

# UNIVERSIDAD DEL AZUAY

# FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA

# ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

# Diseño y Construcción de un Separador Magnético para Minerales

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

**INGENIERO EN MINAS** 

Autores:

EDISSON SANTIAGO CARRERA VELE ANGEL JHORDANO ESTRELLA CÓRDOVA

**Director:** 

GIL TARQUINO ÁLVAREZ PACHECO

CUENCA, ECUADOR

2018

## DEDICATORIA

Dedicatoria Jhordano Estrella:

Esta tesis se la dedico a mis padres y abuelos quienes supieron guiarme por un buen camino y brindarme sus consejos y amor que necesitaba para seguir adelante con este sueño.

A mis hermanos Erika y Alexis, que significan mucho en mi vida y a toda mi familia y amigos por los consejos recibidos y por esas palabras de ánimos que me sirvió para no dejarme vencer durante este proceso y desafío de mi vida.

Dedicatoria Santiago Carrera:

Dedico este trabajo principalmente a mi madre por darme la vida y permitirme haber llegado a estas circunstancias tan importantes de mi formación profesional. A mi padre, a pesar de no ser biológicamente padre propio supo ser verdaderamente increíble conmigo, alentándome, dándome buenos consejos, una excelente persona que me brinda con su ser un gran ejemplo a seguir y espero tener siempre la misma relación con él. A mi hermano Ariel, porque lo adoro muchísimo que vea en mí un ejemplo para que pueda continuar cumpliendo sus metas y esforzándose día a día ya que todo esto se puede conseguir poniendo ganas, dedicación y sobre todo persistencia.

"Fe en uno mismo... es el mejor y más seguro de los caminos". Michelangelo

## AGRADECIMIENTO

El presente trabajo de tesis agradecemos a la Universidad del Azuay por darnos la oportunidad de estudiar y ser profesionales.

A nuestro director de tesis, Ing. Gil Álvarez por colaborar con su tiempo, conocimientos y experiencia para culminar el proyecto de tesis con éxito, de igual manera al Sr. Benigno Bravo por el asesoramiento técnico y por transmitirnos sus conocimientos.

Agradecemos también a los profesores por la paciencia, dedicación hacia nosotros como estudiantes y a nuestros compañeros por formar parte de este trayecto educativo.

Yo, Santiago Carrera también quiero agradecer infinitamente a Dios, a mis padres Libia y Sergio quienes fueron el pilar fundamental e impulsores para luchar diariamente y que con su esfuerzo supieron apoyarme y guiarme de manera correcta a lo largo de esta trayectoria educativa, a mi hermano Ariel como también a mi familia en general por brindarme consejos que me ayudaron a crecer como persona y que gracias a esto puedo seguir adelante consiguiendo cada una de las metas que me he propuesto en mi vida. Agradezco a mi compañero de esta carrera profesional y tesis, Jhordano, por confiar en mí para llevar a cabo el desarrollo de este proyecto.

Yo, Jhordano Estrella agradezco de manera especial a mis padres por el apoyo económico, apoyo moral, por sus consejos, ánimo y por haber confiado en mí hasta el final, también a la empresa EXSA por el apoyo económico, por haberme brindado una beca que fue de vital importancia para poder culminar mis estudios universitarios. Un agradecimiento especial a mis hermanos, familiares y amigos por esas palabras de aliento que han servido para darme fuerzas y ánimos para no desmayar. Agradezco también a mi tutor de tesis al Ing. Gil Álvarez por el tiempo y disponibilidad que presento durante este proceso, también al Sr. Benigno Bravo por sus conocimientos y la ayuda para llevar a cabo este objetivo, a mi compañero de tesis Santiago Carrera por haber puesto la confianza en mi persona y haber tomado este difícil desafío que nos ha llenado de conocimientos importantes para el desarrollo de nuestra vida profesional. Son muchas las personas que han contribuido de una u otra manera en este difícil y a la vez bonito camino de preparación, gracias infinitas a todos los profesores que han sido parte de mi formación y que Dios les bendiga.

## ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA	ii
AGRADECIMIENTO	iii
ÍNDICE DE CONTENIDOS	iv
ÍNDICE DE FIGURAS	ix
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE ECUACIONES	xii
ÍNDICE DE ANEXOS	xiii
RESUMEN	xiv
ABSTRACT	xv
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I: MARCO TEÓRICO	3
1.1. Aspectos Generales de la Concentración de Minerales	3
1.1.1. Descripción del Tenor	4
1.1.2. Objetivo Esencial de la Concentración	5
1.2. Índices Metalúrgicos	6
1.2.1. Índices que relacionan calidad de la concentración	6
1.2.1.1. Recuperación	6
1.2.1.2. Razón de enriquecimiento	7
1.2.1.3. Índice de selectividad	7
1.2.2. Índices que relacionan capacidad del circuito de concentración	
1.2.2.1. Razón de concentración	
1.2.2.2. Rendimiento de concentración	9
1.2.2.3. Eficiencia de la separación	9
1.3. Campo Magnético	
1.3.1. Flujo magnético (Φ)	
1.3.2. Densidad de flujo magnético (B)	

1.4. In	nanes	permanentes	12
1.5. E	lectron	nagnetismo	13
1.5.1.	Pro	piedades electromagnéticas	13
1.5	.1.1.	Permeabilidad (µ)	13
1.5	.1.2.	Reluctancia (R)	14
1.5	.1.3.	Fuerza magnetomotriz (Fm)	14
1.5.2.	Ele	electroimán	15
1.5.3.	Inte	ensidad del Campo Magnético (H)	17
1.6. C	oncen	tración Magnética	18
1.6.1.	Sep	paración magnética de baja intensidad	18
1.6.2.	Sep	paración magnética de alta intensidad	18
1.6.3.	Cla	sificación de los Minerales para la Separación Magnética	19
1.6	.3.1.	Paramagnéticos	19
1.6	.3.2.	Ferromagnéticos	19
1.6	.3.3.	Diamagnéticos	19
1.6.4.	Pri	ncipio de la Separación Magnética	20
1.6.5.	Dis	seños para Separadores Magnéticos	20
1.7. C	lasific	ación de los Separadores Magnéticos	20
1.7.1.	Sep	paradores Magnéticos para la Separación de Fragmentos Metálicos	20
1.7	.1.1.	Placas magnéticas	20
1.7	.1.2.	Poleas	21
1.7	.1.3.	Tambores	21
1.7	.1.4.	Separadores suspendidos	22
1.7	.1.5.	Parrillas magnéticas	22
1.7.2.	Sep	paradores magnéticos por vía seca	23
1.7	.2.1.	Separadores de banda transversal de alta intensidad	23
1.7	.2.2.	Separadores de rodillo de alta intensidad	23
1.7. v al	.2.3. Ita inte	Concentradores magnéticos de tambor mediante vía seca de baja, n	nediana
1.7.3	Ser	paradores magnéticos por vía húmeda	25
1.7	.3.1.	Filtros magnéticos	
1.7	.3.2.	Separadores magnéticos de alta intensidad por vía húmeda	
		r	

CAPÍTULO II: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN
------------------------------------

2.1.	Dis	eño del equipo	29
2.2.	Dis	eño mecánico: cálculos y ecuaciones	
2.	2.1.	Parámetros requeridos de acuerdo a cálculos	
2.	2.2.	Cálculo de velocidad angular del sistema	
2.	2.3.	Cálculo de la velocidad periférica del cilindro	34
2.	2.4.	Cálculo del perímetro del cilindro	35
2.	2.5.	Peso del cilindro vacío	
2.	2.6.	Peso de la tapa del cilindro	
2.	2.7.	Peso del eje sujeto al cilindro	
2.	2.8.	Peso de acoples y pernos de sujeción en tapa del cilindro	
2.	2.9.	Peso de anillos sujetados al cilindro	
2.	2.10.	Peso total del material a clasificar	
2.	2.11.	Pesos que intervienen en el sistema	40
2.	2.12.	Cálculo de la inercia del sistema giratorio	40
	2.2.1	2.1. Inercia en el cilindro (Ix <sub>1</sub> ):	40
	2.2.1	2.2. Inercia en la tapa fija (Ix <sub>2</sub> )	41
	2.2.1	2.3. Inercia en el eje (Ix <sub>3</sub> )	41
	2.2.1	2.4. Inercia en los anillos (Ix <sub>4</sub> )	42
	2.2.1	2.5. Inercia total del sistema giratorio (I <sub>T</sub> )	
2.	2.13.	Aceleración angular (α)	
2.	2.14.	Torque generado en la escobilla (Te)	43
2.	2.15.	Cálculo del torque en el sistema (T)	44
2.	2.16.	Potencia del motor (Pot)	44
2.	2.17.	Requerimiento de dimensionamiento del motor	45
2.3.	Des	scripción de los elementos del equipo	45
2.	3.1.	Tolva de alimentación	45
2.	3.2.	Dosificador vibratorio	46
2.	3.3.	Cilindro magnético	46
2.	3.4.	Protector de transmisión	47
2.	3.5.	Motor-reductor	47

2.3	.6.	Motor eléctrico	.48
2.3	.7.	Bandeja dosificadora	.48
2.3	.8.	Escobilla	. 49
2.3	.9.	Bandejas de material	. 49
2.3	.10.	Chumacera	. 49
2.3	.11.	Polea conducida	. 50
2.3	.12.	Banda Trapezoidal	. 50
2.3	.13.	Polea conductora	.51
2.3	.14.	Electroimanes	. 52
2.4.	Cálo	culo electromagnético	. 52
2.4	.1.	Intensidad del campo magnético (H)	. 52
2.5.	Cálo	culo energético en el sistema	. 54
2.5	.1.	Consumo energético generado por motor-reductor y cilindro (E1)	. 54
2.5	.2.	Consumo energético en el sistema electromagnético (E2 y E3)	. 55
2.5	.3.	Consumo energético total del separador (E <sub>T</sub> )	.56
2.6.	Proc	ceso de armado y producto final	.56

# 

3.1.	De	scripción del material a usar	60
3.2.	Pro	cesos para lograr la concentración magnética	61
3.2	2.1.	Clasificación de material	61
3.2	2.2.	Alimentación de material	61
3.2	2.3.	Proceso de separación	
3.2	2.4.	Análisis de material	
3.3.	Pru	ebas técnicas y ajustes	63
3.3	3.1.	Pruebas con intensidades magnéticas y corrientes baja y alta	63
3.4.	Ob	tención de índices metalúrgicos	64
3.4	4.1.	Diagrama del proceso	64
3.4	4.2.	Obtención de tenores del proceso	64
	3.4.2	.1. Tenor de alimentación	64
	3.4.2	.2. Tenor de Concentración	65

Tenor en material no magnético	65
Cálculo de índices metalúrgicos	
Recuperación (R)	67
Razón de enriquecimiento (RE)	
Razón de concentración (RC)	
Rendimiento (V)	
Eficiencia de Separación (E)	
	Tenor en material no magnético Cálculo de índices metalúrgicos Recuperación (R) Razón de enriquecimiento (RE) Razón de concentración (RC) Rendimiento (V) Eficiencia de Separación (E)

# 

4.1.	Aná	ilisis de resultados	70
4.1	.1.	Resultados con intensidad de campo magnético bajo y alto	70
4.1	.2.	Análisis del concentrado (C) e intensidad magnética (H)	70
4.2.	Aná	ílisis de los índices metalúrgicos	71
4.2	2.1.	Análisis de recuperación (R) e intensidad del campo magnético (H)	71
4.2	2.2.	Análisis de eficiencia de separación (E) e intensidad magnética (H)	72
4.3.	Aná	ilisis del consumo energético (E) e intensidad del campo magnético (H)	73
CONC	LUSI	ONES Y RECOMENDACIONES	74
REFER	REN(	CIAS BIBLIOGRÁFICAS	77
ANEX	<b>OS</b>		79

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1 Esquema general de separación en un concentrador detallando la corrient	e de
entrada (Alimento), y las corrientes de salida (Concentrado y Colas)	5
Figura 1.2 Líneas de fuerza magnética alrededor de una barra imantada	11
Figura 1.3 Efecto de materiales no magnéticos y materiales magnéticos en un ca	.mpo
magnético	11
Figura 1.4 Campo magnético alrededor de un conductor	13
Figura 1.5 Circuito magnético básico	15
Figura 1.6 La inversión de la corriente en la bobina causa que el campo electromagnétic	co se
invierta	16
Figura 1.7 Parámetros que determina la intensidad de un campo magnético y la densida	ıd de
flujo	17
Figura 1.8 Operación de poleas magnéticas.	21
Figura 1.9 Separadores magnéticos suspendidos.	22
Figura 1.10 Separador magnético de banda transversal de alta intensidad.	24
Figura 1.11 Separador magnético Jones de alta intensidad en húmedo tipo carrusel	26
Figura 1.12 Separadores magnéticos de tambor en húmedo del tipo: (a) concurrente	, (b)
contra-rotación y (c) contracorriente.	28
Figura 2.1 Esquema de tambor, electroimanes y recipientes de mineral	30
Figura 2.2 Diagrama de componentes	31
Figura 2.3 Sistema del equipo acoplado en la tolva	32
Figura 2.4 Tolva de alimentación	45
Figura 2.5 Dosificador vibratorio.	46
Figura 2.6 Cilindro Electromagnético.	46
Figura 2.7 Protector de transmisión	47
Figura 2.8 Motor-reductor.	47
Figura 2.9 Motor eléctrico.	48
Figura 2.10 Recipientes de Material	49
Figura 2.11 Chumaceras	49
Figura 2.12 Polea Conducida	50
Figura 2.13 Banda Trapezoidal	51
Figura 2.14 Polea Conductora	51
Figura 2.15 Electroimanes	52
Figura 2.16 Medición de corriente en amperes	53
Figura 2.17 Cilindro rolado	56
Figura 2.18 Eje conductor y tapa móvil	57
Figura 2.19 Estructura de soporte	57
Figura 2.20 Distribución de electroimanes y caja de transformador	58
Figura 2.21 Tapa fija	59
Figura 2.22 Escobilla	59
Figura 3.1 Clasificador de material	61

Figura 3.2 Alimentación de material	61
Figura 3.3 Proceso de separación	
Figura 3.4 Muestra separada	
Figura 3.5 Diagrama del proceso	
Figura 3.6 Tenor en la alimentación	
Figura 3.7 Tenor en el concentrado	65
Figura 4.1 Análisis de concentrado e intensidad magnética	71
Figura 4.2 Análisis de recuperación e intensidad magnética	72
Figura 4.3 Análisis de eficiencia de separación e intensidad magnética	72
Figura 4.4 Análisis de consumo energético e intensidad magnética	73

