establecieron las condiciones de trabajo.

Posteriormente se cribó la arena de playa con contenidos de magnetita para obtener y descartar los tamaños en los cuales no era adecuado realizar la separación de mineral, lográndose una homogenización en el tamaño de partícula.

Una vez determinado y clasificado el mineral por tamaños de partícula, se procedió a determinar las variables que controlan el proceso de separación de mineral en el tazón-ciclón, los cuales se describen en los siguientes pasos:

- a) Como primera etapa se obtuvo el tamaño de partícula de operación; éste se determinó realizando la concentración de mineral en el tazón-ciclón a un flujo y tiempo determinado. Posteriormente se determinó la ley de Fe en cada producto, vía Espectroscopía de Absorción Atómica y la realización del balance metalúrgico correspondiente.
- b) La segunda etapa fue la determinación del flujo de operación; ésta se determinó realizando la concentración de mineral en el tazón-ciclón a diferentes flujos y a un tamaño de partícula fijo. Posteriormente se enviaron los concentrados para su análisis químico correspondiente.
- c) Como tercer etapa se estudió el tiempo de residencia; la cual se determinó a través de toma de muestras a diferentes tiempos de operación manteniendo el tamaño de partícula y flujo constantes, con el correspondiente análisis químico de Fe en el producto concentrado.
- d) Y como etapa final se estudió el efecto de la concentración de sólidos en peso en la pulpa dentro del tazón-ciclón sobre la calidad de Fe en el concentrado, llevando a cabo pruebas con tamaño de partícula, flujo y

tiempo de residencia constantes. Posteriormente fueron analizados los productos vía EAA.

2.6 Operación del concentrador

En la etapa inicial de la operación se colocaron los contenedores, uno dentro del otro, como se muestra en la figura 2.4.3, del más pequeño al más grande. Posteriormente se llenaron de agua los contenedores del más pequeño al más grande hasta el 75% aproximadamente del contenedor más grande.

Se introdujo la bomba en el contenedor primario colocándola en una esquina inferior (no se debe conectar la bomba antes de ser sumergida en el fluido).

Se conectó una manguera que une la descarga de la bomba al concentrador de aluminio. Éste último se colocó encima del segundo contenedor más grande. Como siguiente etapa la bomba fue encendida y se procedió a que el flujo del agua alcanzara el estado estable. Este flujo fue determinado y fijado en pruebas anteriores.

Se pesó la cantidad mineral previamente establecida, se colocó en un vaso de precipitados y se humedeció el mineral. Con la ayuda de una piseta se bajó el mineral provocando un derrame dentro del concentrador. Este debió adicionarse después de la salida del agua.

Se dejó encendida la bomba hasta el tiempo de operación establecido y como etapa final se filtró cada uno de los productos obtenidos en los contenedores y concentrador.

El producto de alta densidad que permaneció en el tazón ciclón se le denominó concentrado, lo que se permaneció en los dos conos truncados contenía material en baja proporción de alta densidad y materiales estériles, a los cuales se le llamó medios, y el material que permaneció en el contenedor primario y en el cilíndrico se le denominó colas o relaves, siendo este el material de baja densidad.

Cada uno de estos productos fue filtrado, teniendo cuidado de no tener pérdidas, para posteriormente ser secados y pesados con el fin de realizar el correspondiente balance metalúrgico.

2.7 Caracterización por Absorción Atómica de los concentrados y colas.

Después de ser secados y filtrados cada uno de los productos, se procedió a tomar 1 gramo de cada producto para ser pulverizados en un mortero. Este producto se embolsó, etiquetó y se envió al laboratorio de análisis químico para analizar el contenido en %Ley de Fe.

En el laboratorio de análisis químico se llevó a cabo un muestreo, se pesaron 0.1 gramos en un vaso de precipitados de 50mL con una balanza analítica. Después en un vaso de precipitados de 1L se hizo una mezcla 1:1 de ácido clorhídrico y agua destilada. A cada uno de los vasos con muestra se le agregan 20 mL de la mezcla y se colocaron en una placa de calentamiento a 70°C para su digestión, se colocó también un vidrio de reloj para evitar posibles evaporaciones, dejando reposar cada muestra 1 hora, este proceso se llevó a cabo bajo la campana. A través de un embudo posteriormente se colocó toda la muestra digerida en un matraz aforado de 100mL. Se realizaron tres lavados con agua destilada para asegurar que no quedase muestra en el vaso y finalmente se aforó con agua destilada.

Como las disoluciones aun contenían demasiadas partículas de Fe, para el rango de lectura del equipo de EAA se realizó otra disolución. Se tomó 1 mL de la primera disolución con la ayuda de una pipeta volumétrica de 1 mL y se aforó en un matraz de 50 mL.

Por último se vertió la segunda disolución en un frasco de plástico y se llevó al equipo de EAA para realizar la lectura de Fe. El equipo utilizado se aprecia en la figura 2.7



Figura 2.7 Espectrómetro de absorción atómica Perkin Elmer 3100

Para poder realizar lecturas de concentración en el equipo de Espectroscopia de Absorción Atómica primero se preparó y calibró el equipo. Se colocó la lámpara específica para la lectura de Fe, se inició la calibración con las soluciones patrón, previamente preparadas de concentración conocida. Posteriormente se encendió el quemador del equipo verificando que la flama esté dentro de los parámetros correctos y se realizó la lectura de las soluciones patrón, introduciendo los datos correspondientes a la concentración conocida.

Una vez que se calibró el equipo se procedió a leer las muestras a analizar.

Por último se realizó el cálculo de la %ley de Fe con la ayuda de la siguiente fórmula:

$$\% P/p = \frac{(L.E.*Vol*F.D.^{-1})}{Peso\ de\ la\ muestra*10000}$$

Donde:

- L.E.- Lectura del equipo en ppm.
- Vol.- Volumen de aforo (100mL)
- F.D.⁻¹.- El inverso del Factor de dilución (1/10, en el resultado está multiplicado por 10).
- 10000 es un factor de conversión de ppm a porcentaje.

CAPÍTULO 3

RESULTADOS Y ANÁLISIS DE RESULTADOS

3.1 Armado del concentrador

En la Figura 3.1 se muestran los principales puntos en el armado del concentrador, 1(A) se observa la válvula que regulará el flujo de la alimentación de agua junto con sus conexiones, el orden de las trampas o contenedores para retener partículas finas 1(B) vista superior del dispositivo concentrador llamado “tazón-ciclón” antes de ser alimentado el líquido para concentrar 1(C).

