



**UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO**

---

---

**FACULTAD DE QUÍMICA**

**“CONSTRUCCIÓN DE UN CONCENTRADOR GRAVIMÉTRICO  
(ELUTRIADOR) ACOPLADO A UN SISTEMA ARDUINO PARA  
SU USO EN LABORATORIO”**

**T E S I S**

**QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE  
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO**

**PRESENTA:**

**ERICK RENE SOLANO BRITO**

**TUTOR DE TESIS:**

**M. EN C. ANTONIO HUERTA CERDÁN**



**CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX.**

**2023**



Universidad Nacional  
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

**Biblioteca Central**



**UNAM – Dirección General de Bibliotecas**  
**Tesis Digitales**  
**Restricciones de uso**

**DERECHOS RESERVADOS ©**  
**PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL**

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

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

**JURADO ASIGNADO:**

**PRESIDENTE:**           **Profesor: Huerta Cerdán Antonio**

**VOCAL:**                   **Profesor: Juárez Sánchez Faustino**

**SECRETARIO:**       **Profesor: De La Rosa Canales Juan Manuel**

**1er. SUPLENTE:**       **Profesor: Vela Avitúa Andrés**

**2° SUPLENTE:**       **Profesor: Ramírez Argáez Marco Aurelio**

**SITIO DONDE SE DESARROLLO EL TEMA:** Facultad de Química, Edificio D, Circuito de la Investigación Científica, S/N, Ciudad Universitaria, Coyoacán, Ciudad de México 04510.

**ASESOR DEL TEMA:**

---

**Antonio Huerta Cerdán**

**SUSTENTANTE:**

---

**Erick Rene Solano Brito**

## Índice

<b>Resumen</b> .....	<b>1</b>
<b>Introducción</b> .....	<b>3</b>
<b>Hipótesis</b> .....	<b>4</b>
<b>Objetivos</b> .....	<b>4</b>
<b>Capítulo 1. Marco Teórico</b> .....	<b>5</b>
1.1 Concentración De Minerales .....	5
1.1.1 Concentración Gravimétrica .....	5
1.2 Principio de la Concentración Gravimétrica .....	6
1.3 Procesos de Concentración Gravimétrica .....	7
1.3.1 Jigging (Pulsadoras) .....	8
1.3.2 Mesa Concentradora .....	9
1.3.3 Concentrador Espiral .....	9
1.3.4 Cono Reichert .....	10
1.3.5 Concentradores Centrífugos .....	11
1.3.6 Características de Operación de los Procesos de Concentración .....	13
1.4 Elutriador .....	13
1.4.1 Equilibrio de Fuerzas y Velocidad Terminal .....	14
1.4.2 Partículas con Comportamiento No Ideal en el Proceso de Elutriación .	17
1.4.3 Consideraciones en el Proceso de Elutriación .....	19
1.5 Descripción de la Magnetita y la Ilmenita .....	20
1.6 Sistema Arduino .....	22
1.6.1 IDE de Arduino .....	24
1.6.2 Ventajas de Arduino .....	24
1.7 Sensor de Flujo .....	25
<b>Capítulo 2. Metodología de Trabajo</b> .....	<b>28</b>
2.1 Diseño del Elutriador, Selección de los Materiales y Ensamblaje de las Piezas .....	29
2.2 Conexión Sensor de Flujo y del Sistema Arduino .....	32
2.3 Calibración del Sensor de Flujo de Agua y del Rotámetro .....	34
2.4 Preclasificación de la Mezcla de Arenas Ferrotitaníferas .....	34
2.5 Operación de los Elutriadores .....	34
2.5.1 Operación del Elutriador Nuevo (EN) .....	35

2.5.2 Operación del Elutriador Actual (EA) .....	36
<b>Capítulo 3. Resultados y Discusión de Resultados .....</b>	<b>38</b>
3.1 Diseño del Elutriador, Selección de los Materiales y Ensamblaje de las Piezas .....	38
3.2 Conexión Sensor de Flujo y del Sistema Arduino .....	41
3.3 Calibración del Sensor de Flujo de Agua y del Rotámetro .....	42
3.4 Preclasificación de la Mezcla de Arenas Ferrotitaníferas.....	43
3.4.1 Determinación del Tamaño de Partícula Seleccionado .....	44
3.5 Resultados de la Operación de los Elutriadores .....	45
3.5.1 Porcentajes de Ley y de Recuperación de Fe y Ti a un Flujo de Agua de 2.08 [LPM] .....	50
3.5.2 Porcentajes de ley y de recuperación de Fe y Ti a un flujo de agua de 2.53 [LPM] .....	54
3.5.3 Porcentajes de Ley y de Recuperación de Fe y Ti a un Flujo de Agua de 2.83 [LPM] .....	59
3.6 Comparación Entre Ambos Elutriadores .....	63
3.6.1 Velocidad del Flujo de Agua vs Porcentaje de Ley y de Recuperación .	63
3.6.2 Ley de Fe en Magnetita y Ley de Fe en Ilmenita .....	66
3.6.3 Comparación en la Operación del EA y el EN .....	71
3.7 Elutriador Nuevo .....	75
<b>Capítulo 4. Conclusiones .....</b>	<b>76</b>
<b>Bibliografía .....</b>	<b>77</b>
<b>ANEXOS .....</b>	<b>82</b>
Anexo A. Criterios de Concentración. ....	82
Anexo B. Velocidades Terminales en Términos de la Ley de Stokes. ....	83
Anexo C. Velocidades Terminales en Términos de la ley de Stokes para Partículas en Número de Malla 200.....	86
Anexo D. Cálculo de los Flujos de Agua del Rotámetro a partir de los Diferentes Flujos de Trabajo. ....	89
Anexo E. Fórmulas para el Balance Metalúrgico .....	90
Anexo F. Determinación del porcentaje de Fe en la ilmenita y magnetita.....	91

## ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Dependencia del Criterio de Concentración para Separaciones por Gravedad. [6] .....	7
Tabla 2. Comparación de los diferentes métodos de concentración gravimétrica. ....	13
Tabla 3. Propiedades físicas de la magnetita y la ilmenita. ....	21
Tabla 4. Función de los componentes básicos que conforman las placas Arduino. ....	23
Tabla 5. Características Principales de los Sensores de Flujo de Efecto Hall <sup>[29]</sup> ...	25
Tabla 6. Descripción de los componentes para el elutriador propuesto. ....	30
Tabla 7. Características principales del Sensor de flujo de agua. <sup>[34]</sup> .....	32
Tabla 8. Flujos en [LPM] del rotámetro y del sensor de flujo de agua para su calibración. ....	42
Tabla 9. Condiciones experimentales para la operación de cada elutriador. ....	45
Tabla 10. Composición química de la cabeza de la mezcla de arena ferrotitanífera. ....	46
Tabla 11. Balance metalúrgico en el EA para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.08 [LPM].....	47
Tabla 12. Balance metalúrgico en el EA para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.53 [LPM].....	47
Tabla 13. Balance metalúrgico en el EA para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.82 [LPM].....	47
Tabla 14. Balance metalúrgico en el EN para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.08 [LPM] vertiendo directamente la alimentación sólida. ....	48
Tabla 15. Balance metalúrgico en el EN para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.53 [LPM] vertiendo directamente la alimentación sólida. ....	48
Tabla 16. Balance metalúrgico en el EN para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.82 [LPM] vertiendo directamente la alimentación sólida. ....	48
Tabla 17. Balance metalúrgico en el EN para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.08 [LPM] utilizando un embudo para la alimentación sólida. ...	49
Tabla 18. Balance metalúrgico en el EN para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.53 [LPM] utilizando un embudo para la alimentación sólida. ...	49

Tabla 19. Balance metalúrgico en el EN para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.82 [LPM] utilizando un embudo para la alimentación sólida. ...	49
Tabla 20. Valores de las constantes utilizadas para la determinar las velocidades terminales de las partículas minerales a través de la ley de Stokes. ....	83
Tabla 21. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 20%. ....	83
Tabla 22. Velocidad terminal de las partículas minerales bajo un flujo de agua del 20%. ....	83
Tabla 23. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 40%. ....	84
Tabla 24. Velocidad terminal de las partículas minerales bajo un flujo de agua del 40%. ....	84
Tabla 25. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 50%. ....	84
Tabla 26. Velocidad terminal de las partículas minerales bajo un flujo de agua del 50%. ....	84
Tabla 27. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 60%. ....	84
Tabla 28. Velocidad terminal de las partículas minerales bajo un flujo de agua del 60%. ....	85
Tabla 29. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 70%. ....	85
Tabla 30. Velocidad terminal de las partículas minerales bajo un flujo de agua del 70%. ....	85
Tabla 31. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 80%. ....	85
Tabla 32. Velocidad terminal de las partículas minerales bajo un flujo de agua del 80%. ....	85
Tabla 33. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 20%. ....	86

Tabla 34. Velocidad terminal de las partículas minerales en tamaño de malla 200 bajo un flujo de agua del 20%. .....	86
Tabla 35. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 40%. .....	86
Tabla 36. Velocidad terminal de las partículas minerales en tamaño de malla 200 bajo un flujo de agua del 40%. .....	86
Tabla 37. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 50%. .....	87
Tabla 38. Velocidad terminal de las partículas minerales en tamaño de malla 200 bajo un flujo de agua del 50%. .....	87
Tabla 39. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 60%. .....	87
Tabla 40. Velocidad terminal de las partículas minerales en tamaño de malla 200 bajo un flujo de agua del 60%. .....	87
Tabla 41. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 70%. .....	88
Tabla 42. Velocidad terminal de las partículas minerales en tamaño de malla 200 bajo un flujo de agua del 70%. .....	88
Tabla 43. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 80%. .....	88
Tabla 44. Velocidad terminal de las partículas minerales en tamaño de malla 200 bajo un flujo de agua del 80%. .....	88
Tabla 45. Flujos de agua obtenidos mediante el uso del rotámetro para el llenado de un recipiente de 1 [L]. .....	89
Tabla 46. Pesos moleculares y porcentajes de Fe y Ti en los minerales de trabajo. ....	91
Tabla 47. Porcentaje de ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en los C1 utilizando el END.....	91
Tabla 48. Porcentaje de ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en los C2 utilizando el END.....	91



Tabla 49. Porcentaje de ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en los T2 utilizando el END. ....	92
Tabla 50. Porcentaje de ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en los C1 utilizando el ENE. ....	92
Tabla 51. Porcentaje de ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en los C2 utilizando el ENE. ....	92
Tabla 52. Porcentaje de ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en los T2 utilizando el ENE. ....	92