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1 Diferentes Métodos de Concentración de Minerales y Algunos Equipos E	mpleados
	4
Tabla 1.2 Índices de Concentración	10
Tabla 2.1 Pesos que intervienen en el sistema	40
Tabla 2.2 Intensidades del campo magnético	53
Tabla 2.3 Consumo energético con baja y alta intensidad	55
Tabla 2.4 Consumo energético total del separador	
Tabla 3.1 Resultados obtenidos con variación de las intensidades magnéticas	63
Tabla 3.2 Tenores del proceso	66
Tabla 3.3 Datos generales del sistema de concentración	67
Tabla 3.4 Recuperación (R)	67
Tabla 3.5 Razón de concentración (RC)	68
Tabla 3.6 Rendimiento (V)	69
Tabla 3.7 Eficiencia de separación	69
Tabla 4.1 Resultados generales	70

## ÍNDICE DE ECUACIONES

Ecuación 1.1 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)5
Ecuación 1.2 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)7
Ecuación 1.3 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)7
Ecuación 1.4 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)
Ecuación 1.5 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)
Ecuación 1.6 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)9
Ecuación 1.7 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)9
Ecuación 1.8 (Floyd, 2007)
Ecuación 1.9 (Floyd, 2007)
Ecuación 1.10 (Floyd, 2007)14
Ecuación 1.11 (Floyd, 2007)15
Ecuación 1.12 (Floyd, 2007)
Ecuación 2.1 (Young & Freedman, 2009)
Ecuación 2.2 (Young & Freedman, 2009)
Ecuación 2.3 (Young & Freedman, 2009)
Ecuación 2.4 (Young & Freedman, 2009)
Ecuación 2.5 (Richard G Budynas y J Keith Nisbett , 2008)40
Ecuación 2.6 (Richard G Budynas y J Keith Nisbett , 2008)41
Ecuación 2.7 (Richard G Budynas y J Keith Nisbett , 2008)41
Ecuación 2.8 (Richard G Budynas y J Keith Nisbett , 2008)
Ecuación 2.8 (Richard G Budynas y J Keith Nisbett, 2008)42

## ÍNDICE DE ANEXOS

Anexo 1 Bosquejo de separador	79
Anexo 2 Centrado de tapa móvil	79
Anexo 3 Instalación de eje y tapa móvil en el tambor	79
Anexo 4 Chumaceras KDF	80
Anexo 5 Instalación de piezas	80
Anexo 6 Ubicación de tapa fija	80
Anexo 7 Instalación de electroimanes	81
Anexo 8 Conexión de transformador	81
Anexo 9 Pruebas previas	81
Anexo 10 Pintado de estructuras y recipientes	82
Anexo 11 Colocación de transformador en la caja	82
Anexo 12 Equipo elaborado	83
Anexo 13 Ajustes en tolva de alimentación	83
Anexo 14 Tendido y secado de material	84
Anexo 15 Clasificación de material	84
Anexo 16 Pesado de muestra	84
Anexo 17 Preparación de equipo para separación	85
Anexo 18 Alimentación de la muestra	85
Anexo 19 Resultados de la separación magnética	86
Anexo 20 Placas de especificaciones	86

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UN SEPARADOR MAGNÉTICO PARA MINERALES

## RESUMEN

La finalidad de esta tesis se basa en el diseño y construcción de un separador magnético de tambor en vía seca para liberar partículas magnéticas (paramagnéticas y ferromagnéticas) de las diamagnéticas, esto se logrará aprovechando las propiedades magnéticas de los minerales provenientes de las menas. Este equipo cuenta con dos usos importantes: realizar la purificación o separación del mineral y obtener concentrados con afinidad magnética.

Una vez diseñado el prototipo se procederá a ensamblar el equipo de laboratorio para desarrollar las respectivas pruebas que garantice la separación adecuada de las partículas minerales.

Palabras Claves: Campo magnético, partículas, concentración, mineral, electromagnetismo.

Gil Tarquino Álvarez Pacheco **Director del Trabajo de Titulación** 

Jaime Alfonso Ampuero Franco

Coordinador de Escuela

Edisson Santiago Carrera Vele

Angel Jhordano Estrella Córdova

Autores

#### DESIGN AND CONSTRUCTION OF A MAGNETIC SEPARATOR FOR MINERALS

#### ABSTRACT

The purpose of this thesis was based on the design and construction of a dry drum magnetic separator to release magnetic particles (paramagnetic and ferromagnetic) from the diamagnetic ones. This was achieved by taking advantage of the magnetic properties of minerals from ores. This equipment had two important uses: perform the purification or separation of the ore and obtain concentrates with magnetic affinity. Once the prototype was designed, the laboratory equipment was assembled to develop the respective tests that guarantee the adequate separation of the mineral particles.

Keywords: Magnetic field, particles, concentration, mineral, electromagnetism.

Gil Tarquino Álvarez Pacheco Degree Work Director

Jaime Alfonso Ampuero Franco Faculty Coordinator

Edisson Santiago Carrera Vele

Angel Jhordano Estrella Córdova

Authors



Ing. Paul Arpi

Carrera Vele Edisson Santiago Estrella Córdova Angel Jhordano Trabajo de Titulación Ing. Gil Tarquino Álvarez Pacheco. Mgt Enero, 2018

## DISEÑO Y CONSTRUCCION DE UN SEPARADOR MAGNETICO PARA MINERALES

## INTRODUCCIÓN

Dentro de un proyecto son muchos los procesos que intervienen para la obtención del mineral, al pasar de los años se ha buscado evolucionar estos procesos que optimicen los resultados del beneficio que se pretende obtener y garanticen parámetros técnicos y estándares ambientales.

Por ese motivo se busca implementar un equipo que garantice buenos resultados, por ello se propone la construcción de un separador magnético de tambor, en vista que muchos de los minerales reaccionan al colocarlos frente a un campo magnético, pero existe minerales en donde el efecto de la fuerza de atracción es muy ligero para detectarlos.

Los separadores magnéticos aprovechan la diferencia en las propiedades magnéticas de los minerales, los materiales se clasifican en dos amplios grupos, según los atraiga o los repele un magneto: paramagnéticos y diamagnéticos. Los diamagnéticos se repelen a lo largo de las líneas de fuerza magnética, hasta el punto donde la intensidad de campo ya es muy leve. Las sustancias diamagnéticas no se pueden concentrar magnéticamente. Los paramagnéticos son atraídos a lo largo de las líneas de fuerza magnética de fuerza magnética hasta de fuerza magnética concentrar magnética hasta los puntos de mayor intensidad del campo.

Los principales usos de la separación magnética son: a) eliminación o separación de fragmentos metálicos y; b) procesos de concentración y purificación magnética.

Los separadores magnéticos y purificadores se dividen en: a) separadores del tipo húmedo o por vía húmedo y; b) separadores del tipo seco o por vía seca.

En todos los separadores magnéticos, ya sean de alta o de baja intensidad, o para trabajar en seco o en húmedo, se deben incorporar ciertos elementos de diseño. Una partícula magnética que entra al campo no solo será atraída a las líneas de fuerzas, sino que también migrará a la región de mayor densidad de flujo. Esta es la base de la separación magnética.

En los procesos industriales el uso de los separadores magnéticos se aplica de manera principal en los siguientes aspectos:

- Separar mineral magnético
- Extraer hierro entrampado
- Concentrar minerales o metales.

El problema más relevante que se puede suscitar al momento de realizar las pruebas con el equipo es que el material de interés tenga la presencia de partículas contaminantes es decir acumulación de material estéril en concentrado magnético.

Al considerar la necesidad de implementar un equipo de separación magnética, se establece como objetivo principal implementar un separador magnético en el laboratorio de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay, diseñando y construyendo un prototipo a escala de laboratorio que ayude a fortalecer los conocimientos de manera didáctica en el ámbito práctico hacia los estudiantes permitiendo desarrollar uno de los procesos de beneficio de los minerales.

El uso del separador permitirá realizar la eliminación o separación de fragmentos metálicos como también realizar procesos de concentración y purificación magnética.

## CAPÍTULO I

## MARCO TEÓRICO

## 1.1. Aspectos Generales de la Concentración de Minerales

La concentración de minerales es el proceso en donde se eleva el tenor en porcentaje de un mineral o mena determinado con el uso de equipos de separación sólido-sólido produciendo la separación de dos o más especies minerales para así generar un flujo enriquecido de un mineral de interés.

Se pueden emplear dos métodos de separación:

a) Métodos que utilizan diferentes propiedades volumétricas y físicas de los minerales:

Las tecnologías relacionadas a estos métodos se determinan por ser altamente dependientes del tamaño de partículas y las características diferenciales que genera la separación, pueden ser:

- "Diferencia de velocidad de sedimentación, a través de la diferencia de densidad de los sólidos (Concentración Gravimétrica).
- Diferencia de movimiento en un campo magnético de intensidad variable, a través de la diferencia de la susceptibilidad magnética de los minerales (Concentración Magnética).
- Quedarse adherido o saltar de una placa metálica, por diferencias en la conductividad eléctrica cuando las partículas están dentro de un campo eléctrico (Concentración Eléctrica)". (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)
- b) Métodos que emplean características físico-químicas de superficie:
- La adsorción o no de agua en la superficie del sólido, es decir aquellos que adsorban agua se humectaran (hidrofílicos) y también existirán elementos que no se humecten (hidrofóbicos). Por ejemplo los minerales que no absorben agua como el talco, grafito, azufre y molibdenita, serán retirados por el medio acuoso y si se los coloca cerca de una burbuja de aire se irían contenidos en esta y flotarían.
- Adsorción de un tensoactivo de manera selectiva donde se genere una acumulación selectiva de un mineral o varios minerales manteniendo sueltos a otros minerales acompañantes, es muy útil al procesar minerales con granulometría ultrafina (entre 10 y 1 um) y coloidales (< 1 um). Se conoce al desarrollo como floculación selectiva

si el tensoactivo es un polímero y como coagulación selectiva si es un ión conformado por un complejo inorgánico.

Para generar una apropiada separación debe existir entre los minerales al menos una propiedad con valores relativamente diferentes, como la gravedad específica, susceptibilidad magnética, conductividad eléctrica o un resultado fisicoquímico superficial diferente. A esta característica se le conoce como Propiedad Diferencial.

Nombre del Método	Propiedades que se emplea para separar	Principales aparatos
Concentración Gravitacional	Diferencia de velocidad de sedimentación de los minerales	Sedimentador, Hidrociclón, Jig, Canalón Canaletas, Mesa Vibratoria, Espiral, Conos de Separación Centrifugas, entre otros
Concentración Magnética	Susceptibilidad magnética (atracción o no frente a un magneto o imán)	Separador magnético de tambor, rodillos magnéticos, separador magnético tipo carrusel, etc.
Concentración eléctrica	Conductividad eléctrica	Separador eléctrico de alta intensidad
Flotación espumante	Hidrofobicidad y/o hidrofilidad del mineral (mojamiento o no)	Celdas de flotación y columnas de flotación
Flotación selectiva	Ación ctiva Adsorción especifica de un polímero y formación de flóculo Sedimentador	
Coagulación selectiva	Adsorción especifica de iones inorgánicos y formación de un coágulo	Sedimentador

Tabla 1.1 Diferentes Métodos de Concentración de Minerales y Algunos Equipos Empleados

Fuente: (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)

## 1.1.1. Descripción del Tenor

La definición de tenor se emplea especialmente en la minería metálica, pero también se puede extrapolar para uso en minería de minerales industriales que va asociado al porcentaje (en inglés grade) de mineral de interés respecto a toda la masa de material extraída, es primordial en el desarrollo de objetivos que se pretenden alcanzar en la concentración de minerales.

El tenor se puede definir como la relación entre la cantidad de masa de mineral útil o de interés a la cantidad másica o volumétrica en la mena. Es decir, al tenor podemos expresarlo

en gramos de mineral útil por tonelada de material total (g/Tn), en porcentaje, en miligramos por metro cubico de material total ( $mg/m^3$ ), etc.

Acorde a la explicación anterior, matemáticamente se tiene que:

Ecuación 1.1 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)

 $t = \frac{Cantidad de mineral útil}{Cantidad total de minerales extraídos}$ 

Donde:

t= Tenor (g/Tn)

Cantidad de mineral útil= (g)

Cantidad total de minerales extraídos= (Tn)

## 1.1.2. Objetivo Esencial de la Concentración

El objetivo es aumentar la ley o tenor de una especie mineralógica en un flujo llamado concentrado C. Este tenor se denotará como t<sub>c</sub>. (Ver figura 1.1)

En base a lo anterior, el flujo conocido como colas se reducirá substancialmente en lo referente al tenor de la especie mineral de interés  $(t_t)$ , o se puede decir que se elevará la ley de las especies minerales que se juntan al mineral de interés.



Figura 1.1 Esquema general de separación en un concentrador detallando la corriente de entrada (Alimento), y las corrientes de salida (Concentrado y Colas)

Fuente: (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)

En un caso ideal, la ley de la especie mineral de interés en las colas  $(t_t)$  deberá ser cercano a cero o nulo  $(t_t \rightarrow 0)$ . Sin embargo como es muy difícil de llegar a estos resultados en los procesos ideales, se establece un propósito en las plantas concentradoras que es alcanzar un valor de  $t_t$  suficientemente mínimo, acorde a las limitaciones físicas y tecnológicas de la separación.

Es decir:

$$t_c\!>\!t_a\!>\!t_t\ con\ t_t\!\rightarrow\!0$$

## 1.2. Índices Metalúrgicos

Los índices metalúrgicos son números adimensionales que señalan la calidad de la separación realizada en uno o varios procesos de concentración generando información para el escalamiento en el dimensionamiento de plantas de concentración o equipos.

Es de gran importancia que exista un balance de masas para apoyo en la determinación de índices, ya que si no existe un respaldo con el balance de masas, los índices pueden generar varias incoherencias que van a generar desorientación en las decisiones y en el análisis de los circuitos de concentración.

Se admite que en el total de los casos los muestreos y la separación se deben realizar en estado estacionario, esto sucede cuando existe variación en el tiempo de las propiedades del sistema.

Los índices metalúrgicos se dividen en dos tipos:

- Índices que relacionan calidad de la concentración.
- Índices que relacionan capacidad del circuito de concentración.

## 1.2.1. Índices que relacionan calidad de la concentración

Estos se encargan de facilitar información de la calidad de los productos que se logran obtener, ya sea en la etapa de concentración o conjuntamente en la planta.

## 1.2.1.1. Recuperación

Se determina la recuperación como una relación entre una operación de concentración y el peso del material útil o de interés que se encuentra en el concentrado con respecto a la cantidad de ese mismo mineral que se encuentra en la alimentación o que se incorporó a la operación.