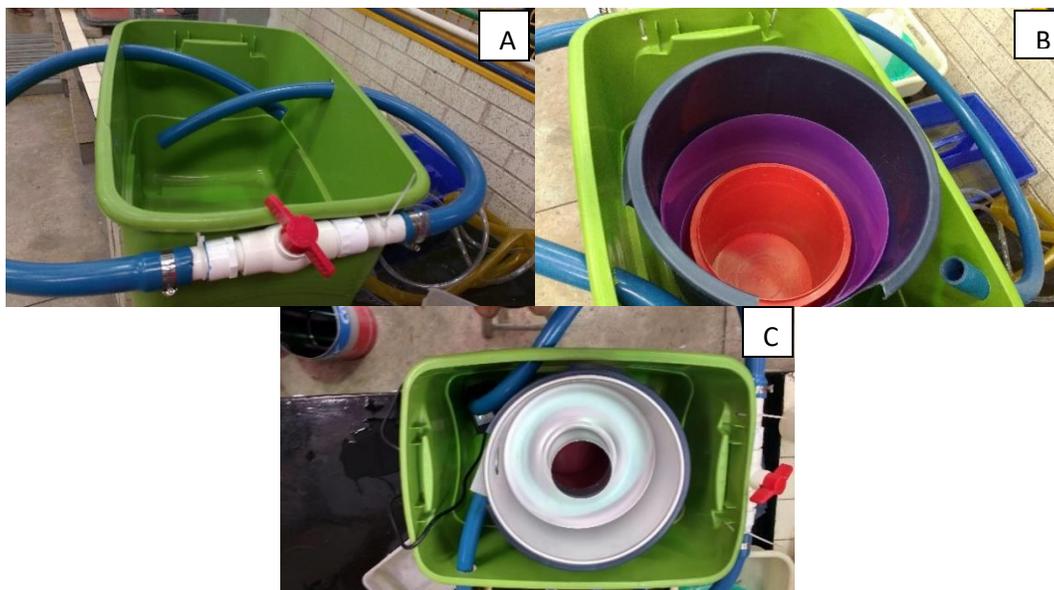


Figura 3.1.1 Proceso de armado del Concentrador tipo tazón-ciclón. (A) válvula de control y contenedor principal, (B) Contenedores de retención de sólidos minerales y (C) dispositivo concentrador tazón-ciclón.

El procedimiento empleado para la operación del concentrador inició con la adición de 35 litros de agua al conetenedor prncipal, seguido del encendido de la bomba de inemrsión. Como etapa siguiente se procedió a obtener el flujo de agua en estado estable en el interior del tazón concentrador, se agregó el mineral previamente calculado dando inicio al proceso de concentracion gravimetrica.

Previo a la etapa de operación, se verificó que la construcción del dispositivo fuese eficaz ya que no se tuviesen fallas tales como; fugas y que sí se tuviese concentración del mineral como se aprecia en la figura 3.1.2.



Figura 3.1.2. Proceso de concentración de mineral con contenido de magnetita.

A través de las pruebas realizadas referente al armado y a la operación preliminar de concentración, se puede mencionar que el equipo funcionó de manera adecuada, ya que en él se pudo concentrar magnetita (Fe_2O_4) con leyes relativamente altas de Fe. El proceso gravimétrico se llevó a cabo en un tiempo corto y a una cantidad relativamente pequeña de mineral (20-30 gr), en comparación con otros procesos como la mesa Wilfley, lo cual puede ser observado en la figura 3.1.2.

Se calculó la velocidad terminal de asentamiento libre (tabla 3.1.2) para cada tamaño de partícula utilizando la ley de Stokes (ecuación 1.2.2.9) para partículas menores a $50 \mu\text{m}$ y utilizando la ley de Newton (ecuación 1.2.2.10) para partículas mayores a $50 \mu\text{m}$, con el objeto de que la velocidad de la partícula fuese menor que la velocidad del fluido en todas las ocasiones y así lograr que exista un asentamiento libre.

De esta manera se verificó que el tamaño de partícula fuese posible operar y concentrarse, apoyándose también en el criterio de separación gravimétrica.

Los datos utilizados para el cálculo de las velocidades terminales se presentan en la tabla 3.1.1.

Tabla 3.1.1. Datos empleados para el cálculo de velocidades terminales.

Símbolo	Nombre	Magnitud
μ	Velocidad dinámica del agua	0.000891 Kg/ms
g	Gravedad	9.81 m/s ²
ρ_f	Densidad del agua	1 Kg/m ³
ρ_s	Densidad de magnetita-ilmenita	4950 Kg/m ³
d	Diámetro de la partícula	(m)

Tabla 3.1.2. Cálculo de velocidades terminales en la determinación del tamaño de partícula de operación

Velocidades terminales en partícula mineral y fluido				
# de Malla	Tamaño (mm)	Tamaño (μm)	Vt partícula (m/s)	Vt fluido (m/s)
35	0.500	500.000	0.085	0.0008
40	0.420	420.000	0.078	0.0008
50	0.297	297.000	0.066	0.0008
70	0.210	210.000	0.055	0.0008
100	0.149	149.000	0.047	0.0008
120	0.125	125.000	0.043	0.0008
140	0.105	105.000	0.039	0.0008
200	0.074	74.000	0.033	0.0008
400	0.037	37.000	0.004	0.0008
800	0.015	15.000	0.0007	0.0008
1250	0.001	1.000	3.0272E-06	0.0008

En la figura 3.1.3 se observa y compara la velocidad terminal de la partícula y la velocidad terminal del fluido.