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Jigging. En cada movimiento de expansión y contracción, las partículas se segregan gracias a su densidad <sup>[5]</sup> .....	8
Figura 2. Arreglo de una mesa giratoria <sup>[6]</sup> . .....	9
Figura 3. Segregación a través de un canal en espiral, con material denso (oscuro) y en el centro menos denso (más claro) que se extiende radialmente <sup>[5]</sup> . .....	10
Figura 4. Concentrador de cono Reichert <sup>[5]</sup> .....	11
Figura 5. Concentrador Knelson <sup>[5]</sup> . .....	12
Figura 6. Separador de gravedad múltiple a nivel escala <sup>[5]</sup> . .....	12
Figura 7. Elutriador Multietapa. Una mayor sección de las columnas o tubos se traduce en menor corriente del fluido. <sup>[10]</sup> .....	14
Figura 8. Equilibrio de fuerzas sobre una partícula en una columna de clasificación. <sup>[5]</sup> .....	15
Figura 9. Velocidad terminal de partículas de cuarzo en función del tamaño de partícula, determinadas a partir de las leyes de Stokes y Newton, y las ecuaciones de Dietrich y Jiménez y Madsen. <sup>[6]</sup> .....	19
Figura 10. Principales zonas de interés para exploración de hierro y titanio* .....	21
Figura 11. Componentes principales de las placas Arduino. <sup>[24]</sup> .....	23
Figura 12. IDE de Arduino. ....	24
Figura 13. Sensor de flujo de agua de efecto Hall <sup>[32]</sup> .....	26
Figura 14. Diagrama de flujo del proceso general del trabajo. ....	28
Figura 15. Bosquejo del elutriador propuesto. Con diferentes letras se señalan los componentes necesarios en la elaboración del elutriador para el laboratorio de Beneficio de Minerales. ....	29
Figura 16. Uniones de PVC ensambladas a la columna del elutriador A) derrame y B) descarga. ....	31
Figura 17. Sensor de flujo de agua YF-S201 con adaptadores hembra en los extremos. ....	32
Figura 18. Conexión del sensor de flujo de agua a la protoboard y placa Arduino. ....	33

Figura 19. Diagrama de flujo para la concentración gravimétrica por medio del elutriador propuesto. ....	36
Figura 20. Elutriador ensamblado. ....	38
Figura 21. EA del laboratorio de Beneficio de Minerales.....	39
Figura 22. Cabeza de la mezcla mineral de arenas ferrotitaníferas con tamaño de partícula en número de malla 100. ....	40
Figura 23. Productos obtenidos al operar el elutriador construido A) C1, B) C2 y C) T2. ....	40
Figura 24. Sistema sensor-Arduino-computadora. Mediante la pantalla LCD se muestra la lectura del flujo de agua a lo largo de la operación del elutriador. ....	41
Figura 25. Curva de calibración del sensor de flujo de agua.....	42
Figura 26. Mezclas de arenas ferrotitaníferas proporcionadas por el laboratorio de beneficio de minerales. ....	44
Figura 27. Comparación de los porcentajes de ley de Fe en EA vs EN con un flujo de agua de 2.08 [LPM]. ....	50
Figura 28. Comparación de los porcentajes de recuperación de Fe en EA vs EN con un flujo de agua de 2.08 [LPM].....	50
Figura 29. Comparación de los porcentajes de ley de Ti en EA vs EN con un flujo de agua de 2.08 [LPM]. ....	52
Figura 30. Comparación de los porcentajes de recuperación de Ti en EA vs EN con un flujo de agua de 2.08 [LPM].....	52
Figura 31. Comparación de los porcentajes de ley de Fe en EA vs EN con un flujo de agua de 2.53 [LPM]. ....	54
Figura 32. Comparación de los porcentajes de recuperación de Fe en EA vs EN con un flujo de agua de 2.53 [LPM].....	54
Figura 33. Comparación de los porcentajes de ley de Ti en EA vs EN con un flujo de agua de 2.53 [LPM]. ....	56
Figura 34. Comparación de los porcentajes de recuperación de Ti en EA vs EN con un flujo de agua de 2.53 [LPM].....	57
Figura 35. Comparación de los porcentajes de ley de Fe en EA vs EN con un flujo de agua de 2.82 [LPM]. ....	59

Figura 36. Comparación de los porcentajes de recuperación de Fe en EA vs EN con un flujo de agua de 2.82 [LPM].....	59
Figura 37. Comparación de los porcentajes de ley de Ti en EA vs EN con un flujo de agua de 2.82 [LPM]. .....	61
Figura 38. Comparación de los porcentajes de recuperación de Ti en EA vs EN con un flujo de agua de 2.82 [LPM].....	61
Figura 39. Comportamiento de la ley de Fe en C1 y Ti en C2 bajo los diferentes flujos de trabajo. ....	65
Figura 40. Comportamiento del porcentaje de recuperación de Fe en C1 y Ti en C2 bajo los diferentes flujos de trabajo. ....	66
Figura 41. Ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en el C1 utilizando el END. ....	67
Figura 42. Ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en el C2 utilizando el END. ....	67
Figura 43. Ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en el T2 utilizando el END. ....	68
Figura 44. Ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en el C1 utilizando el ENE. ....	70
Figura 45. Ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en el C2 utilizando el ENE. ....	70
Figura 46. Ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en el T2 utilizando el ENE. ....	71
Figura 47. A) Entrada de la alimentación del sólido al EA, B) se observa al mineral (sin avance) siendo introducido en el EA. ....	72
Figura 48. Embudo para la alimentación del sólido al EA. En la parte central se puede apreciar cierta cantidad de mineral que regresa por la entrada de la alimentación. ....	73
Figura 49. EA en operación.....	74
Figura 50. Elutriador nuevo instalado en el laboratorio de Beneficio de Minerales. ....	75

## Resumen

En el presente trabajo se desarrolló un equipo nuevo de elutriación, acoplado a un sistema de sensor de flujo conectado a Arduino para procesar minerales que presentan diferentes densidades, en este caso una mezcla compuesta de arenas de playa con minerales de magnetita e ilmenita, con la finalidad de obtener mejores concentrados y recuperaciones de Fe y Ti que fueran superiores a las obtenidas por el elutriador con el que ya contaba el laboratorio de Beneficio de Minerales del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química de la Universidad Nacional Autónoma de México.

Para ello, se determinaron las dimensiones que debía presentar este equipo así como los materiales con los que se tenía que construir, los cuales debían ser adecuados para las condiciones de operación, económicos y de fácil adquisición. Una vez construido, se eligió un tamaño de partícula con el cual se pudiera realizar una comparación entre este elutriador y el ya operado desde hace más de 50 años, escogiéndose un tamaño de partícula en malla 100 (150  $\mu\text{m}$ ).

La velocidad del flujo de agua se determinó a través de usar un rotámetro y mediante el código programado en Arduino. Mediante las leyes de Newton y Stokes y con el tamaño de partícula seleccionado, se determinaron las velocidades terminales que presentarían las partículas minerales. Conociendo las velocidades del flujo y de las diferentes partículas de mezcla sólida, se establecieron los flujos de trabajo para ambos elutriadores en los cuales se presentarían las mejores concentraciones.

Con los parámetros anteriores establecidos, se realizaron pruebas por triplicado. De cada elutriador se obtuvieron tres productos: concentrado uno (C1), concentrado dos (C2) y colas dos (T2), esperándose una ley de Fe mayor en C1 y en C2 una ley mayor de Ti. Estos productos se prepararon para ser analizados mediante la técnica de Absorción Atómica para determinar el porcentaje de Fe y Ti.

Por último, a través de balances metalúrgicos se determinaron las leyes y porcentajes de recuperación de los minerales en cada una de las pruebas,

obteniéndose los mejores valores en las pruebas realizadas por el elutriador construido.

## **Introducción**

Los elutriadores son concentradores que consisten en una o más columnas de separación de tamaño creciente en las cuales el fluido asciende a una velocidad constante. Las partículas de alimentación introducidas en la columna de concentración se separan en fracciones de acuerdo con sus velocidades terminales calculadas por medio de la Ley de Stokes. Las partículas con una velocidad menor que la velocidad del fluido derramarán, mientras que aquellas con mayor velocidad terminal que la del medio, se hundirán hacia la descarga. Los productos se recuperan por la parte inferior de la(s) columna(s) del elutriador. Este proceso continúa hasta que no haya signos visibles de clasificación de la mezcla mineral.

Esta técnica puede aplicarse en los procesos de preconcentración de minerales del tipo magnetita-ilmenita en arenas de playa. Uno de los requerimientos para emplear esta técnica de procesamiento se basa en el criterio de concentración el cual determina si la separación en cualquier proceso de concentración gravimétrico es posible y cuyo valor debe ser mayor a 2.5 para una separación efectiva.

En la actualidad, el laboratorio de Beneficio de Minerales del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Universidad Nacional Autónoma de México (UNAM), cuenta con un equipo con más de 45 años de servicio el cual carece de sistemas de instrumentación y de fácil operación, por lo que resulta importante y deseable el contar con un equipo nuevo con instrumentación y medición de flujo de agua a partir de un sistema Arduino. Para ello, en el diseño del elutriador se consideran materiales económicos y fácilmente disponibles, como lo es la tubería de policarbonato y PVC.

Los sistemas Arduino están constituidos por hardware y software, compuestos por un microcontrolador con entradas y salidas tanto analógicas como digitales. Gracias a sus diversas librerías, puede utilizarse en diferentes áreas tales como el procesamiento digital de señales o en el control y automatización de diferentes procesos. Con ello se puede llevar a cabo la medición, seguimiento, registro y control de una variable en tiempo real.

## **Hipótesis**

Será posible lograr un mejor control de la operación del elutriador y mejores recuperaciones a las obtenidas con el actual elutriador del laboratorio de Beneficio de Minerales a través de la construcción de un elutriador acoplado a un sistema Arduino para la medición de flujo de agua.

## **Objetivos**

- Diseñar, construir y poner en marcha un elutriador de bajo costo, a través de las velocidades terminales de asentamiento libre e impedido de fluidos stokesianos y newtonianos en pulpas.
- Aplicar el principio del efecto Hall en la medición de flujo de agua a través de la incorporación de un sensor de flujo y un sistema Arduino, con conexión a un ordenador.
- Comprobar a través del balance metalúrgico que el elutriador construido presenta mayor eficiencia que el actual equipo de laboratorio.



## **Capítulo 1. Marco Teórico**

### **1.1 Concentración De Minerales**

A lo largo de la historia los minerales han tenido gran importancia en la vida del ser humano, ya que al transformarlos han impulsado su desarrollo a través del tiempo, mejorando su calidad de vida. Todas las demás industrias necesitan de materias primas para funcionar, por tal motivo los minerales se transforman mediante diferentes procesos, uno de estos procesos es el proceso de concentración.[1] Este proceso consiste en aglomerar o “concentrar” los minerales valiosos separándolos de aquellos que carecen de valor (ganga o material estéril).