Ecuación 1.2 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)

$$R = \frac{Peso \ de \ mineral \ de \ interés \ en \ concentrado}{Peso \ de \ mineral \ de \ interés \ en \ alimento}$$

Donde:

R= Recuperación

Peso de mineral de interés en concentrado= (g)

Peso de mineral de interés en alimento= (g)

#### 1.2.1.2. Razón de enriquecimiento

Es la relación que existe entre el tenor de mineral útil en el concentrado en razón al tenor del mismo mineral en la alimentación, entonces se define así:

Ecuación 1.3 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)

$$R_E = \frac{t_c}{t_a}$$

Donde:

R<sub>E</sub>= Razón de enriquecimiento

tc= tenor de mineral útil en el concentrado (g/Tn)

t<sub>a</sub>= tenor de mineral en alimentación (g/Tn)

#### 1.2.1.3. Índice de selectividad

Este índice se encarga en comparar la calidad de separación entre dos clases A y B, que se pretende separar en el proceso de concentración.

Se define la relación de la siguiente manera:

Ecuación 1.4 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)

$$I.S = \frac{t_a(A) \times t_t(B)}{t_a(B) \times t_t(A)}$$

"Donde: I.S es índice de selectividad,  $t_a(A) y t_a(B)$  son los tenores de los componentes (A) y (B) en la alimentacion de la operación en gr/tn. Los tenores  $t_t(A) * t_t(B)$  son de los componentes (A) y (B) en las colas respectivamente en gr/tn." (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)

## 1.2.2. Índices que relacionan capacidad del circuito de concentración

Estos índices es la información que se necesita para escalamiento, selección de equipos de concentración y dimensionamiento.

#### 1.2.2.1. Razón de concentración

Es la relación entre el flujo másico de sólidos en la alimentación A con respecto al flujo de sólidos en el concentrado C.

Ecuación 1.5 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)

$$RC = \frac{A}{C}$$

Donde:

RC= Razón de concentración

A= Flujo másico de sólidos en la alimentación A (Tn/h)

C= Flujo de sólidos en el concentrado C (Tn/h)

Se tiene que tener presente que este índice no brinda información de calidad, sino de capacidad de los flujos que entraron y salieron del separador, este índice permite también calcular el número de toneladas que se debe alimentar para producir una tonelada de concentrado.

#### 1.2.2.2. Rendimiento de concentración

Es la relación entre el flujo másico en el concentrado con respecto al flujo másico de sólidos en la alimentación, se define de la siguiente manera:

Ecuación 1.6 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)

$$V = \frac{C}{A} = \frac{1}{RC}$$

Donde:

V= Rendimiento de concentración

A= Flujo másico de sólidos en la alimentación A (Tn/h)

C= Flujo de sólidos en el concentrado C (Tn/h)

RC= Razón de concentración

Se aprecia que es el inverso de la razón de concentración y nos facilita la misma información.

#### 1.2.2.3. Eficiencia de la separación

Este índice se ha encargado de conjuntar la información que se ha obtenido en los numerales anteriores, y se la define de la siguiente manera:

Ecuación 1.7 (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)

$$E = \frac{R - V}{1 - V_{IDEAL}}$$

Donde:

E= Eficiencia de separación

R=Recuperación

V= Rendimiento de concentración

## V<sub>IDEAL</sub>= Rendimiento ideal

Se puede encontrar otras expresiones de los índices metalúrgicos que también se los usa en operaciones de plantas concentradoras, a continuación se los detalla:

Nombre del índice metalúrgico	Expresión del índice idealmente	Índices en términos de tenores
Recuperación: R	$R_{IDEAL} = 1$	$R = \left[\frac{t_a - t_t}{t_c - t_t}\right] \frac{t_c}{t_a}$
Razón de Enriquecimiento: $R_E$	$R_{\text{EIDEAL}} = 1/t_a$	$R_E = \frac{t_c}{t_a}$
Índice de Selectividad: I.S.	$I.S{IDEAL} \rightarrow \infty$	$I.S = \frac{t_a(A) \times t_t(B)}{t_a(B) \times t_t(A)}$
Razón de Concentración: RC	$RC_{IDEAL} = 1/t_a$	$RC = \frac{t_c - t_t}{t_a - t_t}$
Rendimiento: V	$V = t_a$	$V = \frac{t_a - t_t}{t_c - t_t}$
Eficiencia de Separación: E	E = 1	$E = \frac{(t_a - t_t)(t_c - t_a)}{t_a(t_c - t_t)(1 - t_a)}$

Tabla 1.2 Índices de Concentración

Fuente: (Bustamante, Gaviria, & Restrepo, 2007)

## 1.3. Campo Magnético

El campo magnético se refiere a líneas de fuerza que se propagan desde el polo norte al polo sur mediante la atmosfera y retorna al polo norte atravesando el material magnético. Es una zona en el espacio donde una carga eléctrica puntual que transita soporta los efectos de una fuerza perpendicular a su desplazamiento. El campo magnético en un punto se representa con un vector B conocido como densidad de flujo magnético o inducción magnética el cual se puede visualizar mediante líneas de inducción.



Figura 1.2 Líneas de fuerza magnética alrededor de una barra imantada

Fuente: (Floyd, 2007)

Es importante recalcar cuando se añade un material no magnético como plástico, madera, papel o vidrio a un campo magnético no existe alteración de sus líneas de fuerza, mientras que cuando se añade un material magnético como el hierro las líneas de fuerza cambian de curso y atraviesan el hierro en lugar de pasar por su alrededor debido a que el hierro genera una trayectoria más fácil de establecer a la del aire.

## **1.3.1.** Flujo magnético (Φ)

Se conoce como flujo magnético al grupo de líneas de fuerza que se trasladan desde el polo norte hacia el polo sur de un imán. El valor de flujo es determinado por el número de líneas de fuerza presentes en un campo magnético, el flujo será más grande e intenso mientras más líneas de fuerza existan.



Figura 1.3 Efecto de materiales no magnéticos y materiales magnéticos en un campo magnético Fuente: (Floyd, 2007)

#### 1.3.2. Densidad de flujo magnético (B)

Es una relación entre la cantidad de flujo por unidad de área perpendicular al campo magnético, según el sistema internacional (SI) su unidad es el Tesla (T) que es igual a un weber por metro cuadrado (Wb/m<sup>2</sup>). La densidad de flujo se expresa de la siguiente manera:

Ecuación 1.8 (Floyd, 2007)

$$B = \frac{\Phi}{A}$$

 $\Phi$  = Flujo magnético

A =Área de la sección transversal

La densidad de flujo o inducción magnética es un fenómeno donde se genera una intensidad de corriente en una espira (vuelta circular del alambre conductor), que es el resultado de la variación del flujo magnético en su interior.

## **1.4. Imanes permanentes**

En la actualidad el uso de imanes permanentes se ha vuelto una parte importante de la tecnología moderna y cada vez son más utilizados.

Se conoce que un imán es permanente si por si solo soporta un flujo utilizable en el entrehierro de un dispositivo y funciona con la ayuda de una excitación eléctrica externa.

Por lo general un imán permanente debe producir altos flujos magnéticos pero con baja masa y debe contar con una excelente estabilidad frente a influencias externas que pudieran causar una des magnetización.

Para el diseño del mismo se puede considerar diversas propiedades de los imanes permanentes, pero existe una característica muy importante que es la curva de desmagnetización que brinda su habilidad para la realización de una tarea específica, la forma de diseño nos brinda información de cómo el imán se comportará al momento de realizar operaciones dinámicas y estáticas.

#### 1.5. Electromagnetismo

Es la obtención de un campo magnético mediante una corriente en un conductor, la corriente genera un campo magnético que se conoce como campo electromagnético alrededor de un conductor. Existen líneas de fuerza invisibles del campo magnético en forma circular y continua alrededor del conductor. Sin embargo el campo magnético no es visible pero tiene la capacidad de producir efectos visibles, el campo es más fuerte cerca del conductor y se debilita cuando se aleja del mismo.



Figura 1.4 Campo magnético alrededor de un conductor

Fuente: (Floyd, 2007)

## 1.5.1. Propiedades electromagnéticas

Existen una variedad de propiedades importantes que tienen una relación directa con campos magnéticos.

## 1.5.1.1. Permeabilidad (µ)

Es la simplicidad con que un campo magnético puede ser establecido con un material y se mide a través de la permeabilidad del material ya que se puede establecer más fácil un campo magnético mientras más alta es la permeabilidad.

La unidad de permeabilidad se encuentra en: webers/ampere-vuelta (Wb/At).

La permeabilidad relativa de un material es la relación de su permeabilidad absoluta a la permeabilidad del aire en el vacío, se define de la siguiente manera:

Ecuación 1.9 (Floyd, 2007)

$$\mu_{\rm r} = \frac{\mu}{\mu_0}$$

 $\mu_r$  = Permeabilidad relativa

 $\mu = Permeabilidad absoluta$ 

 $\mu_0$  = Permeabilidad en el vacío

1.5.1.2. Reluctancia (R)

Se refiere a la oposición del establecimiento de un campo magnético en un material, su valor es directamente proporcional a la longitud de la trayectoria e inversamente proporcional a la permeabilidad y al área de sección transversal, su unidad es el ampere-vuelta/webers (At/Wb) y expresada de la siguiente manera:

Ecuación 1.10 (Floyd, 2007)

$$R = \frac{l}{\mu x A}$$

l = Longitud de la trayectoria magnética

 $\mu$  = Permeabilidad

A =Área de la sección transversal

#### **1.5.1.3.** Fuerza magnetomotriz (Fm)

Se conoce que la corriente que pasa por un conductor genera un campo magnético. La causa de un campo magnético se define como fuerza magnetomotriz el mismo que es el resultado directo del movimiento de una carga o corriente en el conductor. Sus unidades son el amperio-vuelta (Av), se desarrolló sobre la base de una corriente que se encuentra presente en una espira. Se expresa como:

Ecuación 1.11 (Floyd, 2007)

```
Fm = N \ge I
```

#### N = Número de vueltas de conductor

#### I = Corriente en amperes (A)



Figura 1.5 Circuito magnético básico Fuente: (Floyd, 2007)

## 1.5.2. El electroimán

Se conoce al electroimán básico como una bobina de espiras envuelto alrededor de su núcleo que es fácil de magnetizar.

Cuando una bobina se conecta a una fuente eléctrica o a una batería se genera un campo magnético, mientras que si se invierte la corriente la dirección del campo magnético también se invierte, es más fácil establecer un campo magnético cuando se acercan entre si los polos norte y sur, ya que se vuelve más pequeña la separación entre ellos por ende la reluctancia se reduce.



Figura 1.6 La inversión de la corriente en la bobina causa que el campo electromagnético se invierta Fuente: (Floyd, 2007)

Si un material ferromagnético se coloca dentro del solenoide (bobina formada por un alambre enrollado en espiral) y se aplica una corriente por el solenoide, el campo magnético aumenta enormemente porque el material se convierte en imán. El campo magnético resultante es la suma de los campos debido a la corriente y del material, puede ser cientos o miles de veces el campo debido a la corriente sola. Tal solenoide con núcleo ferromagnético es un electroimán.

La fuerza de un electroimán depende de cuatro factores:

- El tipo de material del núcleo
- Tamaño y forma del material del núcleo
- El número de vueltas de la bobina
- El valor de la corriente en la bobina.

En general, el imán será más potente cuando:

- "El material del núcleo tenga la permeabilidad más elevada
- El material del núcleo tenga la mayor área de la sección recta y más corta longitud para las líneas de flujo, esto dará lugar a una reluctancia baja

El número de vueltas y la corriente sea lo más grande posible. Esto da lugar a una gran fuerza magneto-motriz". (Sánchez, Diseño e implementación de electroimán y actuador electrónico aplicado a un sistema de levitación magnética, 2010)

#### 1.5.3. Intensidad del Campo Magnético (H)

Se define también como fuerza magnetizante, en un material se define como la fuerza magnetomotriz por la unidad de longitud del material, su unidad es el ampere-vuelta por metro (At/m) expresándose de la siguiente manera:

Ecuación 1.12 (Floyd, 2007)

$$H = \frac{F_m}{l}$$

Fm = Fuerza magnetomotriz

l = Longitud del material



Figura 1.7 Parámetros que determina la intensidad de un campo magnético y la densidad de flujo Fuente: (Floyd, 2007)

## 1.6. Concentración Magnética

Los concentradores magnéticos utilizan la diferencia de las propiedades magnéticas de los minerales contenidos en las menas y se emplean para liberar minerales de interés de la ganga no magnética, como por ejemplos la magnetita del cuarzo, los contaminantes magnéticos e incluso varios minerales de interés de los valores no magnéticos. Un modelo de esto es la casiterita (SnO<sub>2</sub>) que está conformada por estaño y muchas veces asociada con trazas de wolframita (FeMn), de magnetita (Fe3O4) que se obtienen mediante separadores magnéticos.

Todos los elementos cambian en alguna forma al exponerlos a un campo magnético, sin embargo en la mayoría de substancias el efecto es muy ligero para determinarlo.

## 1.6.1. Separación magnética de baja intensidad

La separación mediante vía seca de baja intensidad se centra primordialmente a la concentración de arenas gruesas, que son fuertemente magnéticas; a este proceso se lo conoce como mazorca magnética por la forma del magneto y a menudo se lleva a cabo en separadores de tambor. Cuando el material mide menos de 0.5 cm, la separación en seco es cambiada por los métodos húmedos, generando menos pérdidas de polvo y obteniendo un producto más limpio.

La separación húmeda de baja intensidad en la actualidad se usa mucho para purificar el medio magnético en el proceso de separación en medio pesado, como también para concentración de menas ferromagnéticas.

## 1.6.2. Separación magnética de alta intensidad

El separador magnético de alta intensidad se usa para separar partículas débilmente paramagnéticas, estas se eliminan de una alimentación de mena sólo si presentan un contacto directo con el polo del extremo del magneto.

Las máquinas de alta intensidad trabajan generalmente con intensidades de campo mayores y estos equipos se limitaban solo al uso en menas secas y se usa comercialmente desde 1908.

La separación en seco de alta intensidad, se usa generalmente en menas que contienen algún material más fino que 75µm, la eficiencia al usar este sistema se ve limitada por efectos de las corrientes de aire, la adhesión partícula-partícula y la adhesión partícula-rotor.

En los últimos años se ha generado el mayor avance tecnológico en el campo de la separación magnética, se ha desarrollado los separadores húmedos continuos de alta intensidad.