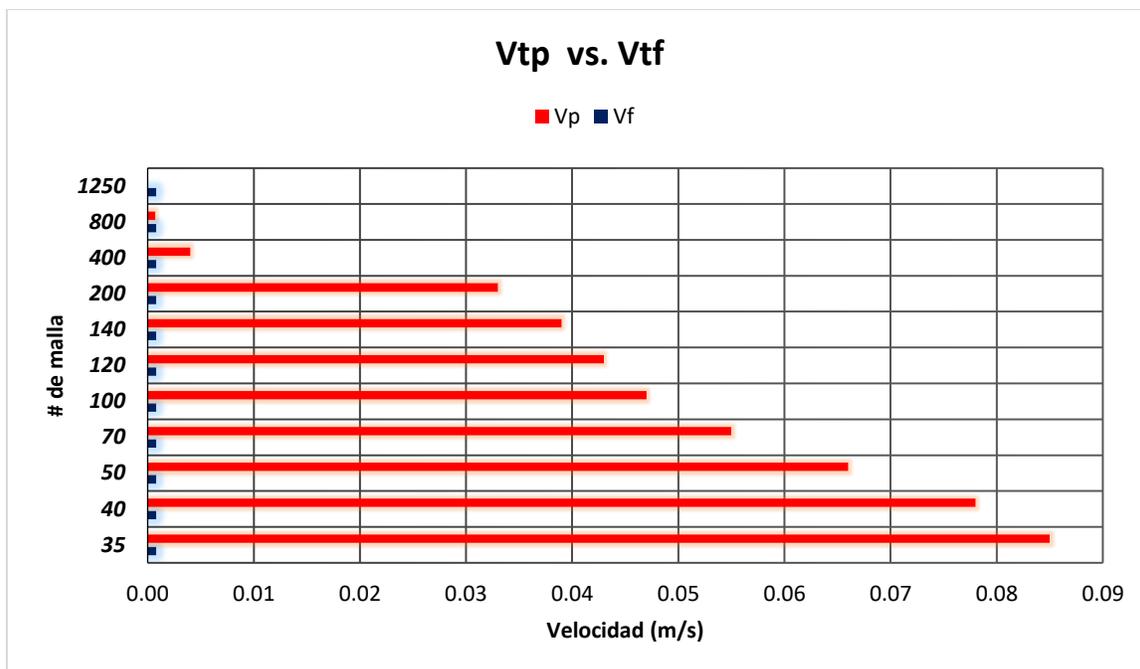


Figura 3.1.3.- Comparación de velocidades terminales.

Con la ayuda de este gráfico fue posible determinar hasta qué tamaño de partículas era posible trabajar.

A continuación se presentan los resultados obtenidos en cada una de las variables de control en el proceso de concentración gravimétrica en el equipo fabricado para el laboratorio de Beneficio de Minerales de la Facultad de Química.

3.2 Efecto del tamaño de partícula de operación

Como primer punto se realizó un análisis granulométrico valorado, con el objeto de conocer los diferentes tamaños y leyes más elevadas en el mineral de magnetita a concentrar.

Se realizaron pruebas a cada tamaño de partícula por triplicado, a un flujo de 8.209 L/min, con un peso de 20 g y un tiempo de residencia de 20 minutos para cada tamaño de partícula, en la cual la velocidad terminal era mayor que la del fluido y por tanto que ésta permaneciese en el concentrador.

Cada producto obtenido en el concentrador y una muestra de arena en cabeza fueron enviados para su análisis químico vía Espectroscopia de Absorción Atómica. Los resultados obtenidos son mostrados en la tabla 3.2.1.

Tabla 3.2.1. Resultados % en Ley de Fe en la determinación de tamaño de partícula de operación.

# de malla	Tamaño (μm)	%ley Fe en la alimentación	%ley Fe en el concentrado
35	500	1.37	3.09
40	420	2.10	2.95
50	297	3.27	4.02
70	210	4.07	6.91
100	149	16.12	27.17
120	125	18.57	47.52
140	105	22.4	72.31

En la figura 3.2.1 se graficaron los resultados obtenidos en el análisis químico, en ellos se corroboró la concentración de Fe para cada tamaño de partícula valorado.

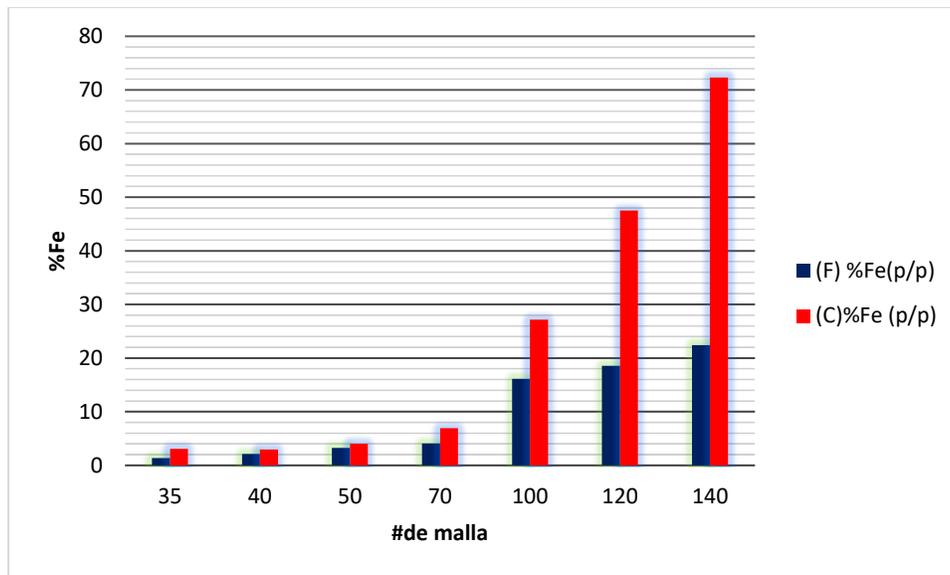


Figura 3.2.1.- Comparación de %ley de Fe para cada tamaño de partícula, en Alimentación (F) y Concentrado(C).

La concentración aumenta conforme se va disminuyendo el tamaño de partícula teniendo una marcada diferencia en los números de malla 100, 120 y 140. En la figura 3.2.1, se observa que las leyes en cabeza en tamaños de partícula pequeños, presentaron las leyes más altas, así como también en concentrados, tan elevados como 72% Fe.

Para determinar el tamaño de partícula de operación se compararon cada una de las leyes de Fe obtenidas mediante el análisis de Absorción Atómica como se muestra en la figura 3.2.2.

Referente a la determinación de velocidades terminales de la partícula y del fluido se evaluaron dichos valores a partir de las ecuaciones 1.2.2.9 y 1.2.2.10. Como se puede observar en la figura 3.1.3, en todos casos la velocidad terminal de la partícula fue mayor que la del fluido excepto en tamaños menores a 37 μm . Por lo tanto a través de este cálculo se propuso que éste debería ser el tamaño límite inferior para operar el concentrador tazón-ciclón.

Para afirmar dicho resultado y conocer la granulometría existente en las arenas así como las leyes en sus diferentes tamaños, se realizó el análisis granulométrico valorado a cada concentrado debido a que se necesitaba conocer en cuál de todos los tamaños de partícula se obtenía la mejor ley (fig. 3.2.2), así como también observar la diferencia en la ley de hierro entre la alimentación y el concentrado (fig. 3.2.1).