Para seleccionar un método de concentración adecuado, debe de tomarse en cuenta las características y propiedades físicas de cada mineral, de tal manera que esta diferencia entre las distintas propiedades permita la separación por concentración. [2]

La finalidad de los procesos de concentración es elevar la ley y recuperación del elemento de interés de una mena o mineral determinado, mediante el uso de equipos de separación sólido-sólido, generando de esta manera la separación de una o más especies mineralógicas y obteniendo una corriente enriquecida con el material de interés. [3]

Los principales métodos de concentración son los siguientes:

- Concentración Magnética
- Concentración Eléctrica
- Flotación
- Concentración Gravimétrica.

#### **1.1.1 Concentración Gravimétrica**

La concentración gravimétrica se basa principalmente en la separación de partículas debido a la diferencia de sus densidades. A través de hacer pasar un fluido, las partículas se separan a causa de la fuerza de gravedad o por una fuerza centrífuga que actúa sobre ellas. Esta separación también puede estar en función del tamaño y la forma de las partículas. [4]

Este método de concentración ha sido utilizado durante miles de años. Civilizaciones como la egipcia o la griega hacían uso de esta técnica para procesar sus minerales. A lo largo de la historia, se fue desarrollando por diferentes personajes tanto de Europa, Asia y Estados Unidos, y es en la década de 1920 el periodo en el que se establecieron muchas de las relaciones matemáticas que describen este proceso. Hacia mediados de siglo XX, se codificaron los principios en los que se basa la concentración por gravedad. [4]

Este método puede aplicarse a un gran número de procesos industriales, tales como el desarenado de granos alimenticios, pulpa de papel y materias primas químicas; reciclaje de residuos sólidos municipales; recuperación y reciclaje de derrames, virutas y molindas de la producción y fabricación de metales; entre otros. [4]

## 1.2 Principio de la Concentración Gravimétrica

La técnica de concentración gravimétrica no es un método que se pueda aplicar a todos los minerales, para ello debe existir una marcada diferencia de densidades entre las partículas minerales de interés y la ganga. Por tal motivo, es importante determinar el Criterio de Concentración (CC). Este criterio permite determinar la idoneidad de los procesos de separación por gravedad para un tipo de mineral en particular.

El criterio de concentración está en función de las densidades de las partículas minerales y de la densidad del fluido, y se expresa de la siguiente manera [5]:

$$CC = \Delta\rho = \frac{\rho_h - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} \quad Ec. 1$$

donde:

$\rho_h$  = densidad del mineral más pesado

$\rho_l$  = densidad del mineral más ligero

$\rho_f$  = densidad del medio fluido

Para obtener una separación fácil y efectiva, el resultado del cociente de la ecuación 1 debe ser mayor a 2.5. A medida que este cociente disminuye, la dificultad para separar a las partículas se incrementa, es decir, la eficiencia de separación de los minerales disminuye. La Tabla 1 muestra la facilidad con la que las partículas

pueden separarse aplicando el CC y hasta qué tamaños de partículas es aplicable. En esta tabla también se puede observar que a partir de un CC de 1.25 es prácticamente imposible que se lleve a cabo la separación de partículas utilizando esta técnica de concentración.

**Tabla 1. Dependencia del Criterio de Concentración para Separaciones por Gravedad.** [6]

Criterio de concentración	¿Separación?	¿Útil para?
2.5	Relativamente fácil	Hasta 75 [ $\mu\text{m}$ ]
1.75–2,5	Posible	Hasta 150 [ $\mu\text{m}$ ]
1.5–1.75	Difícil	Hasta 1.7 [mm]
1.25–1.5	Muy difícil	Hasta 6.35 [mm]
<1.25	Imposible	Imposible en cualquier tamaño

Es importante mencionar que en la movilidad de las partículas a través de un fluido influyen otros factores además de la diferencia de densidades. Estos son la forma y el tamaño que presenten las partículas.

### 1.3 Procesos de Concentración Gravimétrica

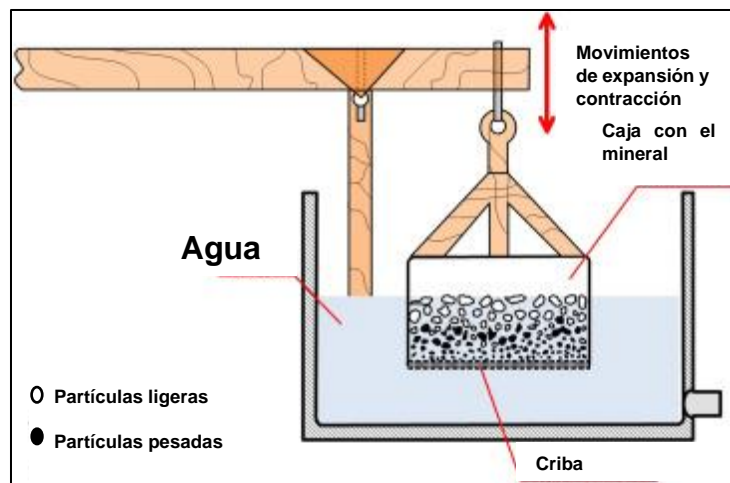
A través de la concentración por gravedad es posible mantener cierta distancia de separación entre las partículas ligeras y densas. A esta separación se le denomina espacio interparticular y es lo que permite concentrar a los diferentes minerales.[6] Para ello se utilizan distintos procesos de concentración por gravedad, los cuales pueden clasificarse en dos categorías principales:

- Métodos de concentración de corrientes. Son métodos en los que la densidad del medio es inferior a la de las especies minerales que se requieren separar. Hacen uso de movimientos verticales, horizontales e inclinados en los que se aprovechan diferentes fuerzas como la gravedad o la fuerza centrífuga. Se dividen en tres grupos: corrientes verticales, corrientes longitudinales, corrientes oscilatorias y centrífugas. Entre estos métodos se encuentran las mesas concentradoras, el proceso jig, los espirales concentradores, los conos Reichert, los concentradores centrífugos, entre otros. [7]

- Métodos de concentración en medios densos. Son métodos en los que la densidad del medio presenta una densidad de valor intermedio entre las densidades de las especies minerales que se desean separar. Estos métodos se basan en la separación de las partículas en función de sus densidades, en las que partículas de mayor densidad se hunden mientras que las de menor densidad flotan hacia la superficie.[7] Un dispositivo que se utiliza en estos procesos es el elutriador.

### 1.3.1 Jigging (Pulsadoras)

Se basa en la separación de un lecho de partículas minerales de diferente gravedad específica, fluidizado por una corriente pulsante, como se observa en la Figura 1.



**Figura 1. Jigging. En cada movimiento de expansión y contracción, las partículas se segregan gracias a su densidad<sup>[5]</sup>.**

La mezcla mineral es colocada sobre una chapa perforada o criba (screen) en forma de lecho fluido (bed). Este lecho es sometido a una pulsación repetida de expansión y contracción debido a la acción de un flujo vertical, con ello las partículas más densas se concentran en el fondo de la capa mineral, mientras que las más ligeras se recuperan en la parte superior. [5]

Es un método comúnmente utilizado para tratar partículas gruesas, requiere de marcadas diferencias entre las densidades de las partículas. Entre los minerales que se concentran por medio de este método se encuentra el carbón y oro aluvial.[8]

### 1.3.2 Mesa Concentradora

Es un proceso de separación en el cual partículas de diferentes tamaños y/o densidades son segregadas debido al movimiento de agitación horizontal al que son sometidas. En este método se utiliza una plataforma ondulada que junto con una capa fluyente de agua genera la separación de las partículas. Este dispositivo cuenta con un motor que le imprime a la mesa un movimiento asimétrico, siendo lento en el avance y rápido en el retorno. Con este movimiento, el efecto neto sobre las partículas resulta en un movimiento diagonal de estas generando una especie de abanico en el cual las partículas más ligeras se concentran a lo largo de la mesa mientras que las partículas más pesadas son concentradas en el extremo lejano a la alimentación del mineral, como se observa en la Figura 2. [6]

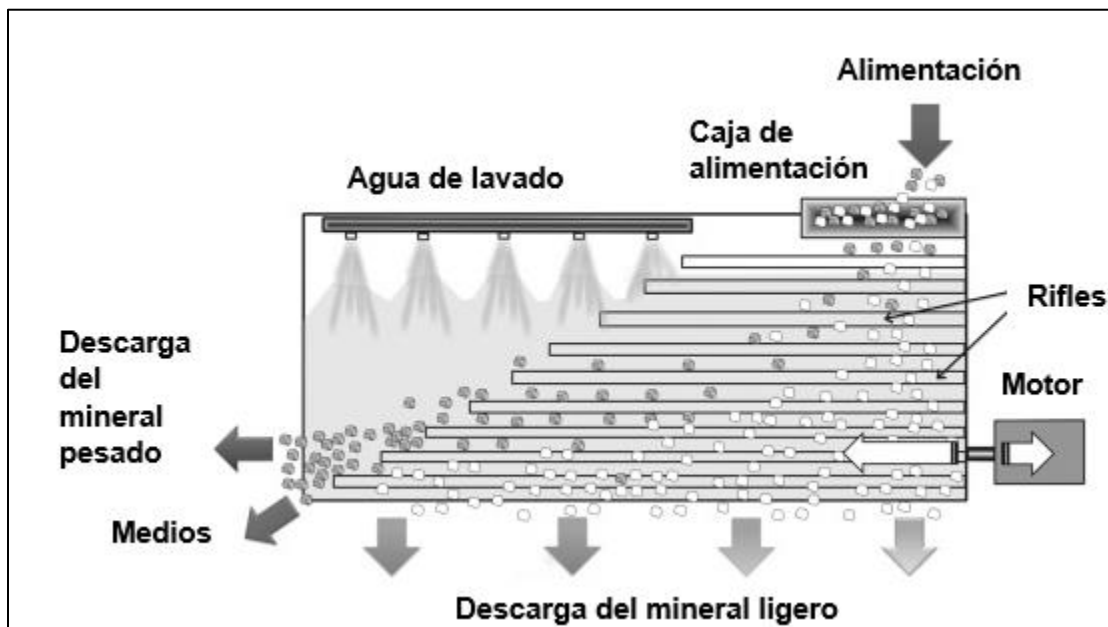
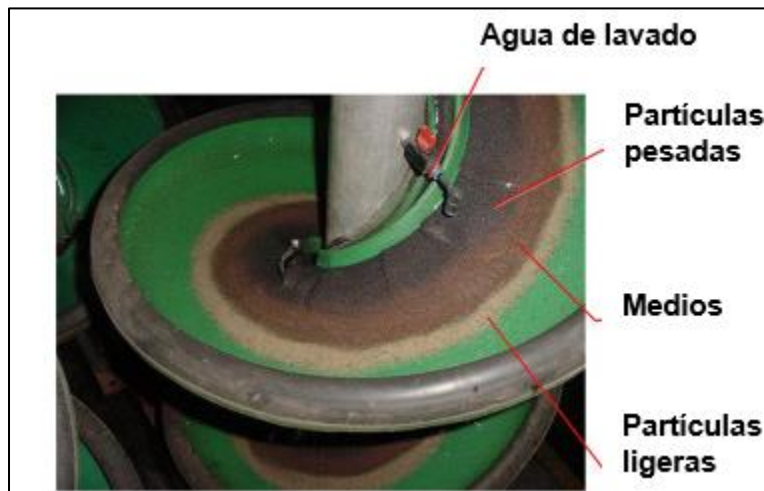


Figura 2. Arreglo de una mesa giratoria<sup>[6]</sup>.