## 1.6.3. Clasificación de los Minerales para la Separación Magnética

Los elementos se clasifican en dos grandes grupos dependiendo de cómo los atrae o repele un magneto:

## 1.6.3.1. Paramagnéticos

Los materiales paramagnéticos son captados a través de las líneas de fuerza magnética hacia los puntos donde existe mayor intensidad de campo. Estos elementos se pueden concentrar mediante separadores magnéticos de alta intensidad. Dentro de estos minerales que se obtienen mediante separadores magnéticos comerciales, están, el rutilo (TiO2), monazita (fosfato de elementos de tierras raras), ilmenita (FeTiO3), wolframita (FeMn) WO4, pirrotita (FeS), siderita (FeCO3), cromita (FeCrO4), hematita (Fe2O3) y los minerales de manganeso.

Varios elementos son paramagnéticos en sí mismo como el Co, Ni, Cr, Mn, Ce, Ti, O y los metales que son parte del grupo del platino, sin embargo en la mayoría de los casos las características paramagnéticas de los minerales es debido a la presencia de hierro.

## 1.6.3.2. Ferromagnéticos

El ferromagnetismo es considerado como un caso particular de paramagnetismo. Estos minerales poseen muy alta susceptibilidad para las fuerzas magnéticas y conservan magnetismo al alejarse del campo. Los elementos ferromagnéticos se pueden liberar con los separadores magnéticos de baja intensidad generando buena separación.

## 1.6.3.3. Diamagnéticos

Los minerales diamagnéticos se repelen a lo largo de las líneas de fuerza magnética hasta donde la intensidad de campo es muy inferior. En este punto las fuerzas son muy pequeñas y los elementos diamagnéticos no se pueden concentrar magnéticamente.

## 1.6.4. Principio de la Separación Magnética

La selectividad de la separación magnética se encuentra determinada por el balance de las fuerzas que interactúan sobre cada una de las partículas a separar. Se puede determinar las siguientes fuerzas:

- Fuerza magnética
- Fuerza de gravedad
- Fuerza centrífuga
- Fuerzas hidrodinámicas
- Fuerzas interparticulares

## 1.6.5. Diseños para Separadores Magnéticos

Los separadores magnéticos se pueden presentar o diseñar de dos maneras, pueden ser de tipo electroimanes o imanes permanentes, según el uso y disponibilidad que vaya a presentar el equipo.

Para permitir el tratamiento de varios materiales en el equipo se deberá incorporar medidas necesarias para regular la intensidad del campo magnético.

## 1.7. Clasificación de los Separadores Magnéticos

Existe una gran variedad de equipos magnéticos para la concentración de minerales los cuales se detallan a continuación.

## 1.7.1. Separadores Magnéticos para la Separación de Fragmentos Metálicos

Se pueden encontrar un amplio grupo de equipos magnéticos para realizar la separación de fragmentos metálicos como: placas magnéticas, poleas, tambores, etc.

## 1.7.1.1. Placas magnéticas

Se procede a eliminar fragmentos y piezas que se desenvuelven por conductos y canaletas inclinadas, estas se adhieren en una placa magnética a razón que el material se va deslizando por un canal o conducto, a este equipo se le debe limpiar periódicamente.

Las placas magnéticas realizan su función de manera electromagnética o mediante imanes permanentes.

#### 1.7.1.2. Poleas

Estas poleas se usan para separar impurezas ferrosas que están contaminando productos que se están transportando mediante correas transportadoras u otros medios. Las poleas cuentan con una gran capacidad de atracción por lo mismo se encargan de proteger molinos, trituradoras, las mismas correas transportadoras y otras máquinas que trabajan en el tratamiento de minerales.



Figura 1.8 Operación de poleas magnéticas.

Fuente: (Pávez, 2005)

Las poleas se articulan en un cilindro de acero inoxidable que tiene buena resistencia mecánica y en interior se emplaza la bobina en el caso de ser poleas electromagnéticas, o en el conjunto de imanes permanentes, o en el caso de las poleas magnéticas. El campo magnético se genera a lo largo de toda la superficie de la polea.

#### 1.7.1.3. Tambores

Los tambores a diferencia de las poleas se instalan exteriormente a la correa transportadora, se emplean para limpiar de manera automática los productos que son transportados por cintas o en caída libre, de manera semejante que en el caso de las poleas en la generación del campo
magnético se puede presentar de las dos razones: por medio de una bobina electromagnética o a su vez por un conjunto de imanes permanentes.

Los tambores pueden separar de forma ideal materiales finos, pero también captan fragmentos de hierro de tamaño y peso notables.

## 1.7.1.4. Separadores suspendidos

Este conjunto tiene como objetivo separar piezas ferrosas o impurezas del material no magnético transportado por alimentadores vibratorios y correas. Este tipo de separador se instala externamente al transportador y de esa manera atraen el material ferroso que pasa sobre o bajo el separador.

Se puede limpiar de manera automática o manualmente. Los separadores de manera automática tienen sistemas automáticos de limpieza, mientras que la limpieza manual se requiere de tiempo, ya que un operador debe retirar de manera manual el material ferroso que se adhiere.

El campo magnético se puede generar de dos maneras: mediante imanes permanentes o electroimanes (bobina energizada).



Figura 1.9 Separadores magnéticos suspendidos.

Fuente: (Pávez, 2005)

## **1.7.1.5.** Parrillas magnéticas

El uso primordial de las parrillas magnéticas eliminar las partículas finas de hierro como también fragmentos metálicos y este sistema consiste en un conjunto de barras magnetizadoras, a este equipo se debe brindar limpieza periódica.

Este equipo se puede encontrar en el mercado con imanes de tierras raras o mediante imanes convencionales, estos son de gran intensidad y pueden extraer del producto las contaminaciones ferrosas finas y las débilmente magnéticas.

## 1.7.2. Separadores magnéticos por vía seca

## **1.7.2.1.** Separadores de banda transversal de alta intensidad

Este separador atrapa los minerales magnéticos y los retira de la cinta de alimentación depositándolos en un lado. La concentración es limpia y libre de materiales no magnéticos retenidos, la aglomeración se realiza por elevación directa. La banda transversal se ha empleado para separar monacita, wolframita y otros minerales de interés. Estos equipos son de baja capacidad.

Los principales usos son las siguientes:

- Obtención de minerales no magnéticos finos (rutilo) en relaves magnéticos molidos
- Producción de tantalita, wolframita y otros minerales de elevado valor unitario
- Concentración de minerales sin afinidad magnética (casiterita) desde minerales magnéticos.

## 1.7.2.2. Separadores de rodillo de alta intensidad

El equipo de separación mediante rodillo inducido es empleado en procesos de concentración como de purificación. Se puede aplicar para la obtención de elementos pesados como la monazita (fosfato de elementos de tierras raras), ilmenita (FeTiO3) y granada a partir de las arenas de playa; reducción de óxidos de hierro en dolomita [CaMg(CO3)2], bórax (Na2B4O7) y sienitos nefelínicos; remoción de pirrotita (FeS) y cromita (FeCrO4) en aglomerados diamantíferos o en concentración misma de wolframita (FeMn), rutilo (TiO2), manganeso y cromita (FeCrO4).

Estos separadores son desarrollados con algunas combinaciones de rodillos de tal manera que los que no presentan magnetismo van siendo reprocesados en etapas sucesivas. En estos equipos el material debe estar seco para obtener un flujo uniforme con una granulometría de malla 8 a 150, para que el resultado sea óptimo. Empleando rangos granulométricos estrechos se obtienen los mejores resultados.

Ciertas aplicaciones de los concentradores de rodillo inducido son los siguientes:

- Saneamiento magnético final del zircón (ZrSiO4).
- Separación de ilmenita desde concentrados de rutilo.

• Remoción de contaminaciones de hierro a partir de arenas vidriosas y minerales de hierro desde materias industriales.

El equipo magnético de rodillos fabricado con imanes de tierras raras, que es un imán permanente elaborado con aleaciones de varios elementos químicos como por ejemplo neodimio y samario-cobalto, con elevado gradiente y de alta intensidad es incorporado con rodillos de 5" hasta 60" y en diámetros entre 3" o 4". Estos concentradores están disponibles con 1, 2 o 3 rodillos ubicados en cascada en el equipamiento mismo, son muy utilizados para la separación de magnetita mediante vía seca de los minerales magnéticamente débiles.



Figura 1.10 Separador magnético de banda transversal de alta intensidad.

Fuente: (Pávez, 2005)

# **1.7.2.3.** Concentradores magnéticos de tambor mediante vía seca de baja, mediana y alta intensidad

En las fábricas de cemento se encuentran disponibles los separadores de tambor de baja intensidad y alta velocidad para aprovechamiento en seco, también se emplean en la concentración de menas de hierro magnetíticos, arenas de fundición, purificación de escorias finamente molidas. Estos equipos emplean la fuerza magnética y la fuerza de gravedad para la obtención con una mejor separación. Utilizan una velocidad periférica entre 90 a 450 m/min y con capacidades de 15 a 50 tn/h por metro de ancho del tambor. Los materiales más gruesos desarrollan capacidades mayores en donde algunos fabricantes indican capacidades hasta de 120 tn/h por metro de ancho con trabajos de desbaste en menas magnéticas dentro de un rango granulométrico de 1" a <sup>1</sup>/<sub>4</sub>". Son eficientes trabajando con materiales ya

clasificados que tienen granulometría estrecha pudiendo separar elementos en rangos de tamaños más gruesos (por ejemplo, entre 1" a ¼") y en categoría granulométrica relativamente finos (ejemplo, 100 mallas). Se debe recalcar como regla general que mientras más fino es el material mayor tienen que ser la velocidad periférica. Las dimensiones más comunes para estos tipos de tambor son 120" de ancho y 36" de diámetro.

## 1.7.3. Separadores magnéticos por vía húmeda

Se puede encontrar tres tipos de separadores magnéticos por vía húmeda, son los siguientes:

- Filtros magnéticos.
- Separadores magnéticos de alta intensidad por vía húmeda.
- Separadores de tambor con magnetos permanentes y electromagnéticas.

## 1.7.3.1. Filtros magnéticos

En los filtros magnéticos se induce un elemento filtrante magnetizado mediante un electroimán externo o por una fuente permanente. El material que se pretende limpiar o descontaminar se pasa a través de este elemento y durante este proceso se recogen las partes magnéticas. Este equipo se deberá limpiar periódicamente para eliminar las partículas magnéticas que se han acumulado.

Este producto tiene utilidad para realizar el tratamiento de productos finos, mediante la separación por vía húmeda de pequeños porcentajes contaminantes ferrosos débilmente magnéticos. Los filtros magnéticos trabajan con matrices de separación y los mismos generan campos magnéticos con altas intensidades y se recomienda para tratar materiales como: caolín, talco, feldespatos.

## 1.7.3.2. Separadores magnéticos de alta intensidad por vía húmeda

La creación de estos separadores ha sido muy importante en el margen económico marcando una tendencia en la tecnología de la separación de minerales, ya que debido a este equipo se ha logrado beneficiar de grandes masas de menas débilmente magnéticas, en especial menas de hierro mostrando altos parámetros de recuperación, e incluso se ha logrado trabajar con fracciones ultra-finas, es decir que pasan la malla 200.

Este equipo se encuentra constituido por los siguientes elementos básicos:

• Bobina electromagnética que trabaja como fuente de campo magnético.

- Un dispositivo para alimentar la pulpa y agua del lavado.
- Dispositivos colectores para productos magnéticos, no magnéticos y productos medios.
- Un disco o anillo circular, que gira en torno a un plano horizontal entre los polos creados por las bobinas y que contienen ciertos elementos que evitan la dispersión del flujo magnético.

Se retiran de la matriz las partículas magnéticas, en cambio las partículas no magnéticas se dirigen hacia los chutes de colección y descarga.

Entre las aplicaciones más importantes de los separadores magnéticos de alta intensidad en húmedo son las siguientes:

- Mejoramiento de la remoción de impurezas cuando se requiere extraer el material no magnético tales como: apatita, arenas vidriosas, talco, arcilla, caolín, feldespato, carbón, barita, bauxita, grafito, casiterita.
- Excelente producción de un concentrado magnético cuando se requiere mineral magnético tales como: pirrotita, hematita, ilmenita, siderita, menas de manganeso, cromo, tungsteno, níquel, tantalio y otros minerales que presenten características magnéticas.
- Se puede realizar pre-concentraciones para realizar un tratamiento extra mediante un proceso diferente como: minerales de uranio, platino, oro, hierro, escorias, residuos, manganeso.
- Este equipo ayuda a recuperar materiales finos de menas de hierro incluyendo hematita espectacular, itabirito, taconita y limonita.
- Se puede remover menas de tungsteno, gangas magnéticas desde casiterita, arenas de vidrio y una extensa gama de productos de la industria mineral.



Figura 1.11 Separador magnético Jones de alta intensidad en húmedo tipo carrusel.

Fuente: (Pávez, 2005)

## **1.7.3.3.** Separadores de tambor con imanes permanentes y electroimanes.

Este tipo de separadores se pueden emplear electromagnetos o magnetos permanentes, se puede encontrar en los mercados separadores de baja y alta intensidad.

Los de baja intensidad se los fabrica con imanes permanentes y se los recomienda para la separación magnética de minerales que son fuertemente magnéticos, tales como: martita y magnetita.

Los separadores de tambor están disponibles en el mercado en tamaños con diámetros de 24" a 48" y con anchos de hasta 120".

Para realizar y poder cumplir con las diferentes aplicaciones, los separadores magnéticos de tambor se dividen en tres tipos: concurrentes, contra rotación y contracorriente, fundamentalmente la diferencia que existe entre estos tipos de separadores está en el diseño del estanque y en la dirección del flujo de alimentación en relación a la rotación del tambor.

 a) Separadores de tambor del tipo concurrente: Este tipo de concentrador resulta ser muy eficaz para operaciones que se requieren de un concentrado magnético extremadamente limpio, partiendo de una alimentación relativamente gruesa, el concentrado es llevado delante por el tambor y pasa a través de una abertura donde se comprime y desagua antes de dejar el separador.

Se usan principalmente en sistemas de recuperación de medio denso.

- b) Separadores de tambor del tipo contra-rotación: Este concentrador es usado en operaciones de desbaste, es decir cuando es más importante obtener menores pérdidas de material magnético en los relaves que obtener un concentrado limpio.
  En estos separadores la alimentación fluye en dirección opuesta a la rotación. Se aplica a materiales con granulometría inferior a la malla 40 (a veces hasta materiales inferiores a la malla 10).
- c) Separadores de tambor del tipo contra corriente: Se trabaja con materiales de granulometría fina menores a la malla 65 o más finos, para operaciones de limpieza. En este equipo las colas son forzadas a trasladarse en dirección opuesta a la rotación del tambor y el descargue se lo realiza en el interior del canal de colas.