La operación requiere de un tamaño de partícula homogéneo debido a que es un proceso gravimétrico y se requiere controlar la separación. De otra manera, las partículas menos densas con un gran volumen podrían no ser separadas y a su vez las partículas densas con un volumen pequeño podrían ser arrastradas al vórtice.

Otro factor que determino el tamaño de operación fue la existencia de determinado tamaño en la muestra de arena, ya que a tamaños mayores a $105\ \mu\text{m}$ (malla # 140), la muestra de arena no presentó cantidades suficientes para realizar pruebas. Por tal motivo se seleccionaron los tamaños de partícula de $149\ \mu\text{m}$ y $125\ \mu\text{m}$ (malla #100 y #120), para realizar la pruebas de variación de flujo y observar su efecto.

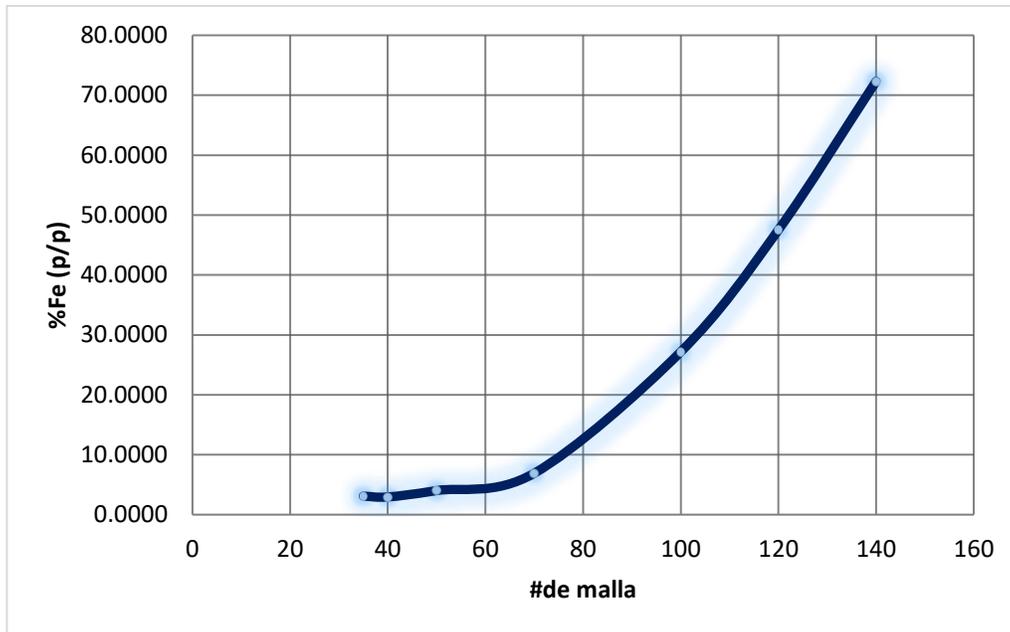


Figura 3.2.2.- Representación gráfica del tamaño de partícula valorado en % Ley de Fe vía Absorción Atómica.

A través de los resultados obtenidos se decidió operar el concentrador con los tamaños de partícula malla 100 y 120, dado que éstas son las que presentaron las mejores leyes. Las pruebas para partículas con tamaños de malla 140 no se realizaron debido a la insuficiencia de mineral en ese tamaño, a pesar de que en éstas se presenta la ley más elevada.

3.3 Efecto de la velocidad de flujo de operación

Con el objeto de conocer el efecto del flujo de agua, se realizaron pruebas por triplicado pesando 20 gr de mineral y con un tiempo de residencia de 20 minutos, ahora realizando una variación de flujo. Estas Pruebas se realizaron a tamaños de partícula de malla #100 y #120. Las variaciones de flujo realizadas se aprecian en la tabla 3.3.1

Tabla 3.3.1. % ley de Fe en concentrado a diferentes flujos

Flujo (L/min)	%Fe	%Fe
	mallá 100	mallá 120
5.164	19.29	53.62
6.100	20.27	49.72
6.766	30.36	44.61
6.952	30.00	41.00
7.806	51.54	38.85
8.210	57.47	35.61
8.404	58.62	35.41

Al efectuar una comparación entre las leyes de Fe entre las mallas 100 y 120, se puede observar que en el tamaño de partícula malla 100 se obtuvieron leyes más elevadas al flujo de 8.4 L/min como se aprecia en la tabla 5 en donde esta información proporcionó el flujo de operación.

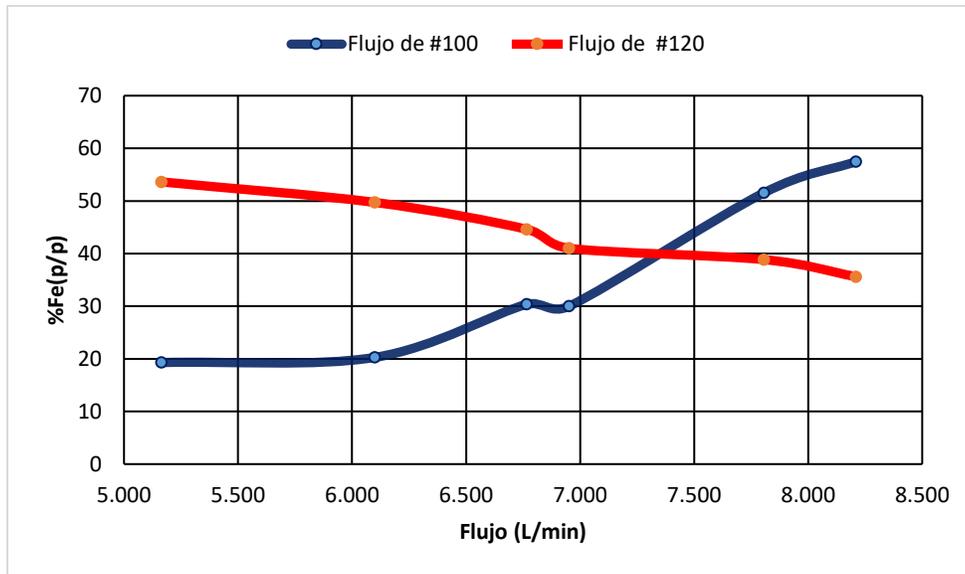


Figura 3.3.1.- Efecto del flujo de agua en la concentración del mineral de magnetita.

El efecto del flujo de operación se observa en la figura 3.3.1, los resultados de igual manera que en la prueba anterior se obtuvieron después de realizar un análisis granulométrico valorado.