### 1.3.3 Concentrador Espiral

Los concentradores en espiral consisten en canaletas de sección semicircular que forman un recorrido helicoidal vertical alrededor de una columna central. En la parte superior del espiral es introducida la suspensión dejándose fluir de manera descendente por gravedad. Debido a la geometría en espiral de las canaletas, la pulpa experimenta una fuerza centrífuga. Con ello se crea sobre la suspensión una segregación en la que las partículas más ligeras son llevadas hacia la periferia de

la canaleta, mientras que las partículas más pesadas permanecen próximas a la columna central. Este comportamiento se muestra en la Figura 3. [6]



**Figura 3. Segregación a través de un canal en espiral, con material denso (oscuro) y en el centro menos denso (más claro) que se extiende radialmente<sup>[5]</sup>.**

#### **1.3.4 Cono Reichert**

Los concentradores de cono Reichert son un tipo de concentrador gravimétrico en los que la pulpa o suspensión de alimentación es distribuida alrededor de la periferia del cono (Figura 4). Conforme la pulpa fluye por encima de la superficie inclinada del cono, las partículas de mayor densidad se hunden en el fondo del lecho. Son estas partículas las que están en estrecho contacto con la superficie del cono y pasan a través de una ranura ubicada en la parte inferior del cono, en donde son recuperadas. En cambio, la fracción ligera de la suspensión fluye sobre la ranura para ser tratada en alguna otra etapa o ser eliminada de forma permanente.

Es un proceso con una eficiencia relativamente baja, por lo que necesita varias etapas de concentración.[6]



Figura 4. Concentrador de cono Reichert<sup>[5]</sup> .

### 1.3.5 Concentradores Centrífugos

Este método surge por la necesidad de recuperar de manera eficiente partículas finas que presentan una gran densidad, para lo cual se hace uso de la aceleración centrífuga aumentando de esta forma la velocidad de sedimentación de las partículas. Algunos de los equipos de concentración centrífuga más utilizados son los siguientes:

**Concentrador Knelson.** Es un separador centrífugo de lecho fluidizado activo de alta capacidad, utilizado para concentrar minerales pesados. La fuerza centrífuga que actúa sobre las partículas es 60 veces superior a la fuerza de gravedad. De esta manera las partículas más densas son atrapadas en los anillos o rifles ubicados

en el tambor giratorio de la máquina, mientras que las partículas más ligeras (ganga) son expulsadas del equipo, como se observa en la Figura 5.[6]

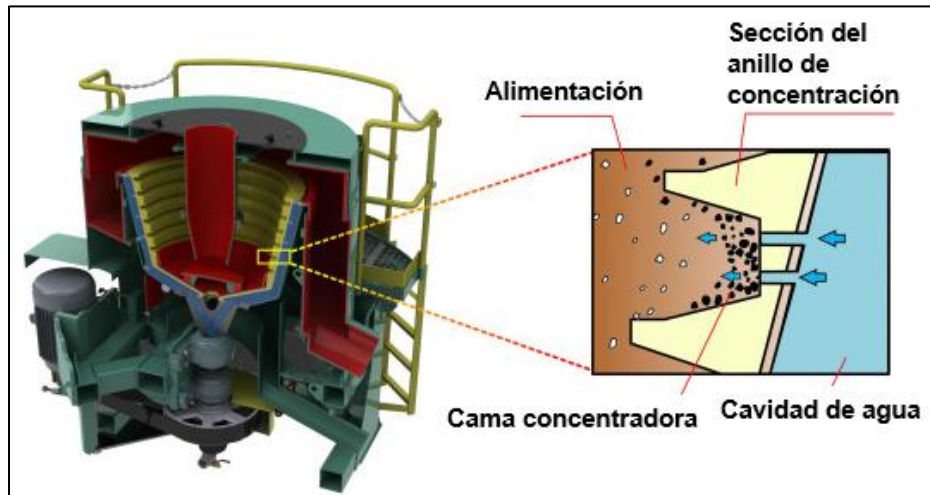


Figura 5. Concentrador Knelson<sup>[5]</sup>.

**Separador de Gravedad Múltiple de Mozley.** Se utiliza para separar partículas finas y ultrafinas. Consiste básicamente en un tambor giratorio que presenta una agitación adicional (Figura 6); como resultado brinda una mayor separación entre las partículas. Dentro del tambor se encuentran barras longitudinales equipadas con rascadores (scrapers) pequeños que raspan los sólidos asentados debido a la pendiente que presenta el tambor, con ello las partículas son desplazadas hacia la descarga de concentrados.[5]

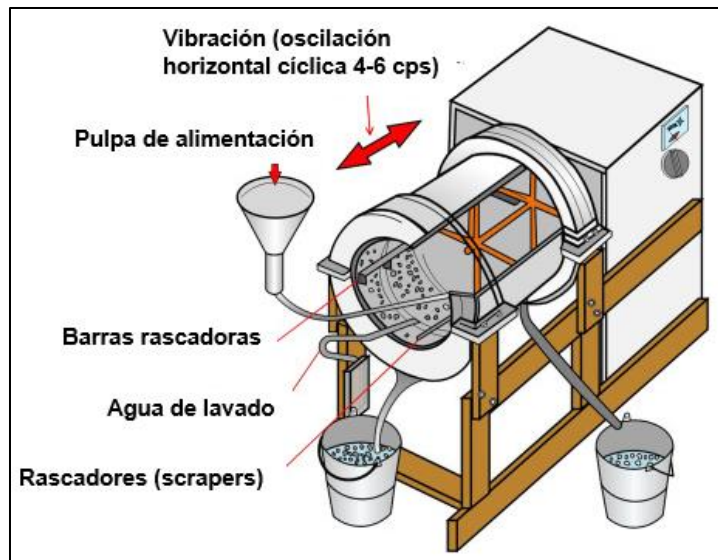


Figura 6. Separador de gravedad múltiple a nivel escala<sup>[5]</sup>.



### 1.3.6 Características de Operación de los Procesos de Concentración

Las características en las que opera cada uno de los procesos enlistados con anterioridad se muestran en la Tabla 2.

**Tabla 2. Comparación de los diferentes métodos de concentración gravimétrica.**

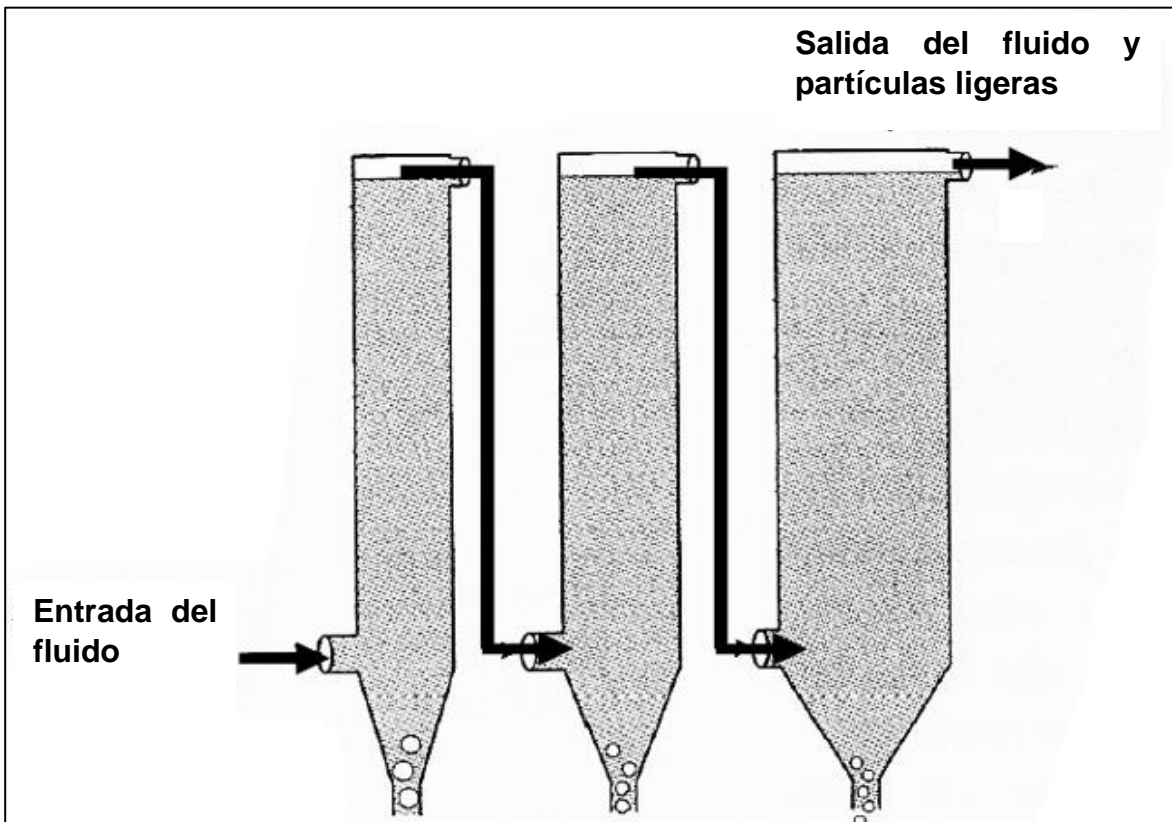
Proceso de Concentración	Capacidad de Alimentación	Tamaño de Partícula en la Alimentación	% wt de sólidos
Jigging	< 110 [t/h]	<30 [mm]	
Mesa Concentradora	< 2.5 [t/h]	100 [μm]-3 [mm]	25%
Concentrador de Espiral	1.5-5 [t/h]	75 [μm]-3 [mm]	15-45 %
Cono Reichert	40-30 [t/h]	30 [μm]-3 [mm]	55-75 %
Concentrador Knelson	<150 [t/h]	10 [μm]-6 [mm]	0.05%
Separador de Gravedad Múltiple	<50 [t/h]	6 [μm]-100 [μm]	25%

### 1.4 Elutriador

Un elutriador es un dispositivo formado por una o varias columnas de clasificación que contienen una corriente ascendente de fluido (Figura 7). Dentro de estas columnas se combinan partículas sólidas que se deseen separar. Estas partículas se introducen en la zona de alimentación sólida ubicada en la parte superior de la primera columna de clasificación, para que por medio de la gravedad actúen dentro del fluido que presenta un movimiento con dirección ascendente. Dentro del fluido las partículas se aceleran, sumergiéndose hasta alcanzar una velocidad constante denominada velocidad terminal. Esta velocidad depende del tamaño, forma y densidad de las partículas minerales. [9]

Dentro de la(s) columna(s) del elutriador, aquellas partículas que presenten una velocidad terminal mayor a la del fluido tenderán a hundirse generando un producto en la parte inferior de la columna llamado descarga (underflow). Por otro lado, aquellas partículas cuya velocidad terminal sea menor que la velocidad ascendente

del fluido, se dirigirán a la parte superior de la columna generando un desbordamiento o derrame (overflow).[5]



**Figura 7. Elutriador Multietapa. Una mayor sección de las columnas o tubos se traduce en menor corriente del fluido.<sup>[10]</sup>**

#### **1.4.1 Equilibrio de Fuerzas y Velocidad Terminal**

La Figura 8 muestra una partícula mineral dentro de un fluido ascendente, así como las fuerzas que actúan sobre ella.