Fuente: (Pávez, 2005)

Una vez conocido los tipos de separadores, se opta por diseñar un separador electromagnético de tambor para la separación de minerales mediante vía seca y que al mismo se incorpore un variador de intensidad magnética, ya que los tambores pueden separar de forma ideal materiales finos, pero también captan fragmentos de hierro de tamaño y peso notables.

## CAPÍTULO II

## DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN

Una vez realizadas las debidas investigaciones sobre el correcto funcionamiento que debe presentar el equipo, se ha optado diseñar y construir un separador electromagnético de tambor, ya que con el uso de electroimanes los beneficios serán múltiples.

Se ha optado el diseño y construcción del separador electromagnético de tambor por las siguientes razones:

- Facilidad en la construcción del separador.
- Costo asequible al presupuesto planteado.
- Accesibilidad en la obtención de materiales en el mercado.
- Un equipo que garantiza resultados óptimos.

El sistema mecánico del separador se ha realizado teniendo presente que se cuenta con una tolva (Figura 2.3) en el laboratorio de Ingeniería en Minas la misma que servirá como fuente de alimentación para el separador electromagnético, el material a usar será depositado en la tolva con una granulometría homogénea que caerá al cilindro separador mediante el dosificador vibratorio, una vez que el material haga contacto con el cilindro los campos magnéticos intervendrán para atraer a las partículas con afinidad magnética las cuales se adhieren al cilindro giratorio, hasta llegar a una zona de menor magnetismo que mediante una escobilla nos permite desprender el mineral del cilindro el cual caerá directamente en una bandeja que permite el paso al recipiente colector de mineral magnético, mientras que el material estéril que no cuenta con afinidad magnética caerá directamente por acción de la gravedad y peso del material a otro bandeja.

## 2.1. Diseño del equipo

Una vez definido el tipo de separador magnético que se va a elaborar, se procede a realizar el diagrama esquemático del mismo en donde se detalla cada una de las partes del equipo, considerando parámetros y dimensiones de la tolva de alimentación que se dispone en el laboratorio de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay, para obtener datos como: la altura y ancho del equipo para de esta manera tener un equipo proporcional a la tolva.



Figura 2.1 Esquema de tambor, electroimanes y recipientes de mineral



Figura 2.2 Diagrama de componentes



Figura 2.3 Sistema del equipo acoplado en la tolva

## 2.2. Diseño mecánico: cálculos y ecuaciones

En base a lo requerido y obtenido de la investigación bibliográfica se determina que la velocidad de rotación del tambor debe estar dentro de los parámetros entre 40 a 70 (rpm). Como se encuentra a disposición un motor de 0,5 (HP) que gira a una velocidad de 1725 (rpm), es necesario acoplar un sistema reductor con una relación de transmisión 1:36 el cual genera una velocidad en la salida de 48 (rpm), siendo esta velocidad correcta por estar dentro de los parámetros investigados anteriormente.

Para la determinación del tamaño del tambor magnético se ha tenido en consideración el tamaño de la bandeja dosificadora de la tolva que es de 10 (cm) de ancho, por lo que se decide elaborar un tambor 2,5 veces más ancho que la bandeja dosificadora, es decir de 25 (cm) y con un diámetro de 20 (cm), lo que permite que el material caiga en el tambor de una manera distribuida.

## 2.2.1. Parámetros requeridos de acuerdo a cálculos

- Motor trifásico
  - Potencial eléctrico = 110/220 (V)
  - Número de rotaciones por minuto = 1725 (rpm)
- Sistema moto-reductor
  - Relación moto-reductor = 1:36

Reducción a la salida = Número de rotaciones por minuto \* Relación motoreductor

Reducción a la salida = 1725 (rpm) x 
$$\frac{1}{36}$$

Reducción a la salida = 48 (rpm)

- Reducción a la salida = 48 (rpm) en el cilindro
- Sistema de transmisión
  - Polea conductora
  - Eje del moto-reductor
- Banda trapezoidal
  - Polea conducida
  - Eje del cilindro separador

#### 2.2.2. Cálculo de velocidad angular del sistema

- Datos:
  - Diámetro exterior del tambor ( $\emptyset$ ) = 200 (mm)
  - Reducción a la salida del cilindro = 48 (rpm)

$$48\left(\frac{\text{rev}}{\text{min}}\right) \times \frac{1}{60}\left(\frac{\text{min}}{\text{s}}\right) = 0.8 \left(\frac{\text{rev}}{\text{s}}\right)$$

 $\circ$  1 (rev/s) = 2 $\pi$  (rad/s)

$$\frac{1 \text{ rev/s}}{0.8 \text{ rev/s}} = \frac{2\pi \text{rad/s}}{\omega}$$
$$\omega = \frac{0.8 \text{ rev/s x } 2\pi \text{rad/s}}{1 \text{ rev/s}}$$
$$\omega = 5.02 \left(\frac{\text{rad}}{\text{s}}\right)$$

## 2.2.3. Cálculo de la velocidad periférica del cilindro

Se conoce que los equipos separadores además de emplear la fuerza magnética y la fuerza de gravedad, utilizan un efecto de centrifugación para la obtención de mineral magnético con una mejor separación, por lo que es necesario conocer la velocidad periférica del equipo.

- Datos:
  - Velocidad angular ( $\omega$ ) = 5,02 (rad/s)
  - Radio (r) = 10 (cm) = 0,1 (m)
  - Velocidad periférica = v

Ecuación 2.1 (Young & Freedman, 2009)

$$v = \omega x r$$
$$v = 5,02 \frac{rad}{s} x 0,1 m$$

$$v = 0.5 \left(\frac{m}{s}\right)$$

## 2.2.4. Cálculo del perímetro del cilindro

Para obtener este dato se requiere conocer el diámetro del cilindro, el mismo que es de 200 (mm), el cálculo se detalla a continuación:

- Datos:
  - Diámetro exterior del cilindro ( $\emptyset$ ) = 200 (mm) = 0,2 (m)
  - o Plancha de acero inoxidable austenítico modelo AISI-304

Perímetro =  $\pi \times \emptyset$ Perímetro =  $\pi \times 200 \text{ (mm)}$ Perímetro = 628,32 (mm) Perímetro = 0,628 (m)

## 2.2.5. Peso del cilindro vacío

- Datos:
  - Densidad del acero inoxidable (p) = 7980 (kg/m<sup>3)</sup>
  - Longitud del cilindro (l) = 250 (mm) = 0.25 (m)
  - Espesor de la plancha (e) = 3 (mm)
  - Volumen del cilindro (V)

V = Perimetro x longitud del cilindro x espesor

$$V = 0,628 \text{ m x } 0,25 \text{ m x } 0,003 \text{ m}$$
$$V = 4,71X10^{-4} \text{ (m}^3)$$
$$V = 471 \text{ (cm}^3)$$

• Peso del cilindro vacío (kg) =  $P_1$ 

Ecuación 2.2 (Young & Freedman, 2009)

 $P_1 =$  Volumen del cilindro \* densidad del acero

$$P_1 = 4,71X10^{-4}m^3 \times 7980 \frac{kg}{m^3}$$
  
 $P_1 = 3,75 (kg)$ 

## 2.2.6. Peso de la tapa del cilindro

- Datos:
  - Diámetro de la tapa ( $\emptyset$ ) = 200 (mm) = 0,2 (m)
  - Tapa de grilón
  - Densidad de grilón (p) =  $1140 (kg/m^3)$
  - $\circ$  Espesor de la plancha (e) = 20 (mm)
  - Área de las tapa  $(m^2) = A$

Ecuación 2.3 (Young & Freedman, 2009)

$$A = \frac{\pi \times \emptyset^2}{4}$$
$$A = \frac{\pi \times (0, 2m)^2}{4}$$
$$A = 0,0314 \text{ (m}^2)$$

• Peso de una tapa (kg) =  $P_2$ 

Ecuación 2.4 (Young & Freedman, 2009)

 $P_2 = \text{Årea x espesor x densidad del acero}$  $P_2 = 0,0314 \text{ m}^2 \text{ x } 0,02 \text{ m x } 1140 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$  $P_2 = 0,71 \text{ (kg)}$ 

El cilindro se encuentra sujetada a una sola tapa, por lo tanto el peso total que interviene en el cilindro es:

$$P_2 = 1 \ge 0.71 \text{ kg}$$
  
 $P_2 = 0.71 \text{ (kg)}$ 

#### 2.2.7. Peso del eje sujeto al cilindro

El diámetro del eje del cilindro es de 20 (mm), el mismo que se toma en relación al diámetro del eje del reductor.

- Datos:
  - Diámetro del eje central ( $\emptyset$ ) = 20mm = 0,02m
  - $\circ$  Longitud total del eje (l) = 350mm = 0,35m
  - Material del eje central: Acero de transmisión
  - Densidad del acero (p) = 7850kg/m<sup>3</sup>
  - Área del eje central  $(m^2) = A$

$$A = \frac{\pi x \, \emptyset^2}{4}$$
$$A = \frac{\pi x \, (0,02m)^2}{4}$$
$$A = 3,14X10^{-4} \, (m^2)$$

 $\circ$  Volumen del eje central (m<sup>3</sup>) = V

V = Área del eje central x longitud del eje $V = 3,14X10^{-4} \text{ m}^2 \text{ x } 0,35 \text{ m}$ 

$$V = 1,1X10^{-4} (m^3)$$

• Peso del eje central (kg) =  $P_3$ 

 $P_3 =$  Volumen x densidad del acero

$$P_3 = 1,1X10^{-4} \text{ m}^3 \text{ x } 7850 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$
  
 $P_3 = 0,86 \text{ (kg)}$ 

#### 2.2.8. Peso de acoples y pernos de sujeción en tapa del cilindro

Se ha considerado en este punto todos los pernos y acoples que se han integrado al equipo, se han usado 16 conjuntos, considerando dentro de cada conjunto a los pernos, arandelas y tuercas, se detalla de la siguiente manera:

- Datos:
  - Peso total de acoples (kg) = 0,066 (kg)
  - Diámetro de pernos = 3/8 (in)
  - Diámetro de arandelas = 3/8 (in)
  - Dimensión de tuercas = 3/8 (in)
  - Cantidad a usar = 16 pernos, 16 arandelas y 16 tuercas
  - Peso unitario de un conjunto de sujeción  $(P_4) = 0.04$  (kg)
  - Peso total de sujeción de tapas del cilindro  $(P_4) = 0,66$  (kg)

#### 2.2.9. Peso de anillos sujetados al cilindro

Se ha añadido al cilindro dos anillos de aluminio que impidan que el material no se disperse de la zona de magnetización, el peso de los anillos son los siguientes:

- Datos:
  - Material aluminio
  - Densidad del aluminio (p) =  $2700 \text{ (kg/m^3)}$
  - Espesor de anillo = 15 (mm) = 0,015 (m)
  - Diámetro exterior del anillo ( $\emptyset$ ) = 0,23 (m)
  - Diámetro interior del anillo ( $\emptyset$ ) = 0,20 (m)
  - Área del anillo (m<sup>2</sup>) =  $A_T$

$$A_{T} = \frac{\pi x (\emptyset_{1})^{2}}{4} - \frac{\pi x (\emptyset_{2})^{2}}{4}$$
$$A_{T} = \frac{\pi x (0,23m)^{2}}{4} - \frac{\pi x (0,2)^{2}}{4}$$
$$A_{T} = 0,042 (m^{2}) - 0,0314 (m^{2})$$
$$A_{T} = 0,01 (m^{2})$$

• Volumen del anillo  $(m^3) = V$ 

V = Área del anillo x espesor V = 0,01 m<sup>2</sup> x 0,015 m V = 1,5X10<sup>-4</sup> (m<sup>3</sup>)

• Peso del anillo (kg) =  $P_5$ 

 $P_5$  = Volumen x densidad del aluminio $P_5 = 1{,}5X10^{-4}~m^3~x~2700~\frac{kg}{m^3}$   $P_5 = 0{,}405~(kg)$ 

El cilindro se encuentra acoplado a dos anillos, por lo tanto el peso total que interviene en el cilindro de los anillos es:

$$P_5 = 2 \ge 0.405$$
kg  
 $P_5 = 0.81$  (kg)

#### 2.2.10. Peso total del material a clasificar

Durante el proceso de separación la cantidad a trabajar es de 10 (kg), peso que no ingresa totalmente al cilindro, ya que la caída del material al tambor es de manera sincronizada, por lo mismo se considera que el valor de masa que interviene de manera constante es de 0,5 (kg), dato que permite llegar a obtener valores posteriores.

- Datos:
  - Peso total = 10 (kg)
  - Peso que interviene en la caída al cilindro ( $P_6$ ) = 0,5 (kg)

### 2.2.11. Pesos que intervienen en el sistema

Una vez obtenido todos los pesos que intervienen en el sistema, se procede a obtener un total, peso que nos permite conocer datos del sistema.

Componente	Cantidad	Peso unitario (kg)	Peso total (kg)
Cilindro Separador	1	3,75	3,75
Tapa lateral cilindro giratorio	1	0,71	0,71
Eje de giro	1	0,86	0,86
Anillos del cilindro	2	0,405	0,81
Pernos de sujeción de tapas	16	0,04	0,66
Suelda	1	0,25	0,25
Material a clasificar	1	0,5	0,5
Total			7,54

Tabla 2.1 Pesos que intervienen en el sistema

#### 2.2.12. Cálculo de la inercia del sistema giratorio

Se calcula este parámetro para determinar la resistencia que imponen cada uno de los elementos al movimiento rotatorio que intervienen en el equipo.