La selección de flujo de operación se determinó debido a que cuando se excedió de 8.404 L/min, las partículas fueron arrastradas al derrame del concentrador y no hubo separación. Sin embargo, cuando la velocidad del flujo no es el suficiente (<5.150 L/min), todas las partículas se quedarán en el concentrador. También se eligió este flujo de 8.404 L/min porque en esta prueba se presentó la ley más alta de Fe para tamaño de malla #100. Para el tamaño de partícula de la malla #120 en la cual se obtuvo la mayor ley fue al flujo más bajo siendo éste de 5.164 L/min. Sin embargo, el tamaño de partícula de operación es la malla #100, ya que éste es el de mayor abundancia en la muestra de arena y en ella se obtiene una de las mejores leyes de Fe. A pesar de que se obtiene una calidad un poco más alta en malla #120 ésta no fue elegida por no existir en la arena una gran cantidad de este tamaño.

Posteriormente se realizó el estudio del efecto del tiempo de residencia de la partícula fijando la cantidad de mineral alimentado (20 g), el tamaño de partícula (149 μm) y el flujo (8.404 L/min), realizando pruebas de concentración gravimétrica en el dispositivo a diferentes tiempos. De esta manera se observa en la figura 3.3.1, que conforme aumenta el flujo de agua de alimentación al concentrador, el % ley de Fe en el concentrado disminuye para la malla #120 y lo contrario ocurrió con la malla #100, ya que el % ley de Fe aumenta conforme aumenta el flujo, debido probablemente a que se requiere una mayor energía para mover o en este caso arrastrar la partícula más grande (#100) que la de menor tamaño (# 120). Esta partícula de fue arrastrada hacia el vórtice.

3.4 Efecto del tiempo de residencia de la partícula

Una vez fijado el tamaño de partícula (malla #100) y el flujo de (8.404 L/min) se realizaron por triplicado pruebas a diferentes tiempos de residencia, en presencia de 20 g. de mineral.

Posteriormente se enviaron para su análisis cada uno de los concentrados vía Absorción Atómica y se obtuvieron los resultados mostrados en la tabla 3.4.1.

Tabla 3.4.1. Determinación de tiempo ideal de residencia.

Tiempo (min)	% ley de Fe
5	48.08
8	48.6
10	49.12
15	51.85
20	52.32
30	54.57
40	50.23
50	47.17
60	46.92

En la figura 3.4.1 se muestra la ley de Fe, a diferentes tiempos de residencia. En ella se observa que el % ley de Fe va aumentando conforme aumenta el tiempo de residencia de la partícula, hasta llegar a un máximo a los 30 minutos para después sufrir un decaimiento debido a que la fuerza de arrastre de las partículas es

acumulativa, al haber menos partículas la velocidad del fluido viscoso aumentó arrastrando más partículas hacia el vórtice.

A pesar de ello podemos considerar que los mejores resultados se obtienen a los 30 minutos, ya que se obtiene el mejor % ley.

Por lo tanto si lo que buscamos es obtener una %ley de Fe alta (Fig. 3.4.1), se tendrá que prolongar hasta 30 minutos el tiempo de residencia de nuestras partículas de arena de playa en el tazón- ciclón.

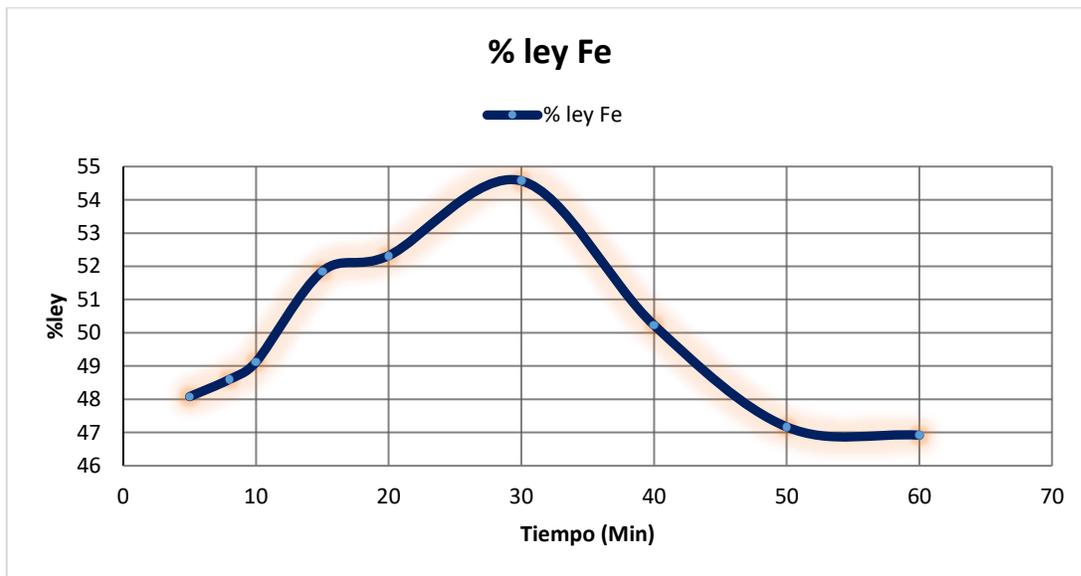


Figura 3.4.1.- % de Ley de Fe a diferentes tiempos de residencia.

En la figura 3.4.1 se observa que la ley más alta se obtiene a los 30 min y que después de este tiempo la ley de hierro baja, debido a que la fuerza de arrastre (Ec.1.2.2.3) va aumentando conforme pasa el tiempo; ya que la velocidad es directamente proporcional al tiempo. En otras palabras el tiempo de residencia disminuye al aumentar el flujo.

Una vez que se determinaron las condiciones de operación para el dispositivo concentrador gravimétrico llamado “tazón-ciclón” antes descritas, se decidió realizar un estudio sobre el efecto que se tenía al aumentar la concentración de sólidos en la pulpa de alimentación.

3.5 Efecto de concentración de sólidos en la pulpa de alimentación

Se realizaron pruebas del efecto de concentración de sólidos por triplicado en la alimentación (F) al tamaño de malla #100, flujo de 8.404 L/min y un tiempo de 30 minutos. En cada una de ellas se separaron concentrados (C), medios (M), colas (T) y se enviaron para su análisis por absorción atómica para obtener el %ley de Fe de cada una de ellas.

Al variar la alimentación del mineral cambiará la concentración de sólidos en peso en la pulpa en la alimentación; en menas de magnetita.