Mediante la segunda ley de movimiento de Newton, el movimiento de la partícula se describe como [11]:

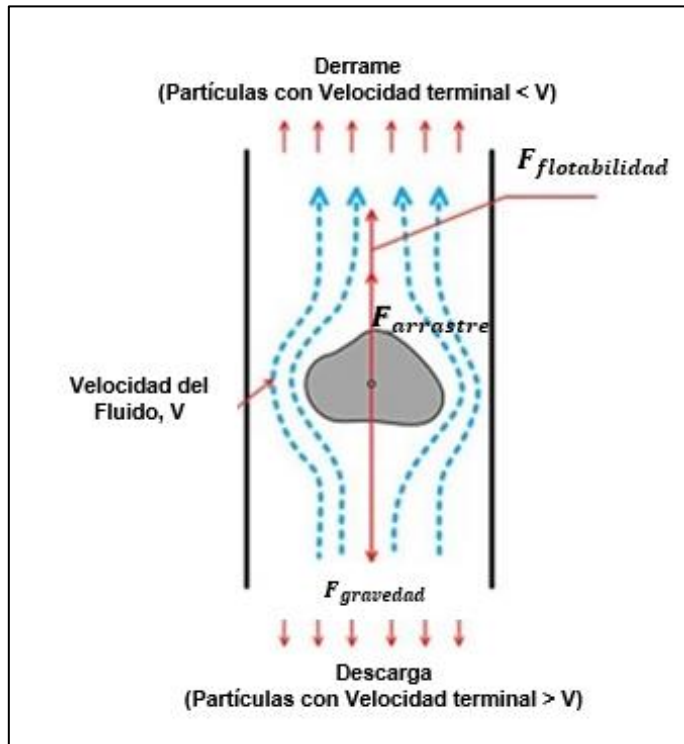
$$mg - m_f g - F_D = m \frac{dv}{dt} = ma \quad \text{Ec. 2}$$

donde:

El producto  $mg$  es la fuerza de gravedad que actúa sobre la partícula y que actúa hacia abajo;

el producto  $m_f g$  es la fuerza de empuje o flotabilidad del fluido desplazado que actúa de forma paralela y contraria a la fuerza de gravedad;

$F_D$  es la fuerza de arrastre que actúa en la superficie de la partícula y es paralela y contraria a la fuerza de gravedad.



**Figura 8. Equilibrio de fuerzas sobre una partícula en una columna de clasificación.**<sup>[5]</sup>

La partícula dentro del fluido se desplaza hasta que llega a una velocidad constante (en este caso llamada velocidad terminal), por tanto deja de acelerarse y la ecuación 2 puede reescribirse de la siguiente manera:

$$mg - m_f g - F_D = 0 \quad Ec. 3$$

Suponiendo un comportamiento ideal en el cual la partícula presenta una forma esférica y que el fluido presenta una viscosidad y densidad constante [11], la masa de la ecuación 3 se puede reescribir en función de la densidad del fluido y del diámetro y la densidad de la partícula.

$$V_{esf} = \frac{4}{3} \pi r^3 = \frac{4}{3} \pi \left(\frac{d}{2}\right)^3 = \frac{m}{\rho} \quad Ec. 4$$

Reescribiendo el término de masa:

$$m_i = \frac{\rho_i d^3 \pi}{6} \quad Ec. 5$$

Sustituyendo la ecuación 5 en la ecuación 3:

$$\frac{\rho d^3 \pi}{6} g - \frac{\rho_f d^3 \pi}{6} g - F_D = 0 \quad Ec. 6$$

Agrupando términos, la ecuación 6 se puede expresar como:

$$F_D = \frac{(\rho - \rho_f) d^3 \pi}{6} g \quad Ec. 7$$

Cuando una partícula se asienta con velocidad uniforme en un fluido en reposo, la fuerza de arrastre puede expresarse como [12]:

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_f v^2 A_p \quad Ec. 8$$

En la ecuación 8  $C_D$  corresponde al coeficiente de arrastre. Igualando la ecuación 7 con la ecuación 8 se obtiene:

$$\frac{(\rho - \rho_f) d^3 \pi}{6} g = F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_f v^2 A_p \quad Ec. 9$$

Debido a que se considera que la partícula es esférica,  $A_p$  corresponde al área de un círculo. Despejando a  $C_D$  de la ecuación 9 y reescribiendo a  $A_p$  en términos del diámetro de la partícula:

$$C_D = \frac{2(\rho - \rho_f) d^3 \pi g}{6v^2 \rho_f \left(\frac{\pi d^2}{4}\right)} = \frac{4(\rho - \rho_f) dg}{3v^2 \rho_f} \quad Ec. 10$$

$C_D$  es función del Número de Reynolds ( $Re$ ) de la partícula, el cual se calcula como:

$$Re = \frac{\rho_f v d}{\mu} \quad Ec. 11$$

Donde  $\mu$  representa la viscosidad dinámica del fluido.

$C_D$  es un factor adimensional que se ha calculado mediante el uso de correlaciones que dependen del producto de  $C_D Re$  [13]. Utilizando las ecuaciones 10 y 11 se obtiene:

$$C_D Re = \frac{4(\rho - \rho_f)dg}{3v^2\rho_f} \times \frac{\rho_f vd}{\mu} = \frac{4(\rho - \rho_f)d^2g}{3v\mu} \quad Ec. 12$$

Además, para partículas de hasta 110  $[\mu m]$  de diámetro y  $Re < 1$ , el sistema se encuentra bajo el régimen de Stokes en el cual se cumple que  $C_D \approx 24/R$  [6]. Sustituyendo este término en la ecuación 12, se obtiene la relación siguiente:

$$Re \left( \frac{24}{Re} \right) = \frac{4(\rho - \rho_f)d^2g}{3v\mu} \quad Ec. 13$$

Finalmente, despejando de la ecuación 13 el término de velocidad, se obtiene la Ley de Stokes para partículas finas. Esta ecuación describe la velocidad terminal de una partícula bajo un flujo laminar.:

$$v_t = \frac{(\rho - \rho_f)d^2g}{18\mu} \quad Ec. 14$$

Cuando las partículas presentan diámetros mayores a 3.5 [mm] y número de Reynolds mayor a 1000 [6], la ecuación que describe su velocidad terminal se obtiene al despejar de la ecuación 10 el término de velocidad. Esta ecuación se conoce como la Ley de Newton:

$$v_t = \sqrt{\frac{4(\rho - \rho_f)dg}{3C_D\rho_f}} \quad Ec. 15$$

#### 1.4.2 Partículas con Comportamiento No Ideal en el Proceso de Elutriación

La ecuación 14 y 15 suponen casos ideales en el cual las partículas tienen una forma esférica. Sin embargo, la realidad es que las partículas presentan una gran variedad de formas. Inclusive, partículas de una misma especie mineral pueden llegar a presentar una gran variedad de velocidades terminales debido a la

heterogeneidad en la forma de los granos, dificultando así la separación eficaz de las especies que desean separarse.[9]

A través de trabajos experimentales, W. E. Dietrich [14] derivó una ecuación empírica que toma en cuenta factores como los efectos del tamaño, la densidad, la forma y la redondez en la velocidad de sedimentación, obteniendo un parámetro adimensional llamado velocidad de asentamiento adimensional ( $W^*$ ), el cual se expresa como:

$$W^* = \frac{v_t^3 \rho_f^2}{(\rho - \rho_f) g \mu} \quad \text{Ec. 16}$$

Una vez obtenido el valor de  $W^*$ , de la ecuación 16 se puede determinar la velocidad terminal de la partícula, obteniéndose la siguiente ecuación:

$$v_t = \sqrt[3]{\frac{W^* (\rho - \rho_f) g \mu}{\rho_f^2}} \quad \text{Ec. 17}$$

Por otra parte, los investigadores Jiménez y Madsen [15], derivaron a partir del trabajo realizado por Dietrich una fórmula más sencilla para determinar  $W^*$  a partir del factor de forma y redondez de la partícula, cuya expresión es la siguiente ecuación:

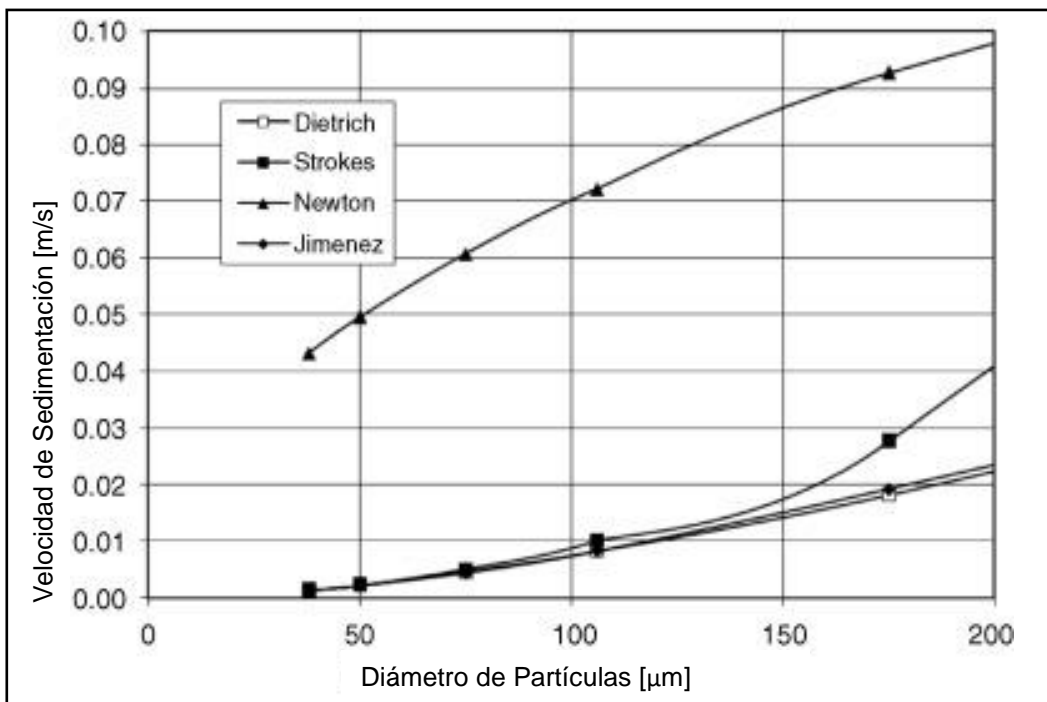
$$W^* = \frac{v_t}{\sqrt{\left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f}\right) g d}} \quad \text{Ec. 18}$$

Al igual que con la ecuación de Dietrich, una vez que se determina  $W^*$  la velocidad terminal puede obtenerse de la ecuación 18, expresándose como:

$$v_t = W^* \left( \sqrt{\left(\frac{\rho - \rho_f}{\rho_f}\right) g d} \right) \quad \text{Ec. 19}$$

Sin embargo, cuando los tamaños de partícula no sobrepasan los 150 [ $\mu\text{m}$ ], la Ley de Stokes y las ecuaciones de Dietrich y Jiménez y Madsen son bastante similares

describiendo el comportamiento de la velocidad terminal de las partículas, como se puede observar en la Figura 9.