#### **2.2.12.1.** Inercia en el cilindro (Ix<sub>1</sub>):

- Datos:
  - Masa del cilindro (m) = 3,75 (kg)
  - Diámetro mayor  $(d_0) = 0,2 (m)$
  - Diámetro menor  $(d_1) = 0,14 (m)$

Ecuación 2.5 (Richard G Budynas y J Keith Nisbett , 2008)

$$Ix_{1} = \frac{m}{8} \{ (d_{0}^{2}) - (d_{1}^{2}) \}$$

$$Ix_{1} = \frac{3,75 \text{ kg}}{8} \{(0,2 \text{ m})^{2} - (0,14 \text{ m})^{2}\}$$
$$Ix_{1} = 0,028 \text{ (kgm}^{2})$$

## 2.2.12.2. Inercia en la tapa fija (Ix<sub>2</sub>)

- Datos:
  - Masa de la tapa (m) = 0,71 (kg)
  - Diámetro de la tapa (d) = 0,2 (m)

Ecuación 2.6 (Richard G Budynas y J Keith Nisbett , 2008)

$$Ix_{2} = \frac{md^{2}}{8}$$
$$Ix_{2} = \frac{(0,71 \text{ kg}) \text{ x} (0,2 \text{ m})^{2}}{8}$$
$$Ix_{2} = 3,55 \text{ X} 10^{-3} \text{ (kgm^{2})}$$

#### 2.2.12.3. Inercia en el eje (Ix<sub>3</sub>)

- Datos:
  - Masa del eje (m) = 0.8 (kg)
  - Diámetro del eje (d) = 0,02 (m)

Ecuación 2.7 (Richard G Budynas y J Keith Nisbett , 2008)

$$Ix_3 = \frac{md^2}{8}$$

$$Ix_{3} = \frac{(0.8 \text{ kg}) \text{ x } (0.02 \text{ m})^{2}}{8}$$
$$Ix_{3} = 4X10^{-5} \text{ (kgm}^{2}\text{)}$$

#### 2.2.12.4. Inercia en los anillos (Ix<sub>4</sub>)

- Datos:
  - Masa de anillos (m) = 0.81 (kg)
  - Diámetro mayor  $(d_0) = 0,23 (m)$
  - Diámetro menor  $(d_1) = 0,2 (m)$

Ecuación 2.8 (Richard G Budynas y J Keith Nisbett , 2008)

$$Ix_{4} = \frac{m}{8} \{ (d_{0}^{2}) - (d_{1}^{2}) \}$$
$$Ix_{4} = \frac{0.81 \text{ kg}}{8} \{ (0.23 \text{ m})^{2} - (0.2 \text{ m})^{2} \}$$
$$Ix_{4} = 9.4 \times 10^{-3} \text{ (kgm}^{2})$$

#### 2.2.12.5. Inercia total del sistema giratorio (I<sub>T</sub>)

$$I_{T} = Ix_{1} + Ix_{2} + Ix_{3} + Ix_{4}$$
$$I_{T} = (0,028 + 3,55x10^{-3} + 4x10^{-5} + 9,4x10^{.3})(kgm^{2})$$
$$I_{T} = 0,041(kgm^{2})$$

#### 2.2.13. Aceleración angular (α)

La aceleración angular está representada por la velocidad angular del tambor magnético en relación al tiempo de arranque para encender el motor-reductor, siendo medido un tiempo de cuatro milisegundos.

- Datos:
  - Velocidad angular ( $\omega$ ) = 5,02 (rad/s)

• Tiempo (t) =  $4x10^{-3}$  (s)

$$\alpha = \frac{\omega}{t}$$
$$\alpha = \frac{5,02 \text{ rad/s}}{4 \times 10^{-3} \text{ s}}$$
$$\alpha = 1255 \frac{\text{rad}}{\text{s}^2}$$

#### 2.2.14. Torque generado en la escobilla (Te)

La escobilla genera una fuerza de fricción directamente al movimiento del cilindro de 4,55 kilogramos fuerza  $(kg_f)$  y que multiplicado por el radio del cilindro se obtiene el torque provocado por la escobilla al cilindro.

- Datos:
  - Fuerza radial en la escobilla ( $F_r$ ) = 4,55 (kg<sub>f</sub>)
  - Coeficiente de fricción del acero inoxidable ( $\mu$ ) = 0,25
  - Radio del cilindro (r) = 0,1 (m)
  - $\circ$  1 (kg<sub>f</sub>) = 9,81 (N)

Fricción =  $F_r x \mu$ Fricción = 4,55 (kg<sub>f</sub>) x 0,25 Fricción = 1,14 (kg<sub>f</sub>)

1 (kg <sub>f</sub> )	_ 9,81 (N)
1,14 (kg <sub>f</sub> )	Fricción
Fricción =	1,14 x 9,81
Fricción =	11,18 (N)

 $\circ$  Torque en escobilla (T<sub>e</sub>)

$$T_e = Fricción x r$$
  
 $T_e = 11,18 (N) x 0,1 (m)$   
 $T_e = 1,12 (Nm)$ 

#### 2.2.15. Cálculo del torque en el sistema (T)

- Datos:
  - $\circ$  Inercia total (I<sub>T</sub>) = 0,041 (kgm<sup>2</sup>)
  - Aceleración angular ( $\alpha$ ) = 1255 rad/s<sup>2</sup>
  - Torque en escobilla ( $T_e$ ) = 1,12 (Nm)

$$\sum M = I_T x \propto$$

$$\sum M = 0,041 \text{ (kgm}^2) \times 1255 \text{ (}\frac{\text{rad}}{\text{s}^2}\text{)}$$

$$\sum M = 51,46 \text{ (Nm)}$$

$$\sum M = T + T_{e}$$
$$T = 51,46 (Nm) + 1,12 (Nm)$$
$$T = 52,58 (Nm)$$

#### 2.2.16. Potencia del motor (Pot)

Se procede a realizar el cálculo de la potencia del motor para obtener un valor que permita darse cuenta el motor que necesita el equipo para trabajar sin inconvenientes, los cálculos se detallan a continuación:

- Datos:
  - Torque (T) = 52,58 (Nm)
  - Velocidad angular ( $\omega$ ) = 5,02 (rad/s)
  - $\circ$  1 Watt (W) = 0,001341 HP

Pot = T x 
$$\omega$$
  
Pot = 52,58 (Nm) x 5,02 (rad/s)  
Pot = 263,95 (W)

Pot = 263,95 (W) x 
$$\frac{0,001341 \text{ (HP)}}{1 \text{ (W)}}$$
  
Pot = 0,35 (HP)

## 2.2.17. Requerimiento de dimensionamiento del motor

Con los cálculos realizados se requiere de un motor con una potencia de 0,35 HP, en vista que en el mercado no se encuentran motores con estas características, se decide adquirir un motor de 0,5 HP con una velocidad de rotación de 1725 (rpm), capaz de cumplir con el trabajo que se requiere en el sistema.

### 2.3. Descripción de los elementos del equipo

El separador magnético se encuentra conformado de la siguiente manera.

## 2.3.1. Tolva de alimentación

Equipo que se encarga de pasar el material a clasificar con un flujo constante facilitando su descarga hacia el separador electromagnético, tiene forma de tronco de pirámide invertido y será utilizado para la alimentación hacia el equipo clasificador de material.



## 2.3.2. Dosificador vibratorio

El dosificador vibratorio va a cumplir un objetivo que es abastecer o descargar el material al cilindro magnético, ya que proporcionan una dosificación gravimétrica excelente de materiales a granel con muy buena fluidez, como gránulos y polvos gruesos. Son especialmente adecuados para productos abrasivos.

El material del dosificador es de acero inoxidable y existen tres tamaños de bandejas vibratorias que se las pueden combinar con diversos tamaños de tolvas.



Figura 2.5 Dosificador vibratorio.

## 2.3.3. Cilindro magnético

El cilindro o tambor electromagnético genera un consumo eléctrico debido a la creación del campo magnético mediante una bobina la cual se puede activar o desactivar el campo a voluntad.

El núcleo magnético principal de alta potencia atrae los minerales magnéticos y una vez captados llegan al punto de menor intensidad permitiendo la separación del resto de material.



Figura 2.6 Cilindro Electromagnético.

## 2.3.4. Protector de transmisión

El protector de transmisión puede ser de material plástico o acero, se usa como medida de protección dentro del equipo, para evitar el acceso o entrada de partículas de material no deseado al circuito, este protector ayuda a mantener segura tres partes importantes del separador como son: polea conductora, banda trapezoidal y polea conducida.



Figura 2.7 Protector de transmisión.

## 2.3.5. Motor-reductor

Es el equipo que cambia o combina la velocidad de giro de un motor, tiene un motor acoplado directamente que permite reducir la velocidad de giro del motor eléctrico y obtener una rotación de 48 (rpm) a la salida del cilindro.



Figura 2.8 Motor-reductor.

## 2.3.6. Motor eléctrico

Se conoce como un dispositivo el cual se encarga de convertir la energía eléctrica en energía mecánica por medio de la acción de los campos magnéticos generados en sus bobinas. Son máquinas eléctricas rotatorias compuestas por un estator y un rotor que se encargará de generar el movimiento circular al cilindro separador con una potencia de 0,5 (HP) y al motor se acoplará un reductor para reducir su velocidad de giro con una relación de transmisión 1:36.

Al motor eléctrico se puede utilizar en diferentes sectores tales como: sector industrial, comercial y particular. Se ha generalizado su uso y puede ayudar en el funcionamiento de diversos productos.

La corriente alterna puede tomarse para su uso en motores eléctricos bien sea directamente de la red eléctrica, alternadores de las plantas eléctricas de emergencia y otras fuentes de corriente alterna bifásica o trifásica como los inversores de potencia.



Figura 2.9 Motor eléctrico.

## 2.3.7. Bandeja dosificadora

La bandeja dosificadora es un elemento adicional que será incorporado a la salida del dosificador vibratorio el cual tendrá una abertura mayor y separado por pequeñas canaletas para permitir que el material circulante tenga mejor distribución y permita la caída del mismo a lo largo del cilindro magnético.

## 2.3.8. Escobilla

La escobilla es una pieza importante en la obtención del material magnético, está ubicada en la parte posterior del cilindro permitiendo la limpieza de las partículas magnéticas que no se han desprendido del cilindro.

## 2.3.9. Bandejas de material

El equipo está compuesto por dos bandejas en la parte inferior del cilindro, las cuales recogerán el material separado magnéticamente. La primera bandeja recibe el material no magnético, que debido a la gravedad cae directamente a un depósito y la segunda bandeja recepta el material magnético y este material se dirige a un segundo depósito.



Figura 2.10 Recipientes de Material

## 2.3.10. Chumacera

Es la pieza que permite el soporte para la rotación del eje del cilindro y está constituido de una parte rotativa y una fija.



Figura 2.11 Chumaceras

## 2.3.11. Polea conducida

Por polea conducida se entiende que es aquella polea ajustada al eje que tenemos que mover, el sistema de poleas más simple consiste en dos poleas situadas a cierta distancia, que giran a su vez por efecto del rozamiento que genera una correa a ambas poleas.



Figura 2.12 Polea Conducida

## 2.3.12. Banda Trapezoidal

Se conoce a banda trapezoidal como una correa de transmisión mecánica que cuenta con la unión de dos o más ruedas, las cuales se encuentra en rotación constante, por medio de una cinta o correa continua que abraza a las ruedas y genera fuerza de fricción suministrando al sistema energía desde la rueda motriz.

Es importante recalcar que el funcionamiento de esta banda basa su funcionamiento fundamentalmente en las fuerzas de fricción, esto las diferencia de otros medios flexibles de transmisión mecánica, como lo son las cadenas de transmisión y las correas dentadas las cuales se basan en la interferencia mecánica entre los distintos elementos de la transmisión.

Las correas de transmisión son generalmente hechas de goma, y se pueden clasificar en dos tipos: planas y trapezoidales.



Figura 2.13 Banda Trapezoidal

## 2.3.13. Polea conductora

En el equipo la polea conductora será destinada a guiar el movimiento de rotación a una pieza o un conjunto de piezas, como una rueda o un engranaje permitiendo que ésta gire alrededor del eje. En otros casos, la rueda gira solidariamente al eje y el sistema de guiado se encuentra en la superficie que soporta el eje.



Figura 2.14 Polea Conductora

## 2.3.14. Electroimanes

En el separador magnético se puede utilizar imanes permanentes o electroimanes, se decidió utilizar electroimanes ya que tienen un funcionamiento óptimo y funcionan mediante el paso de una corriente eléctrica la cual se hace controlable obteniendo beneficios óptimos.

Al pasar la corriente eléctrica por un cable se crea un campo magnético. Si ahora el conductor por el que pasa la corriente se enrolla en forma de hélice, produce una fuerza magnetomotriz. Cada una de las vueltas de alambre se denomina espira y se forma un solenoide.

Al pasar la corriente, el campo producido por las distintas espiras se suma para crear un campo siguiendo el eje del solenoide, o sea, de las espirales de cable, dando como resultado una fuerza paralela al eje. Si introducimos un núcleo de hierro dentro del solenoide, la fuerza magnética del solenoide se transmitirá a través de él, transformándolo en un imán mientras esté pasando la corriente eléctrica. Cuando se interrumpe la corriente desaparece la imantación aunque el núcleo permanezca levemente imantado.



Figura 2.15 Electroimanes

## 2.4. Cálculo electromagnético

Para efectuar este cálculo es necesario medir la intensidad de la corriente en amperes (A) que ingresa a los electroimanes, ya que el sistema trabaja con dos intensidades debido a un reóstato que permite la variación de esta intensidad.

## 2.4.1. Intensidad del campo magnético (H)

- Datos:
  - Número de vueltas de conductor (N) = 600
  - Intensidad de corriente  $(I_1) = 0,5 (A)$

- Intensidad de corriente  $(I_2) = 1,3 (A)$
- Radio de la bobina (r) = 0,01 (m)
- $\circ$  Fuerza magnetomotriz = (Fm)
- Longitud del conductor = (l)
- Intensidad del campo magnético (H)



Figura 2.16 Medición de corriente en amperes

Tabla 2.2 Intensidades del campo magnético

Datos	Intensidad del campo magnético bajo	Intensidad del campo magnético alto
Fuerza Magnetomotriz (Fm)	$Fm = N \ge I_1$ $Fm = 600 \ge 0.5$ (A) Fm = 300 (A <sub>v</sub> )	$Fm = N \ge I_2$ $Fm = 600 \ge 1.3 (A)$ $Fm = 780 (A_v)$
Longitud del conductor (l)	$l = 2\pi x r x N$ $l = 2\pi x 0,01 (m) x 600$ l = 37,7 (m)	
Intensidad del campo magnético (H)	$H = \frac{Fm}{l}$ $H = \frac{300 (A_v)}{37,7 (m)}$ $H = 7,96 \left(\frac{A_v}{m}\right)$	$H = \frac{Fm}{l}$ $H = \frac{780 (A_v)}{37,7 (m)}$ $H = 20,7 \left(\frac{A_v}{m}\right)$

### 2.5. Cálculo energético en el sistema

Se procede a realizar los cálculos para determinar el consumo energético necesario para procesar 10 (kg) de material en 45 minutos, tiempo que necesita el equipo para separar dicha cantidad de muestra.

## 2.5.1. Consumo energético generado por motor-reductor y cilindro (E1)

La cantidad de energía requerida en el sistema consiste en el consumo generado durante el tiempo de separación del material, que en este caso se llevó a cabo 45 minutos en la separación de 10 kilogramos de material.  $E_1$  hace referencia al consumo energético producido en el sistema giratorio del cilindro en combinación con el motor.