El porcentaje en sólidos en la pulpa de alimentación se calculó a través de la siguiente ecuación:

$$\% \text{ de solidos en peso} = \left(\frac{\phi_s}{\phi_s + \phi_l} \right) * 100 \text{ (Ec.3.5.1.1)}$$

Donde:

ϕ_s =Peso del solido total en el concentrador

ϕ_l =Peso del líquido total en el concentrador

Los resultados son expresados en la tabla 3.6.1, así como los balances metalúrgicos que se obtuvieron al concentrar magnetita a diferentes concentraciones de sólidos en la pulpa de alimentación. Dichos balances se presentan a continuación.

3.6 Balances metalúrgicos

A través de la información plasmada y analizada en un balance metalúrgico podemos visualizar las calidades y eficiencias bajo las cuales se está operando en un proceso de beneficio de minerales. Por medio de los cálculos y análisis químicos realizados se han obtenido los contenidos metálicos en gramos y el % de recuperación de Fe así como su relación con el % de Fe para cada prueba de concentración realizada en el tazón-ciclón.

Estos cálculos fueron realizados para cada variación de % en sólidos en peso de la pulpa de alimentación, experimentados por triplicado y a las condiciones anteriormente descritas (flujo, tiempo de residencia y tamaño de partícula) como se indica en la tabla 3.6.1.

Tabla 3.6.1. Mineral agregado (g) y % en sólidos de la pulpa de alimentación.

No. de prueba	mineral agregado (g)	% en sólidos de la pulpa de alimentación
1	20	0.54
2	40	1.08
3	60	1.61
4	80	2.13
5	100	2.64
6	350	8.66

Posteriormente se realizaron los balances metalúrgicos de cada una de estas pruebas y así saber cómo afectó el contenido de Fe la adición de una mayor cantidad de mineral.

Tabla 3.6.2. Balance metalúrgico para la prueba 1.

% en sólidos de la pulpa 0.54					
Producto	Peso (g)	%peso	%ley de Fe	Contenido metálico de Fe (g)	% Recuperación de Fe
Concentrado (C)	4.8	24	48.24	2.32	49.40
Medios (M)	10.9	54.5	18.24	1.99	42.41
Colas (T)	4.3	21.5	08.93	0.38	08.19
Alimentación (F)	20	100	23.44	4.69	100

En la tabla 3.6.2 podemos notar que se obtuvo un incremento en la ley en cabeza de 23.44 hasta 48.24% Fe en el concentrado con recuperaciones cercanas al 50% de Fe.

Por otra parte, si analizamos las colas con respecto a los medios podemos decir que sí se llevó a cabo una separación en el interior de nuestras trampas.

El proceso con este % de sólidos en peso no mostró altas eficiencias ya que se esperaba que el mayor contenido de Fe se recuperase en el concentrado y no fuese tan cercana al % de recuperación de los medios.

Tabla 3.6.3. Balance metalúrgico para la prueba 2.

% en sólidos de la pulpa					
1.08					
Producto	Peso (g)	%peso	%ley de Fe	Contenido metálico de Fe (g)	% Recuperación de Fe
Concentrado (C)	9.1	22.75	57.05	5.19	55.27
Medios (M)	15.2	38	14.09	2.14	22.80
Colas (T)	15.7	39.25	13.12	2.06	21.93
Alimentación (F)	40	100	23.49	9.39	100

Cuando se aumentó el porcentaje en sólidos de la pulpa de alimentación se obtuvo mayor cantidad de mineral tanto en medios como en las colas, pero como era de asumirse, la ley fue superior en el concentrado.

La cantidad de mineral tanto en medios como en las colas presentó una ley baja y una ley alta en el concentrado (tabla 3.6.3), con respecto a la prueba anterior prueba 0.54% sólidos en peso. Se obtuvo un aumento en la ley hasta de 55.05% Fe en el concentrado con % de recuperaciones cercanas al 55% de Fe.

Tabla 3.6.4. Balance metalúrgico para la prueba 3.

% en sólidos de la pulpa 1.61					
Producto	Peso (g)	%peso	%ley de Fe	Contenido metálico de Fe (g)	% Recuperación de Fe
Concentrado (C)	29.5	49.17	44.09	13.01	92.21
Medios (M)	14	23.33	4.08	0.57	4.05
Colas (T)	16.5	27.5	3.20	0.53	3.74
Alimentación (F)	60	100	23.51	14.11	100

A la concentración de sólidos de 1.61 (tabla 3.6.4) se obtuvo un incremento en la ley desde 23.51% Fe hasta 44.09% Fe en el concentrado, con recuperaciones cercanas al 92% de Fe.

El proceso de concentración fue muy eficiente ya que se espera que el mayor contenido de Fe siga presentándose en el concentrado.

Tabla 3.6.5. Balance metalúrgico para la prueba 4.

% en sólidos de la pulpa 2.13					
Producto	Peso (g)	%peso	%ley de Fe	Contenido metálico de Fe (g)	% Recuperación de Fe
Concentrado (C)	44.4	55.500	40.64	18.04	95.90
Medios (M)	22.5	28.125	2.11	0.47	2.52
Colas (T)	22.5	28.125	1.32	0.30	1.58
Alimentación (F)	80	100	23.52	18.81	100

En la prueba con 2.13% en sólidos en la pulpa de alimentación se obtuvieron mejores resultados que en la prueba con menor % en sólidos ya que presentó un mayor valor de recuperación, que para este caso fue de casi 96%.

Por otra parte incrementó la ley hasta 40.64% Fe en el concentrado, por lo que esta prueba no es mejor que la prueba anterior si lo que se busca es la mejor calidad en concentrado ya que la prueba anterior presentó mayor Ley.

En resumen, el proceso con este % de sólidos en peso mostró una eficiencia más elevada con respecto al % en sólidos en peso de 1.61 con la correspondiente disminución en Ley de Fe.

Tabla 3.6.6. Balance metalúrgico para la prueba 5.

% en sólidos de la pulpa					
	2.64				
Producto	Peso (g)	%peso	%ley de Fe	Contenido metálico de Fe (g)	% Recuperación de Fe
Concentrado (C)	59.5	59.5	38.57	22.95	97.53
Medios (M)	22.9	22.9	1.83	0.42	1.78
Colas (T)	17.6	17.6	0.92	0.16	0.69
Alimentación (F)	100	100	23.53	23.53	100

En este balance podemos notar que se obtuvo mayor cantidad de mineral en el concentrado, a diferencia de los medios y colas, pero como se espera, también se obtuvo la ley es superior en el concentrado (tabla 3.6.6). Se obtuvo un concentrado con leyes más bajas, del orden de 38.57% Fe con cantidades apreciables de % de recuperación hasta cercanas al 97.5% de Fe.