**Figura 9. Velocidad terminal de partículas de cuarzo en función del tamaño de partícula, determinadas a partir de las leyes de Stokes y Newton, y las ecuaciones de Dietrich y Jiménez y Madsen.<sup>[6]</sup>**

### 1.4.3 Consideraciones en el Proceso de Elutriación

En los procesos de elutriación la altura de las columnas juega un papel importante en las velocidades terminales de las partículas. Cuando la distancia que recorren a través de la columna es muy corta, existe la posibilidad de que las partículas no tengan la oportunidad de alcanzar sus velocidades terminales. Así mismo, el tiempo requerido para alcanzar dichas velocidades es otro aspecto importante que se debe considerar en la técnica de elutriación. [6]

Las partículas se pueden fraccionar según el tamaño, variando la cantidad de flujo que pasa a través de la alimentación del fluido o alterando el tamaño de la columna de elutriación. De este modo, se puede obtener una distribución de tamaño acumulativa recogiendo las diversas fracciones en frascos de sedimentación. [16]

Al utilizar un elutriador multietapa, el incremento de tamaño para cada columna se realiza en sucesiones de  $\sqrt{2}$ ,  $\sqrt[4]{2}$  o  $\sqrt[10]{10}$ , con el objetivo de reducir por etapas la velocidad superficial del fluido que pasa de una columna a otra. De este modo se parte desde una velocidad relativamente alta en la primera columna de clasificación hasta una velocidad relativamente baja en la última, obteniendo productos diferentes en cada una de las columnas. En la parte inferior de la primera columna se obtiene como producto a las partículas más gruesas y densas y productos progresivamente más finos en la parte inferior de las columnas posteriores, siendo en el derrame de la última columna de clasificación donde desbordarán las partículas más finas y menos densas. [5]

Es importante mencionar que trabajando inclusive con una mezcla ideal de partículas minerales (de misma forma y tamaño), en la que cada especie de partículas presenta una velocidad terminal diferente, existe el problema de la turbulencia del fluido. Esto implica que en una mezcla en la que la tendencia de las partículas de la especie X es desplazarse hacia arriba, se “mezclan” moviéndose con desplazamientos descendentes. De igual forma, las partículas de la especie Y cuya tendencia es desplazarse hacia abajo, se “mezclan” moviéndose con desplazamientos ascendentes. Por lo tanto, aunque las partículas de la especie Y pueden tener una velocidad terminal que les permita desplazamientos descendentes, es muy posible que algunas de ellas se mezclen hacia arriba lo suficiente como para aparecer en el producto superior. Lo mismo se aplica a las partículas de la especie X, que pueden aparecer en el producto inferior. De tal forma que, aunque la separación sea aparentemente “ideal”, no puede ser perfecta.[9]

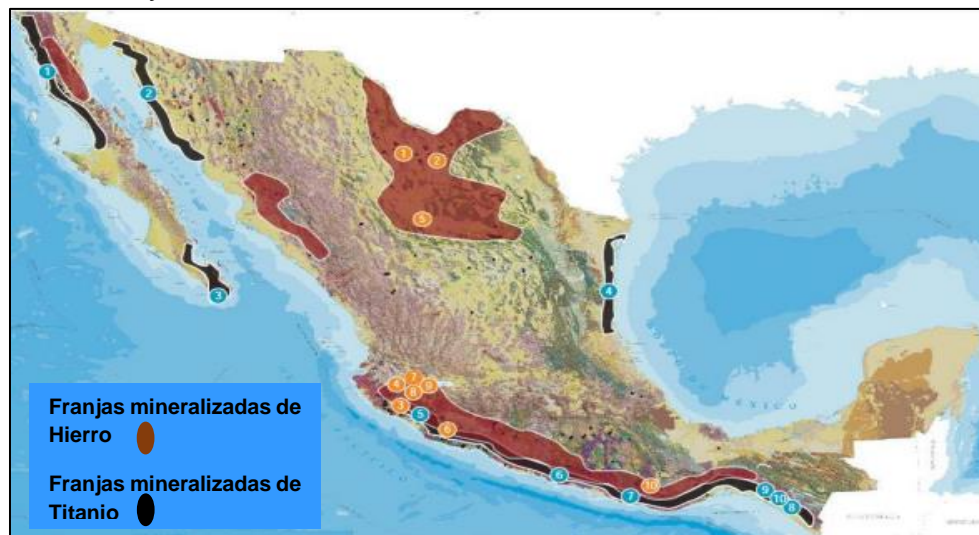
### **1.5 Descripción de la Magnetita y la Ilmenita**

Tanto el hierro como el titanio son elementos con gran importancia en la industria minera nacional. Del hierro se conocen más de 300 especies minerales de importancia industrial, entre ellas la magnetita  $\text{Fe}_3\text{O}_4$  (72.4% de Fe). Este mineral se encuentra principalmente en los estados de Baja California, Chihuahua, Coahuila, Colima, Michoacán, entre otros. [17]



El titanio, a pesar de no ser un elemento común en México se encuentra principalmente en los estados de Tamaulipas, Chiapas, Guanajuato, Hidalgo, Jalisco, Morelos, Nuevo León, Sonora, Zacatecas, Baja California y Oaxaca. [18] En el 2009, el Servicio Geológico Mexicano (SGM) reportó concentrados de Ti en Oaxaca con 36% de  $TiO_2$  y 42% de Fe. Esta asociación de minerales sugiere la presencia de ilmenita ( $FeTiO_3$ ). [19] La ilmenita es uno de los dos minerales titaníferos que contiene una concentración suficiente de Ti para su explotación: 36.8% de Fe, 31.6% de Ti y 31.6% de O. [18]

La Figura 10 muestra las principales zonas de interés para la explotación de minerales de Fe y Ti.



**Figura 10. Principales zonas de interés para exploración de hierro y titanio\*.**  
 \* Imagen tomada de la Secretaría de Economía (2014).

La Tabla 3 muestra algunas propiedades físicas de la magnetita y de la ilmenita.

**Tabla 3. Propiedades físicas de la magnetita y la ilmenita.**

Propiedad Física	Mineral	
	$Fe_3O_4$ [20]	$FeTiO_3$ [18]
Densidad [ $g/cm^3$ ]	5.3	4.7
Brillo	Metálico	Metálico
Color	Negro grisáceo, negro hierro	Negro hierro. Opaco
Raya	Negra	Negra o rojo castaño
Dureza (Mohs)	5.5-6.5	5.0-6.0

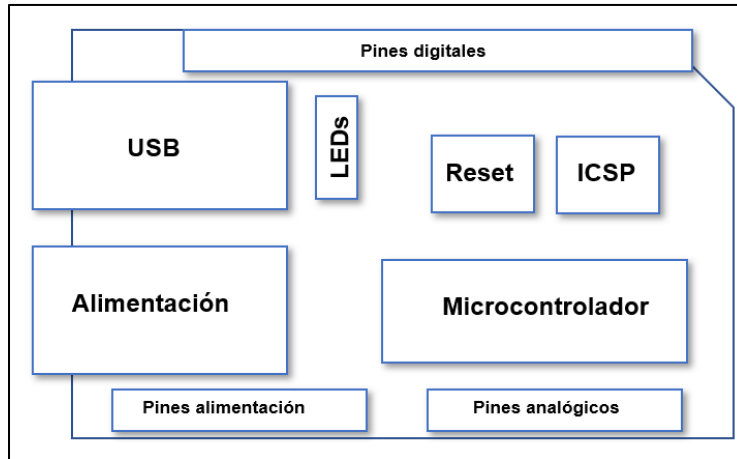
## 1.6 Sistema Arduino

Arduino es una plataforma constituida por hardware y software que surge en el año 2005 en el Instituto de Diseño Interactivo de Ivrea (Italia), con la finalidad de poner al alcance de todos un dispositivo económicamente accesible y que funcionara con diferentes sistemas operativos. Actualmente, es un sistema amigable con los usuarios ya que utiliza un lenguaje de programación bastante fácil de aprender y de utilizar. Además, por ser un sistema de código abierto, permite tener acceso a un gran número de librerías, mediante las cuales se pueden desarrollar diferentes proyectos para cubrir alguna necesidad en específico; como puede ser la activación de un motor o la automatización y control de algún proceso. [21]

Los sistemas Arduino, además de ser utilizados tanto para tareas especializadas como la automatización de procesos y la robótica, también son utilizados en dispositivos de uso común como los siguientes:[22]

- Cajeros automáticos;
- Calentadores de agua;
- Plumas de los estacionamientos;
- Puertas electrónicas de plazas comerciales y supermercados;
- Electrodomésticos como lavadoras o microondas.