Para esto se requiere conocer la energía que consume el motor-reductor y considerar el tiempo que dura el proceso, para así obtener el consumo energético en vatio por hora (W.h).

- Medición de datos en el motor-reductor:
  - Intensidad de la corriente (I) = 1,3 (A)
  - $\circ$  Voltaje = 214 (V)
  - $\circ$  Cos $\phi = 0.8$
  - $\circ$  P = Potencia (W)

 $P = \sqrt{3} \times V \times I \times \cos_{\phi}$  $P = \sqrt{3} \times 214 \text{ (V)} \times 1,3 \text{ (A)} \times 0,8$ P = 385,5 (W)

• Energía consumida durante el proceso

$$E = P x t$$

E = Energía (W.h)

t = tiempo (h)

- Datos:
  - Potencia (P) = 385,5 (W)
  - Tiempo (t) = 45 (min) = 0.75 (h)

$$E_1 = P \ge t$$
  
 $E_1 = 385,5 (W) \ge 0.75 (h)$   
 $E_1 = 289,13 (W.h)$ 

### 2.5.2. Consumo energético en el sistema electromagnético (E2 y E3)

En este punto se calcula el consumo energético de los electroimanes basados en dos intensidades de corriente medidas en amperes,  $E_2$  es el gasto energético medido con una intensidad de corriente baja mientras que  $E_3$  es medido con una intensidad de corriente alta.

- Datos.
  - $\circ$  Voltaje = 110 (V)
  - $\circ$  Intensidad de corriente baja (I<sub>1</sub>) = 0,5 (A)
  - Intensidad de corriente alta  $(I_2) = 1,3 (A)$
  - Tiempo (t) = 45 (min) = 0.75 (h)

Tabla 2.3 Consumo energético con baja y alta intensidad

Datos	Consumo energético con intensidad baja (E2)	Consumo energético con intensidad alta (E3)
Potencia (P)	$P = V \times I$ P = 110 (V) x 0,5 (A) P = 55 (W)	$P = V \times I$ P = 110 (V) x 1,3 (A) P = 143 (W)
Energía consumida (E)	$E_2 = P x t$ $E_2 = 55 (W) x 0.75 (h)$ $E_2 = 41.25 (W. h)$	$E_3 = P x t$ $E_3 = 143 (W) x 0,75 (h)$ $E_3 = 107,25 (W.h)$

## 2.5.3. Consumo energético total del separador (ET)

Es el gasto energético producido por todo el sistema  $(E_T)$  que engloba el consumo del sistema giratorio del cilindro combinado con el motor, más el consumo energético que genera los electroimanes con sus respectivas intensidades.

- Datos:
  - Consumo energético generado por el cilindro  $(E_1) = 289,13$  (W.h)
  - o Consumo energético con baja intensidad ( $E_2$ ) = 41,25 (W.h)
  - Consumo energético con alta intensidad (E<sub>3</sub>) = 107,25 (W.h)

Tabla 2.4 Consumo energético total del separador

Consumo energético total con baja	Consumo energético total con alta
intensidad (E <sub>T1</sub> )	intensidad (E <sub>T2</sub> )
$E_{T1} = E_1 + E_2$	$E_{T2} = E_1 + E_3$
$E_{T1} = 289,13 (W.h) + 41,25 (W.h)$	$E_{T2} = 289,13 (W. h) + 107,25 (W. h)$
$E_{T1} = 330,4 (W.h)$	$E_{T2} = 396,4 (W. h)$

## 2.6. Proceso de armado y producto final

Para iniciar este proyecto se realizó el despiece y diseño de cada uno de los elementos constituyentes del equipo es decir dar forma y dimensiones que permita elaborar el diseño planteado. Cada pieza fue diseñada por separado bajo un análisis previo, y se construyó lo siguiente:

 Cilindro separador: Se adquirió una plancha de acero inoxidable no magnético (austenítico AISI-304), de 628,32 (mm) por 250 (mm) con un espesor de 3 (mm) la cual se roló para darle forma cilíndrica y quedar con un diámetro de 200 (mm). El cilindro estará instalado a la salida del dosificador vibratorio.



#### Figura 2.17 Cilindro rolado

• Eje conductor: De acuerdo al diseño el eje se construyó de acero y tiene una longitud de 350 mm con un diámetro de 20 mm.



Figura 2.18 Eje conductor y tapa móvil

- Chumaceras: Se compró dos chumaceras que se acoplen al eje de 20 mm de diámetro.
- Tapa móvil: En un material de grilón se dio forma circular con un diámetro de 200 mm y espesor de 15 mm. Esta tapa es instalada al cilindro junto con el eje conductor.
- Estructura de soporte: La estructura se elaboró con un tubo de acero de 2,5 pulgadas y se le agrego una base de sostenimiento para el motor-reductor.



Figura 2.19 Estructura de soporte
Motor-reductor: Para el funcionamiento del equipo se requiere un motor de 0,35 HP pero como en el mercado no existe un motor de esas características se adquirió un motor de ½ HP.

Fue instalado en la parte lateral de la estructura de soporte para el acoplamiento con las poleas.

- Poleas: El equipo cuenta con 2 poleas, una es instalada en la salida del reductor mientras que la otra está en el eje conductor del cilindro.
- Banda de transmisión: Conectada a las dos poleas para permitir el sistema giratorio del equipo.
- Electroimanes: Consta de tres electroimanes distribuidos en un disco de madera en forma de media luna para generar el sistema magnético en la mitad del cilindro separador. Estos elementos se consiguieron en motores de refrigeradora los cuales fueron rebobinados para adaptarlos a un transformador de corriente entre 110 a 220 voltios.





Figura 2.20 Distribución de electroimanes y caja de transformador

• Tapa fija: Fue elaborada en aluminio con un diámetro menor a la tapa móvil para ingresar en el cilindro evitando el roce en el movimiento giratorio. Esta tapa cuenta con un eje central en donde esta roscado un disco de madera que contiene los electroimanes y así poder regular la posición adecuada dentro del tambor.



Figura 2.21 Tapa fija

- Anillos de aluminio: Se construyeron dos anillos para instalarlos en los extremos del tambor magnético y permitir que el material recorra el cilindro evitando que se disperse.
- Recipientes de material: Los recipientes son de lámina de acero con un espesor de 4 mm, los cuales fueron doblados para adquirir la forma respectiva.
- Ruedas: Se compraron cuatro ruedas para instalar en la estructura de soporte y permitir el movimiento del equipo de manera fácil.
- Escobilla: Consta de dos brochas en la parte posterior del cilindro las mismas que tienen un sistema de ajuste hacia el tambor permitiendo la limpieza del material magnético pegado al cilindro separador.



Figura 2.22 Escobilla

• Varios: Por último se obtuvo cables, interruptores, enchufes y cintas, para realizar las diferentes conexiones en el sistema.

# **CAPÍTULO III**

## PRUEBAS EXPERIMENTALES

### 3.1. Descripción del material a usar

El material que se utilizó en todas las pruebas con el equipo separador pertenece al río León, cuyas arenas fueron recolectadas en el sector El Triunfo, parroquia Susudel del cantón Oña. Situado, aproximadamente a 80 kilómetros al sur oriente de la ciudad de Cuenca. El Clima de Susudel es moderadamente templado, con temperaturas que oscilan entre los 8 y 18 grados centígrados, se evidencia una topografía irregular; su suelo es arenoso y arcilloso; es bastante seco.

Como información hidrográfica de la parroquia Susudel cuenta con: el Río León, la quebrada de Purines que viene de un caserío del cantón Nabón, la quebrada de Chilpa y la quebrada de Radicucho.

En este sector se encuentra la concesión minera El Triunfo donde opera la mina a cielo abierto con el mismo nombre, quienes facilitaron el material de banco para realizar las pruebas, realizan la explotación a las orillas de este río para la recuperación de oro y plata que es el material interés de esta mina, el material que fue facilitado pertenece a la ganga o desecho, encontrando un material rico en óxidos de hierro y arenas de sílice, resultando ser un material apropiado para realizar las pruebas con el equipo magnético.

En el material que se usó en las las pruebas se puede observar la presencia de distintos minerales magnéticos en donde se puede asumir la presencia de magnetita ya que se encuentra diseminada como mineral asociado a la mayoría de las rocas ígneas. Comúnmente está asociada a rocas metamórficas cristalinas formadas al abrigo del aire. Se encuentra como una placa fina o dendrita entre placas de mica, y es uno de los constituyentes de las arenas de los ríos, lagos y mares.

Los minerales que logran ser atrapados en el equipo, especialmente la magnetita por sus características magnéticas pueden ser usados como compuestos para pulir por sus propiedades abrasivas, mientras que por sus propiedades magnéticas se emplea en la fabricación de imanes permanentes.

La muestra contiene un alto contenido de óxidos de hierro que son compuestos químicos formados por hierro y oxígeno. Algunos óxidos de hierro tienen aplicaciones interesantes para las tecnologías actuales, varios de estos compuestos son empleados para dar el color a los vidrios una vez expuestos a altas temperaturas y también son empleados como pigmentos. Aparte de poseer propiedades adecuadas para cumplir diversas funciones, son relativamente abundantes en la naturaleza o su obtención en forma sintética no es complicada.

## 3.2. Procesos para lograr la concentración magnética

### 3.2.1. Clasificación de material

El proceso inicial consiste en llevar la muestra a un tamizador vibratorio para adquirir un tamaño de partícula homogéneo, en esta caso se utilizó el material pasante de la malla #30, es decir con tamaño menor a 0,5 milímetros.



Figura 3.1 Clasificador de material

#### 3.2.2. Alimentación de material

En la alimentación, se procede a pesar 10 kilogramos de la muestra, todo el material que se va a trabajar es añadido a una tolva de alimentación la cual mediante vibración genera la caída del material directamente al tambor magnético.



Figura 3.2 Alimentación de material

## 3.2.3. Proceso de separación

La tolva se encarga de alimentar al separador con un flujo constante de muestra, el material cae directamente en el tambor creando un campo de atracción hacia los minerales magnéticos los mismos que se pegan al cilindro giratorio y se desprenden del mismo por dos razones: la primera es por gravedad y debilitamiento del campo magnético y la segunda razón es por una escobilla que permite la limpieza de partículas minerales que siguen generando un campo magnético y están atraídas en el cilindro.

Existen dos bandejas en el sistema, una para el mineral magnético y la otra para el material no magnético.



Figura 3.3 Proceso de separación

## 3.2.4. Análisis de material

Una vez finalizado el proceso de alimentación y separación, se procede a analizar muestras para determinar el contenido de material receptado en cada uno de los depósitos.



```
Figura 3.4 Muestra separada
```

## **3.3.** Pruebas técnicas y ajustes

Para determinar el funcionamiento óptimo del equipo se realizó pruebas y ensayos iniciales, donde se presentó inconvenientes con el recipiente que va a acoplado a la tolva de alimentación de material, provocando un roce con el cilindro giratorio; por lo que se modificó el recipiente para permitir el giro sin inconvenientes.

## **3.3.1.** Pruebas con intensidades magnéticas y corrientes baja y alta

Se realiza dos pruebas experimentales variando la intensidad de la corriente y la intensidad del campo magnético, en la primera prueba se trabaja con una intensidad de corriente baja de 0,5 amperios (A) y la segunda prueba con una intensidad de corriente alta de 1,5 amperios (A).

Con estas intensidades se procede a separar el mineral magnético presente en 10 kilogramos de muestra, obteniendo lo siguiente:

• Resultados:

Datas	Intensidad magnética baja	Intensidad magnética alta		
Datos	Peso (kg)	Peso (kg)		
Alimento	10	10		
Material magnético	1,454	1,808		
Material no magnético	8,479	8,158		
Pérdida	0,067	0,034		

Tabla 3.1 Resultados obtenidos con variación de las intensidades magnéticas

Se define como pérdidas al material que no se recupera en el sistema de concentración debido a que se esparce en la atmosfera en forma de polvo y material adherido a la brocha del sistema.

## 3.4. Obtención de índices metalúrgicos



### 3.4.1. Diagrama del proceso

Figura 3.5 Diagrama del proceso

## 3.4.2. Obtención de tenores del proceso

## 3.4.2.1. Tenor de alimentación

Para tener una certeza de la cantidad de partículas minerales magnéticas presentes en la muestra de alimentación, se tomó 2 gramos que ingresa al sistema de separación, se realizó un ensayo utilizando un imán permanente, el mismo que nos facilitó datos de la cantidad de material magnético y no magnético en la muestra de alimentación.



Figura 3.6 Tenor en la alimentación

## 3.4.2.2. Tenor de Concentración

Para obtener este tenor se tomó 2 gramos de la muestra del material concentrado por el equipo y se realizó el mismo proceso con un imán permanente para definir los porcentajes de material magnético y no magnético presentes en la muestra.



Figura 3.7 Tenor en el concentrado

## 3.4.2.3. Tenor en material no magnético

Se determinó el tenor presente en el material no magnético realizando de la misma manera un ensayo con 2 gramos de material y un imán permanente para determinar el material que no logró ser separado por el sistema.

- Materiales:
  - Muestra = 2(g)
  - Imán permanente
  - o Balanza
  - Recipientes
- Resultados:
  - Haciendo la relación con los datos obtenidos se deduce que de los 10 kilogramos de muestra que se emplean en el proceso, 2 kilogramos son de material magnético y 8 kilogramos son de material no magnético, obteniendo así el tenor de alimentación de la muestra que es del 20 %.
  - El tenor de concentrado en la muestra es del 95%.
  - El tenor presente en el material no magnético es del 5%, es decir el material magnético que no logró ser atrapado por el concentrador.

Datas	T aliı	lenor de mentación	Т со1	'enor de 1centrado	Tenor	no magnético
Datos	Peso (g)	Porcentaje (%)	Peso (g)	Porcentaje (%)	Peso (g)	Porcentaje (%)
Muestra	2	100	2	100	2	100
Material magnético	0,4	20	1,9	95	0,1	5
Material no magnético	1,6	80	0,1	5	1,9	95

## Tabla 3.2 Tenores del proceso

## 3.4.3. Cálculo de índices metalúrgicos

Para verificar la funcionalidad del equipo se requiere determinar los índices metalúrgicos, para de esta manera conocer los resultados con las dos intensidades magnéticas con las que se trabaja.