Este balance metalúrgico muestra que el proceso es más eficiente en cuanto al funcionamiento del equipo ya que en él se separó gravimétricamente concentrado de medios y a su vez los medios de las colas (tabla 3.6.6).

Y se recuperó gran cantidad de Fe, pero con una ley menor que en las pruebas anteriores.

Se realizaron pruebas variando el % en sólidos en la pulpa de alimentación, fijando las condiciones anteriores. A cada prueba se le realizó un análisis granulométrico valorado de alimentación (F), concentrado (C), medios (M) y colas (T). Con los resultados se realizó un balance metalúrgico con el fin de comprobar la efectividad del proceso. Dichos resultados fueron expuestos de las tablas 3.6.2 a la 3.6.6.

Como mejor resultado se obtuvo cuando se operó con 1.61% de sólidos en peso, el concentrado presentó los valores de ley y recuperación más elevados (Tabla 3.6.4). Con lo cual se cumplió el objetivo de operar el beneficio de minerales de manera eficiente. Por lo que se nota que el efecto de agregar o disminuir la cantidad de mineral en la pulpa de alimentación va directamente ligado a la ley o a la recuperación.

Según el balance metalúrgico podemos observar que el concentrado efectivamente tiene una ley superior a la de obtenida en los medios y las colas, por lo que se confirmó que el dispositivo concentrador gravimétrico denominado Tazón-Ciclón cumplió con los objetivos planteados en el proyecto, bajo las condiciones con mejores resultados cuando el % de sólidos en peso en la pulpa de alimentación es de 1.61, con un flujo de 8.404 L/min, para un tamaño de partícula de 149 μm y un tiempo de residencia de 30 minutos.

En la figura 3.6.7 se muestra el comportamiento del %ley y %recuperación de Fe, a diferentes valores de porcentaje en sólidos de la pulpa de alimentación.

En dicha figura podemos observar que el %de recuperación se incrementa con el aumento del % en sólidos, caso contrario ocurre con la ley ya que ésta va disminuyendo en el concentrado; cumpliendo con lo esperado.

En la condición de 1.08% en sólidos se obtuvo el mayor valor en ley pero la recuperación es de 55.27% así que ésta no es aún una buena concentración de Fe.

Sin embargo, en el caso de 1.61% en sólidos se presentó una mayor recuperación de Fe con una menor ley, pero aceptable de 44.09%. Este proceso es el más eficiente ya que en la industria del beneficio de minerales lo que se busca es obtener la mejor ley y las más altas recuperaciones.

Al seguir aumentando el porcentaje en sólidos de la pulpa de alimentación de 1.61% a 2.64% podemos observar que la ley de hierro va disminuyendo, así como el porcentaje de recuperación de dicho metal. Por lo que estas pruebas tampoco se consideran eficientes pues aún que presentan una buena recuperación esta no es la más alta, al igual que la ley.

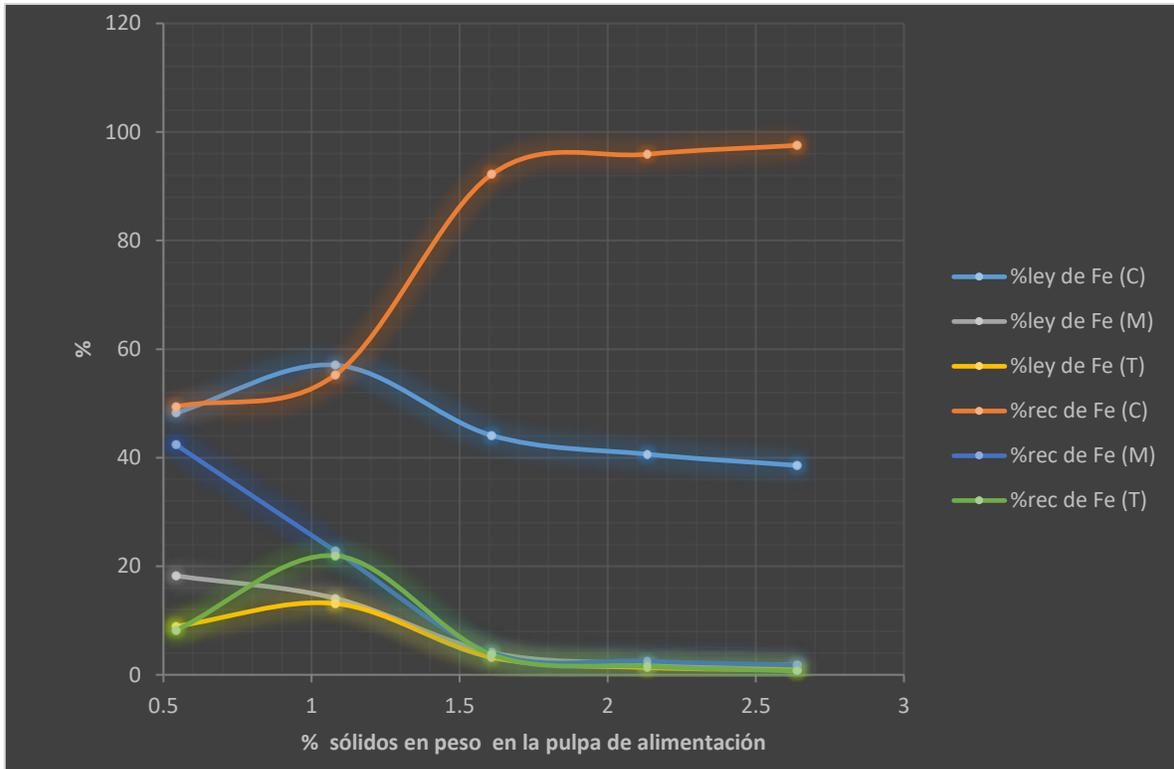


Figura 3.6.7. Efecto del %en sólidos en la alimentación en el %ley y %de recuperación de Fe, en el proceso de concentración gravimétrica del tazón-ciclón.

Para el caso del producto de medios se observó que el %de recuperación y el %ley de Fe, van disminuyendo conforme aumenta el % en sólidos. Al analizar lo que ocurre en las colas se notó que en ellas también se obtuvo un máximo cuando el porcentaje en sólidos es de 1.08 tanto en %ley como en el % de recuperación de hierro, para después también presentar una disminución, lo cual significa que el mineral con valor se obtuvo en el concentrado.