Todas estas tareas se llevan a cabo gracias a la incorporación de un microcontrolador ubicado dentro de las placas Arduino. Estas placas cuentan con un microcontrolador con entradas y salidas tanto analógicas como digitales. A través del Integrated Development Environment (IDE) o Entorno de Desarrollo Integrado de Arduino, se indica a la placa qué hacer enviando un conjunto de instrucciones al microcontrolador, el cual las interpreta y ejecuta. En la Figura 11, se muestran los componentes básicos de las placas Arduino. [23]



**Figura 11. Componentes principales de las placas Arduino.**<sup>[24]</sup>

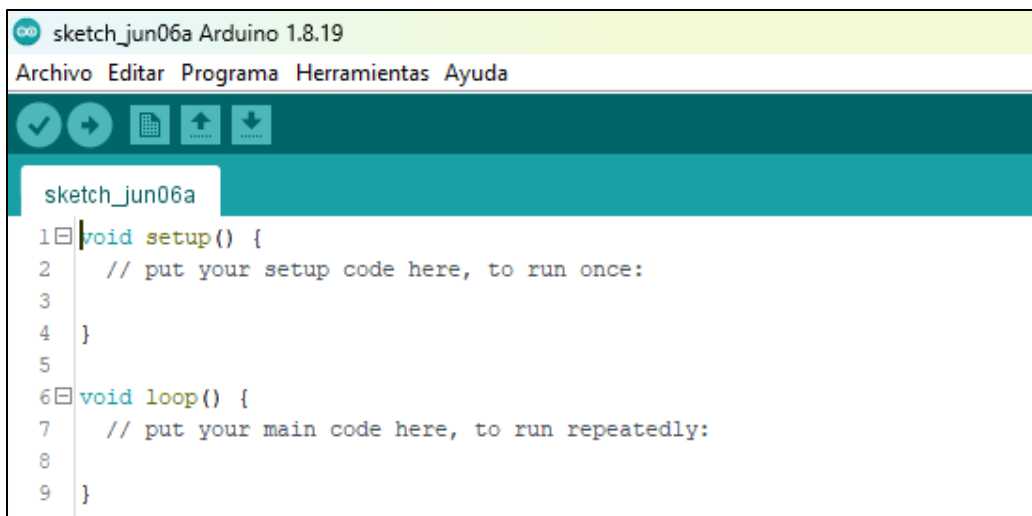
La Tabla 4 describe la función de los componentes básicos de las placas Arduino mostrados en la Figura 11.

**Tabla 4. Función de los componentes básicos que conforman las placas Arduino.**

Componente	Función
Microcontrolador	Almacena y ejecuta el programa desarrollado por el usuario.
Alimentación	Vía de alimentación del voltaje (7-12 [V])
USB	Conectar la placa Arduino con la computadora para la programación. También sirve como vía de alimentación de energía.
Pines	Conectar sensores, motores, focos, etcétera.

### 1.6.1 IDE de Arduino

Dentro del IDE de Arduino, cada programa que es creado recibe el nombre de sketch. Los bloques básicos de este programa son las funciones *setup* y *loop*. Primeramente y de forma única se ejecuta la función *setup* en cuyo bloque se inicializa el programa, es decir, es el bloque en el cual se establecen las variables, la operación de los pines y el llamado de las librerías de funciones. *Setup* utiliza un par de llaves “{}” para delimitar las líneas de programación correspondientes a este bloque. Por otro lado, la función *loop* incluye las líneas de programación que se ejecutarán de manera continua, repitiendo el proceso varias veces. La Figura 12 muestra el sketch inicial cuando al comenzar a codificar en el IDE de Arduino.[25]



```
sketch_jun06a Arduino 1.8.19
Archivo Editar Programa Herramientas Ayuda
sketch_jun06a
1 void setup() {
2   // put your setup code here, to run once:
3
4 }
5
6 void loop() {
7   // put your main code here, to run repeatedly:
8
9 }
```

**Figura 12. IDE de Arduino.**

Ambas funciones comienzan con *void* y terminan con un par de paréntesis vacío “()”. La palabra *void* que precede a ambas funciones indica que las funciones no regresan algún valor, mientras que el par de paréntesis implica que no es necesario agregar algún dato a las funciones.[26]

### 1.6.2 Ventajas de Arduino

Trabajar con esta plataforma ofrecer las siguientes ventajas [27]:

- Económicas. Los microcontroladores que utiliza son de bajo costo en comparación con otras plataformas. Además, se pueden reutilizar para diferentes proyectos.

- Multiplataforma. Permite su instalación y ejecución en sistemas operativos como Windows, Macintosh OSX y Linux.
- Entorno claro y simple de programación. No necesita de usuarios experimentados dentro de este ambiente de programación.
- Software de código abierto y extensible. Puede expandirse a otros lenguajes de programación como C++.
- Código abierto y hardware extensible. Permite a los usuarios crear sus propias versiones y diseños hardware de las placas.

### 1.7 Sensor de Flujo

El agua es una sustancia cuyo flujo es medido principalmente a través de dispositivos mecánicos o electrónicos. Estos dispositivos, llamados sensores de flujo, son conectados en la tubería que transporta el fluido. En el interior, el sensor contiene aspas (tipo turbina) colocadas de manera transversal al movimiento del líquido, las cuales giran impulsadas por la circulación del fluido. Esto genera que la turbina que se encuentra conectada a un imán active un sensor de efecto Hall que a su vez emite un pulso eléctrico que puede ser adquirido y procesado por medio de un sistema Arduino, de tal manera que pueda realizar la conversión entre magnitudes para obtener el caudal o gasto volumétrico correspondiente. [28]

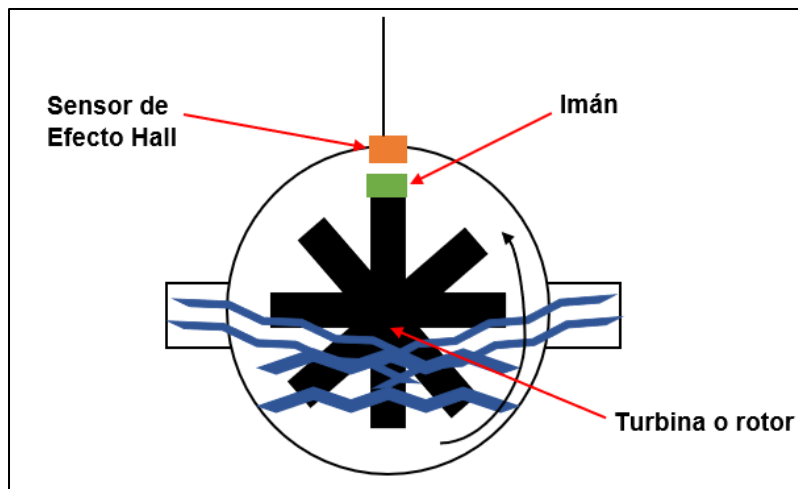
Existen diferentes tipos de sensores de efecto Hall, la Tabla 5 presenta sus características principales.

**Tabla 5. Características Principales de los Sensores de Flujo de Efecto Hall<sup>[29]</sup>.**

<b>Característica</b>	<b>Descripción</b>
Diámetro	1/2", 3/4", 1"
Cables	Rojo (alimentación de corriente) Negro (tierra) Amarillo (salida de pulsos del sensor de efecto Hall)
Flujo	1-60 [L/min]

El efecto Hall es un fenómeno en el cual se crea una diferencia de potencial debido a la separación de las cargas en el interior de un material conductor por el cual está circulando una corriente. Dicha separación de cargas dentro del material conductor se debe a la presencia de un campo magnético perpendicular a la dirección de la corriente. [30]

Los sensores basados en efecto Hall consisten en un elemento conductor o semiconductor y un imán.[31] El sensor de flujo proporciona como señal de salida un tren de pulsos en el cual cada uno de ellos equivale a una revolución completa de la turbina en el interior del sensor. [30] Este sensor de efecto Hall está aislado del agua, de manera que siempre se mantiene seco y seguro, como se puede observar en la Figura 13. [29]



**Figura 13. Sensor de flujo de agua de efecto Hall<sup>[32]</sup>.**

La señal de salida es adquirida por el microcontrolador del sistema Arduino. Debido a que el volumen del líquido por cada tren de pulsos es fijo y de un valor conocido (promedio), se puede determinar el flujo de agua del sensor en [LPM] mediante la ecuación 20:

$$Flujo (F) = \frac{Freq * 60}{K} \quad Ec. 20^{[33]}$$

donde:

K = Factor de conversión, según el fabricante

Freq = Frecuencia del tren de pulsos [pulsos/segundo]

La frecuencia es un parámetro que consiste en la cantidad de pulsos de la señal de salida del sensor tomando como base un segundo. Para transformar la frecuencia a [LPM] este parámetro se multiplica por 60.

## Capítulo 2. Metodología de Trabajo

En la Figura 14 se muestran las etapas en las que consistió el desarrollo del elutriador y la realización de las pruebas.

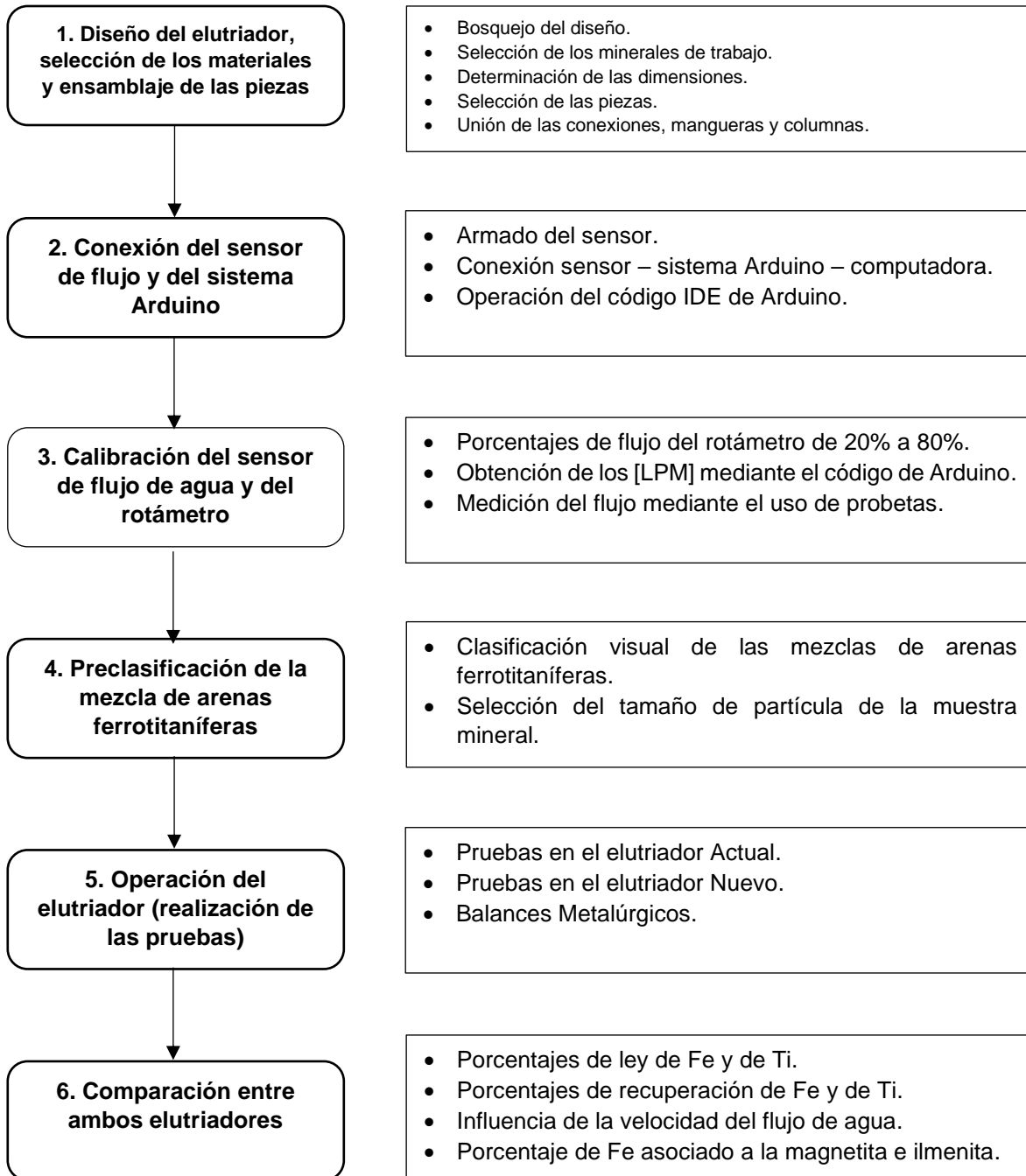


Figura 14. Diagrama de flujo del proceso general del trabajo.