• Datos generales:

Intensidad magnética baja	Intensidad magnética alta
Alimentación (A) = 10 (kg)	Alimentación (A) = 10 (kg)
Tenor de alimentación ( $t_a$ ) = 20 (%)	Tenor de alimentación ( $t_a$ ) = 20 (%)
Concentrado (C) = $1,454$ (kg)	Concentrado (C) = $1,808$ (kg)
Tenor de concentrado ( $t_c$ ) = 95 (%)	Tenor de concentrado ( $t_c$ ) = 95 (%)
Material no magnético (T) = 8,479 (kg)	Material no magnético (T) = 8,158 (kg)
Tenor material no magnético $(t_t) = 5 (\%)$	Tenor de material no magnético $(t_t) = 5 (\%)$

Tabla 3.3 Datos generales del sistema de concentración

## 3.4.3.1. Recuperación (R)

Es la relación entre el peso del material útil que se encuentra en el concentrado con respecto a la cantidad del mismo mineral que se encuentra en la alimentación.

Tabla 3.4 Recuperación (R)

Intensidad magnética baja	Intensidad magnética alta	
$R = \left[\frac{C \times t_c}{A \times t_a}\right]$	$R = \left[\frac{C \times t_c}{A \times t_a}\right]$	
$R = \left[\frac{1,454 \text{ (kg) x } 0,95}{10 \text{ (kg) x } 0,2}\right]$	$R = \left[\frac{1,808 \text{ (kg) x } 0,95}{10 \text{ (kg) x } 0,2}\right]$	
R = 0,69	R = 0,86	
R = 69 %	R = 86 %	

## 3.4.3.2. Razón de enriquecimiento (RE)

Relación existente en el tenor de mineral útil que existe en el concentrado con el tenor presente en la alimentación.

$$R_E = \frac{t_c}{t_a}$$
$$R_E = \frac{0.95}{0.2}$$
$$R_E = 4.75$$

## 3.4.3.3. Razón de concentración (RC)

Es la relación del flujo másico en la alimentación respecto al flujo en el concentrado.

Tabla 3.5 Razón de concentración (RC)

Intensidad magnética baja	Intensidad magnética alta
$RC = \frac{A}{C}$	$RC = \frac{A}{C}$
$RC = \frac{10 \text{ (kg)}}{1,454 \text{ (kg)}}$	$RC = \frac{10 \text{ (kg)}}{1,808 \text{ (kg)}}$
RC = 6,88	RC = 5,53

## 3.4.3.4. Rendimiento (V)

Es el inverso de la razón de concentración el cual nos facilita la misma información.

Tabla 3.6 Rendimiento (V)

Intensidad magnética baja	Intensidad magnética alta
$V = \frac{C}{A}$	$V = \frac{C}{A}$
$V = \frac{1,454 \text{ (kg)}}{10 \text{ (kg)}}$	$V = \frac{1,808 \text{ (kg)}}{10 \text{ (kg)}}$
V = 0,145	V = 0,18

## 3.4.3.5. Eficiencia de Separación (E)

Este factor se encarga de agrupar la información anterior y determina la eficiencia producida por el equipo.

Considerando que  $V_{IDEAL} = t_a$  es decir igual a 0,2, obtenemos la eficiencia de separación:

Tabla 3.7 Eficiencia de separación

Intensidad magnética baja	Intensidad magnética alta	
$E = \frac{R - V}{1 - V_{IDEAL}}$	$E = \frac{R - V}{1 - V_{IDEAL}}$	
$\mathbf{E} = \frac{0,69 - 0,145}{1 - 0,2}$	$\mathbf{E} = \frac{0,86 - 0,18}{1 - 0,2}$	
E = 0,68	E = 0,85	
E = 68 %	E = 85 %	

# **CAPÍTULO IV**

## **RESULTADOS, ANÁLISIS Y DISCUSIÓN**

El propósito de este trabajo fue construir un separador electromagnético que garantice la separación de minerales magnéticos, para determinar los resultados se desarrolló el proceso con 10 kilogramos de material de río. Se trasladó el equipo construido al laboratorio de Ingeniería en Minas de la Universidad del Azuay para proceder a realizar las pruebas pertinentes y establecer los resultados.

#### 4.1. Análisis de resultados

El equipo fue elaborado para que opere con dos intensidades de campo magnético: 7,96 (Av/m) y 20,7 (Av/m), en donde se realizó las pruebas convenientes con cada una de ellas.

#### 4.1.1. Resultados con intensidad de campo magnético bajo y alto

Resultados	Intensidad de campo magnético bajo = 7,96 (Av/m)	Intensidad de campo magnético alto = 20,7 (Av/m)
Material magnético concentrado (kg)	1,454	1,808
R: Recuperación (%)	69	86
E: Eficiencia de separación (%)	68	85
Consumo energético (W.h)	330,4	396,4

Tabla 4.1 Resultados generales

## 4.1.2. Análisis del concentrado (C) e intensidad magnética (H)

Mediante este proceso se puede deducir que trabajando con una intensidad magnética alta se obtienen mejores resultados de separación de mineral magnético acercándose así al valor de concentrado presente en la muestra de alimentación.

Trabajando con una intensidad magnética baja de 7,96 (Av/m) los resultados son regulares ya que se genera una evidente contaminación del concentrado con el material no magnético,





Figura 4.1 Análisis de concentrado e intensidad magnética

#### 4.2. Análisis de los índices metalúrgicos

## 4.2.1. Análisis de recuperación (R) e intensidad del campo magnético (H)

Con los resultados adquiridos se demuestra que el equipo cuenta con una excelente recuperación del material magnético, ya que con intensidad magnética baja y alta los porcentajes de recuperación son: 69 y 86 (%) respectivamente.



Figura 4.2 Análisis de recuperación e intensidad magnética

## 4.2.2. Análisis de eficiencia de separación (E) e intensidad magnética (H)

Con los datos obtenidos el equipo resulta ser muy eficiente, como se puede apreciar cuando se trabaja con una intensidad del campo magnético alto la eficiencia resulta ser próxima al 90 % es decir que garantiza la separación optima del material.



Figura 4.3 Análisis de eficiencia de separación e intensidad magnética

## 4.3. Análisis del consumo energético (E) e intensidad del campo magnético (H)

Al utilizar una intensidad magnética alta se obtiene buenos resultados con el funcionamiento del equipo pero el gasto energético es mayor que al trabajar el equipo con una intensidad magnética baja.

Entonces si se requiere buenos resultados se debe tener en cuenta que el gasto en la energía será elevado.



Figura 4.4 Análisis de consumo energético e intensidad magnética

## **CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES**

### **Conclusiones:**

El presente proyecto se ha dedicado al diseño y construcción de un equipo a escala de laboratorio aplicando parámetros técnicos para la concentración de minerales a base de electroimanes y al final comprobar los resultados determinado la eficiencia del proceso.

En la introducción de este documento se ha dado lugar a alcanzar los objetivos inicialmente planteados permitiendo obtener las siguientes conclusiones:

- El diseño del equipo propuesto se basa en el estudio de la clasificación de los separadores magnéticos del cual se diseñó un separador electromagnético de tambor para trabajar mediante vía seca empleando electroimanes que cumplan la función de variación en la intensidad del campo para la atracción de los minerales.
- De la construcción de los electroimanes se basa en un sistema de media luna dentro del cilindro, de esta manera permite crear un campo magnético directo en la zona de caída del material y que al momento de giro del cilindro las partículas magnéticas son llevadas hacia una zona de menor campo magnético en donde las partículas caen a un recipiente debido a su peso, a la escobilla y producto de la gravedad.
- La construcción del equipo se basa en un diseño previo, las piezas del mismo fueron elaborados con materiales como: acero inoxidable no magnético, aluminio, hierro y grilón. Todas las piezas que componen el separador fueron realizadas en el taller mecánico para posteriormente ser ensambladas y armar el equipo.
- El principal aporte de este equipo es el aprovechar al máximo la separación del mineral magnético del no magnético, cuenta con condiciones óptimas de trabajo y podría ser utilizado en otras aplicaciones industriales.
- La velocidad de giro del tambor es constante, mediante el diseño mecánico la velocidad del equipo corresponde a 48 revoluciones por minuto (rpm), la misma que se determinó basados en un estudio de velocidad óptima de los tambores los cuales oscilan entre los 40 y 70 revoluciones por minuto (rpm), concluyendo que la velocidad del equipo elaborado está dentro de los parámetros establecidos gracias al sistema helicoidal del motoreductor instalado en el separador que consta con una relación de transmisión 1:36.

- Al realizar las pruebas experimentales se concluye que el equipo separador cuenta con buenos resultados en la recuperación de los minerales magnéticos, ya que el material de río con el que se trabajó presenta un gran porcentaje de minerales paramagnéticos que fueron retenidos por el equipo.
- Los resultados permiten concluir que los índices metalúrgicos obtenidos en el desarrollo del proceso se obtienen de mejor manera aplicando una mayor intensidad del campo magnético siendo más eficiente el sistema, es decir que para obtener buena separación se requiere de un consumo energético mayor.
- Mediante el separador magnético es posibles obtener grandes cantidades de minerales magnéticos en muy poco tiempo dependiendo del flujo de alimentación del material, lo cual optimiza el proceso de concentración de minerales.

## **Recomendaciones:**

Durante el proceso de este proyecto se han ido presentando ciertas recomendaciones que se las citan a continuación:

- En el diseño electromagnético del equipo se puede sugerir que se realice una combinación con imanes permanentes, lo cual permitiría elevar la fuerza de magnetización dentro del tambor por lo mismo obtener mayor beneficio en la concentración de los minerales.
- Se aconseja que el tambor este a una distancia prudente de la estructura y bandejas del material, para evitar que se forme un campo magnético que provocaría pérdidas del sistema, debido a que las partículas se pegan en las estructuras y no tienen caída libre.
- El tamaño de grano es un factor muy importante al momento de concentrar minerales magnéticos con el separador, para este equipo se recomienda un tamaño de grano pasante de la malla #30 es decir menor a medio milímetro.
- Para muestras no magnéticas o poco magnéticas la producción del equipo es baja, por lo cual, se recomienda comenzar la separación de los minerales más magnéticos y posteriormente ir incrementando el campo magnético para aquellos con poca susceptibilidad magnética.
- Si queremos obtener una separación más eficiente a la del sistema se recomienda implementar un circuito de tambores magnéticos en serie, elaborados con magnetos permanentes, de esa manera obtener mayor concentración mineral consumiendo la misma cantidad de energía generada por el primer sistema propuesto.
- Al obtener los concentrados de los óxidos de hierro, resultado de la separación magnética, pueden estas partículas minerales ser empleadas en la industria del vidrio para generar la coloración del mismo, como también se puede utilizar en industrias de cemento para la elaboración del clínker (producto del horno que se muele para fabricar cemento).

#### **REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS**

- Barco Ríos, H., Rojas Calderón, E., & Restrepo Parra, E. (Julio de 2012). Principios de Electricidad y Magnetismo. Obtenido de Principios de Electricidad y Magnetismo: http://www.bdigital.unal.edu.co/45116/1/9789587612837.pdf
- Bustamante, Gaviria, & Restrepo. (Febrero de 2007). Concentracion de minerales. Obtenido de Concentracion de minerales: minas.medellin.unal.edu.co/centro-editorial/.../24\_5a1004a32dcbd619453c3eed562725
- Floyd, T. L. (2007). Principios de circuitos eléctricos. México: Pearson Educación. Obtenido de Principios de circuitos eléctricos.
- Kelly, E. G., & Spottiswood, D. J. (1990). Introduccion al procesamiento de minerales. En E. G. Kelly, & D. J. Spottiswood, Introduccion al procesamiento de minerales (pág. 530). Mexico: Limusa.
- Pávez, O. (2005). Apuntes de Concentración de Minerales II. Obtenido de Apuntes de Concentración de Minerales II: http://www.mineriacatamarca.gob.ar/LinkEducativo/InformacionAcademica/AreaPr ocesamiento\_Minerales/Apuntes\_de\_Concentracion\_de\_Minerales.pdf
- Potencia Electromecánica. (18 de Junio de 2013). Obtenido de Potencia Electromecánica: http://www.potenciaelectromecanica.com/calculo-de-un-motorreductor/
- Richard G Budynas y J Keith Nisbett . (2008). Diseño en ingeniería mecánica de Shigley. Obtenido de Diseño en ingeniería mecánica de Shigley: https://rafaelramirezr.files.wordpress.com/2015/03/diseno-en-ingenieria-mecanicade-shigley-8th-hd.pdf
- Salazar, A. A. (2010). Obtenido de http://www.bdigital.unal.edu.co/3517/1/abiloandresvelasquezsalazar.2010.pdf
- Sánchez, P. M. (1 de Marzo de 2010). Diseño e Implementación de Electroimán y Actuador. Obtenido de Diseño e Implementación de Electroimán y Actuador: file:///C:/Users/General/Downloads/ZAPATA\_SANCHEZ\_PEDRO\_IMPLEMENT ACION\_ELECTROIMAN\_LEVITACION%20(1).pdf
- Sánchez, P. M. (1 de Marzo de 2010). Diseño e implementación de electroimán y actuador electrónico aplicado a un sistema de levitación magnética. Obtenido de Diseño e implementación de electroimán y actuador electrónico aplicado a un sistema de levitación magnética: file:///C:/Users/General/Downloads/ZAPATA\_SANCHEZ\_PEDRO\_IMPLEMENT ACION\_ELECTROIMAN\_LEVITACION%20(1).pdf
- Ycaza, M. E. (1991). Concentración de oro por separación magnética por vía seca de los concentrados del río Paute. Obtenido de Concentración de oro por separación

magnética por vía seca de los concentrados del río Paute: http://www.cib.espol.edu.ec/Digipath/D\_Tesis\_PDF/D-13087.pdf

Young, & Freedman. (18 de Enero de 2009). Fisica Universitaria. Obtenido de Fisica Universitaria: http://fis.ucv.cl/docs/fis-133/textos/Fisica-Universitaria-Sears-Zemansky-12va-Edicion-Vol1.pdf

## ANEXOS



Anexo 1 Bosquejo de separador

Anexo 2 Centrado de tapa móvil



Anexo 3 Instalación de eje y tapa móvil en el tambor



Anexo 4 Chumaceras KDF



Anexo 5 Instalación de piezas



Anexo 6 Ubicación de tapa fija









Anexo 8 Conexión de transformador



Anexo 9 Pruebas previas







Anexo 10 Pintado de estructuras y recipientes

Anexo 11 Colocación de transformador en la caja



## Anexo 12 Equipo elaborado



Anexo 13 Ajustes en tolva de alimentación



Anexo 14 Tendido y secado de material



Anexo 15 Clasificación de material



Anexo 16 Pesado de muestra





Anexo 17 Preparación de equipo para separación

Anexo 18 Alimentación de la muestra





Anexo 19 Resultados de la separación magnética

Anexo 20 Placas de especificaciones