CAPÍTULO 4

CONCLUSIONES

4.1 Conclusiones

- El concentrador gravimétrico del tipo tazón –cyclón construido para el laboratorio de beneficio de minerales, es un dispositivo eficiente para separar magnetita de arenas de playa.
- La ley de Fe aumenta conforme va disminuyendo el tamaño de partícula, para la arena de estudio en esta tesis.
- Se requiere mayor flujo de agua en la operación del equipo al aumentar el tamaño de partícula de alimentación
- El tiempo de residencia del mineral a concentrar disminuye al aumentar el flujo del fluido viscoso.
- Al aumentar el % en sólidos en la pulpa de alimentación, la recuperación de Fe aumenta mientras que la ley disminuye, en concentrados.
- Las mejores condiciones de operación que se obtuvieron, fue en pruebas de tamaño de partícula malla #100, el flujo (8.404 L/m), el tiempo (30 min) y 1.61% de sólidos en la pulpa de alimentación. Ya que en ellas se recupera mayor cantidad, con mayor ley de Fe para este tipo de arena.

4.2 Comentarios finales

Este proyecto se llevó acabo de una manera congruente con los objetivos y el plan de trabajo en los tiempos y formas planeadas, en gran parte por el apoyo del técnico laboratorista Antonio Salazar Pérez, M. en C. Antonio Huerta Cerdán y al Profesor Juan de la Rosa Canales, que con sus aportaciones (ideas y conocimientos) se construyó el Tazón-Ciclón. También se deben mencionar que la disposición del taller mecánico y el departamento de análisis químico fueron de gran ayuda.

En general, durante todo el desarrollo de este proyecto se reafirmaron conocimientos sobre el beneficio de minerales así como una parte de la dinámica de fluidos, además de siempre tener en mente que se pretendía construir un dispositivo económico, funcional y eficaz.

La experiencia se complementó con la alegría de saber que este proceso ayuda a ahorrar agua ya que tiene un sistema de recirculación de ella a diferencia de otros procesos de concentración y separación de minerales.

CAPÍTULO 5

BIBLIOGRAFÍA

5.1 Bibliografía

[1] Góngora Pérez, Juan Pablo."Evolución reciente de la minería en México". Comercio Exterior. México,DF. LXII.No.4.Vol.63.Julio-Agosto 2013

[2] Cámara Minera de México. (2016). Informe anual 2016. México CDMX

[3]www.promexico.gob.mx/work/models/mx/Resource/230/1/images/mineria-inversion.pdf

[4] Muro Ruiz, Eliseo. La mineral Mexicana, su evolución, retos y perspectivas. México. Instituto de investigaciones científicas.

[5] Coll H. Atlántida, Sánchez María Teresa, Morales Josefina. La minería en México, geografía, historia, economía y medio ambiente 1.5.2. México, UNAM, Instituto de Geografía.

[6] Wills, B.A., 1981, Mineral Processing Technology, Second Edition, An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery, Pergamon Press Ltd., Headington Hill Hall, Oxford OX3 0BW, England.

[7] Kelly, E. y Spottiswood, D., Introducción al Procesamiento de Minerales, México, Ed. Limusa, 1990. ISBN 9681833376

[8] Mular, A., Anderson, M., 1986, Design and Installation of Concentration and Dewatering Circuits. Society of Mining Engineers, Inc., Littleton, Colorado.

[9] Mular, A., Bhappu R., 1978, Mineral Processing Plant Design, Published by Society of Mining Engineers of the American Institute of Mining, Metallurgical and Petroleum Engineers, Inc., New York, New York.

[10] Sánchez Z., Luis Emilio. "Operaciones unitarias en preparación de minerales". Universidad Nacional, seccional Medellín, 1984.

[11] Jennings, I.L., 1964, Sand and Gravel - A Substitute for Gold?, Canadian Mining and Metallurgical Bulletin, Montreal, Quebec.

[12] Gaudin A.M., 1939, Principals of Mineral Dressing, McGraw-Hill Book Company, Inc., New York.

[13] Juárez S., Faustino. Seminario de preparación de muestras para análisis por absorción atómica, ICP e ICP-MS. Laboratorio de radioactividad Natural. Instituto de Geofísica, UNAM. Noviembre 2007.

[14] [callmeBe]. (2013, Mayo 26). Blue Bowl Tutorial for processing of gold concentratrates [archivo de video].

Recuperado de: <https://www.youtube.com/watch?v=34ZXddnyRwo>.

[15] [00Shivan00]. (2013, Junio 30). My blue bowl setup [Archivo de video]. Recuperado de: <https://youtu.be/-NrZG88UuBU>

[16] [TheGoldLab]. (2011, Agosto 1). The Gold Lab Original Part 4: Reclaiming Micro Fine Gold From Sluice. [Archivo de Video]. Recuperado de: <https://youtu.be/S6X6PtIYKfE>

Apéndice A

Anexo A

Tabla A. Lista de material empleado en la construcción del concentrador tazón-ciclón.

Cantidad	Material	Dimensiones	Capacidad
1	Contenedor de plástico 	Alto: 38.00 cms. Largo: 62.00 cms. Ancho: 44.00 cms.	71.92 Lts
1	Molde de aluminio para rosca 	Diámetro externo: 30.00 cms. Diámetro interno: 10.00 cms. Altura: 11.00 cms.	6.92 Lts
1	Casto Danés 	Diámetro superior: 30.50 cms. Diámetro Inferior: 25.50 cms. Altura: 32.00 cms.	25.00 Lts

1	<p>Bomba sumergible</p> <p>Marca: Law industry</p> <p>Modelo: WP-2000</p> 	<p>Largo: 10.50 cms.</p> <p>Ancho: 7.50 cms</p> <p>Altura: 11.00 cms</p>	2000 LPH
1	<p>Cesto paplero</p> 	<p>Diámetro superior: 29.50 cms.</p> <p>Diámetro Inferior: 19.00 cms.</p> <p>Altura: 26.00 cms.</p>	15.00 Lts
1	<p>Contenedor de plástico</p> 	<p>Diámetro: 21.00 cms.</p> <p>Altura: 21.00 cms</p>	6.00 Lts

2	<p>Conectores macho de pvc</p> 	1"	
1	<p>Válvula de esfera roscable de pvc</p> 	1"	
2	<p>Abrazaderas</p> 	1"	
2	<p>Cople pvc</p> 	1"	
1	<p>Cemento azul para pvc</p> 	60 mL.	

1	Manguera de plástico 	1" – 2.00 mts.	
1	Taladro con brocas 		
1	Alimentador de aluminio 		
2	Cinchos de plástico 	20 cms.	