## 2.1 Diseño del Elutriador, Selección de los Materiales y Ensamblaje de las Piezas

En la selección de los materiales, se consideró la función que debían de cumplir como componentes para el diseño del elutriador, considerando además que fueran económicos y de fácil adquisición. Para las columnas se seleccionaron tubos de policarbonato, de manera que el movimiento de las partículas pudiera ser observable.

Debido a la larga duración y resistencia que presenta el policloruro de vinilo (PVC), se seleccionó este material para ser parte de las conexiones del elutriador. Siendo estas partes donde se depositan los diferentes productos concentrados, el uso de PVC resulta ideal por ser un material químicamente inerte. La Figura 15 muestra el esquema de las partes que componen al elutriador.

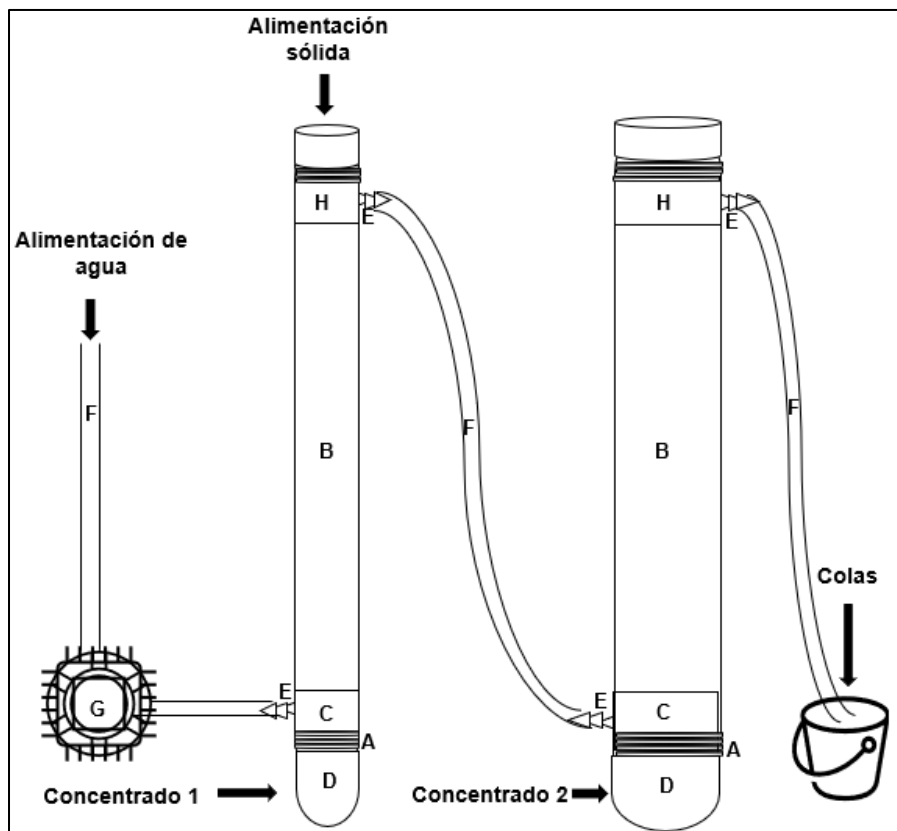


Figura 15. Bosquejo del elutriador propuesto. Con diferentes letras se señalan los componentes necesarios en la elaboración del elutriador para el laboratorio de Beneficio de Minerales.

En la Tabla 6 se detallan las características de los componentes que conforman al elutriador mostrado en la Figura 15.

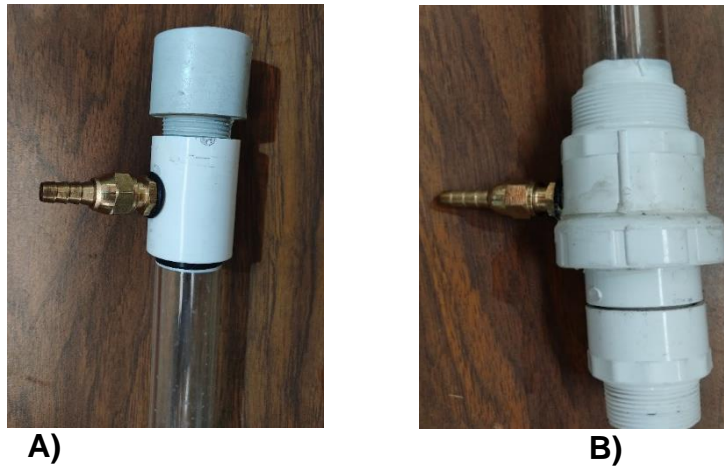
**Tabla 6. Descripción de los componentes para el elutriador propuesto.**

Elemento	Componente	Descripción	Cantidad
A	Machón Doble Rosca de PVC	Machón Doble Rosca de PVC de 1 [in]	1
		Machón Doble Rosca de PVC de 1 ¼ [in]	1
B	Tubos	Tubo de policarbonato de 1 [m] de largo y 1 [in] de diámetro	1
		Tubo de policarbonato de 1 [m] de largo y 1 1/4 [in] de diámetro	1
C	Adaptador Mixto de PVC	Adaptador mixto de PVC cementar y rosca hembra 1 [in] de diámetro	1
		Adaptador mixto de PVC cementar y rosca hembra 1 ¼ [in] de diámetro	1
D	Tapones de PVC con rosca	Tapón de PVC de 1 [in] de diámetro	1
		Tapón de PVC de 1 ¼ [in] de diámetro	1
E	Cople de espiga	Cople de espiga con tuerca giratoria de ¼ [in]	4
F	Manguera	Manguera transparente de ¼ [in] y 3 [m] de largo	1
G	Sensor de flujo de agua	Modelo YF-S201 Rango de trabajo: 1-30 [L/min]	1
H	Tapas de Inserción	Tapas de Inserción de 1 [in]	1
		Tapas de Inserción de 1 ¼ [in]	1

Además del material ocupado para diseñar el elutriador, se hizo uso de materiales auxiliares tanto para unir y manipular cada uno de los componentes, así como para soportar el equipo una vez ensamblado. Algunos de estos materiales fueron:

- Pegamento para tubería de PVC
- Llave Stilson
- Cinta sella roscas (cinta teflón)
- Soportes universales
- Pinzas de tres dedos
- Taladro

Una vez adquiridas todas las piezas requeridas para la construcción del elutriador, a través del uso de cinta teflón y pegamento se conectaron las columnas a las diferentes uniones. Con ayuda del taladro se realizaron perforaciones adecuadas en las diferentes conexiones que sirven como entrada/salida de la corriente de agua y/o del mineral. Utilizando pegamento y cinta teflón se unieron a la parte superior e inferior de cada una de las columnas. La Figura 16 muestra a las uniones ensambladas.



**Figura 16. Uniones de PVC ensambladas a la columna del elutriador A) derrame y B) descarga.**

Sobre las puntas de cada cople de espiga se introdujo cuidadosamente la manguera hasta su base para evitar fugas de agua durante su operación. Esta manguera va desde el derrame de la columna 1 hasta la espiga de la parte inferior de la columna 2 y desde el derrame de la columna 2 hacia el contenedor que almacenara las colas (T) del proceso.

Finalmente, cada columna es sostenida por pinzas de tres dedos y por los soportes universales.

## 2.2 Conexión Sensor de Flujo y del Sistema Arduino

En cada una de las entradas del sensor se colocó un adaptador hembra de cobre para poder conectar las mangueras de alimentación de la llave de agua al sensor, así como la alimentación de agua del sensor a la primera columna del elutriador. Es importante tomar en cuenta la dirección que debe llevar la corriente de agua para que el sensor pueda hacer una correcta lectura. Esta dirección se muestra en la parte trasera del sensor mediante el símbolo de una flecha. En la Figura 17 se observa el sensor utilizado, el cual es un sensor de flujo de agua YF-S201 con un rango de trabajo de 1-30 [L/min].

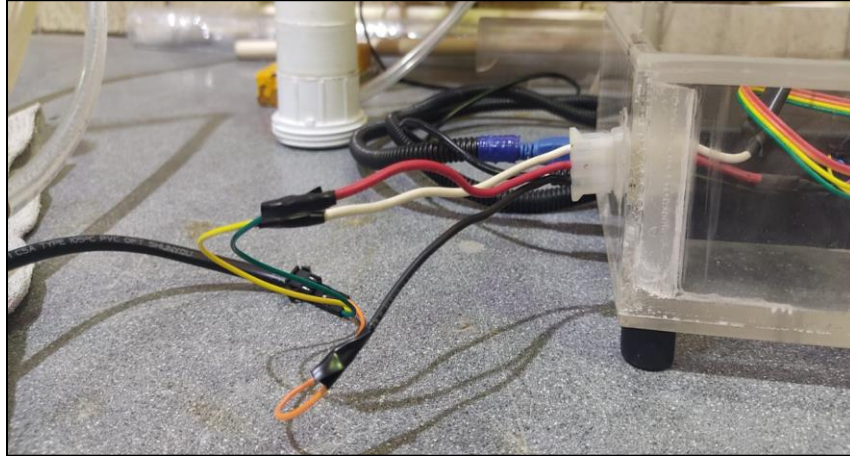


Figura 17. Sensor de flujo de agua YF-S201 con adaptadores hembra en los extremos.

La Tabla 7 muestra las características principales de este modelo.

Tabla 7. Características principales del Sensor de flujo de agua.<sup>[34]</sup>

<i>Característica</i>	
<i>Sensor de flujo</i>	YF-S201
<i>Tipo de sensor</i>	Efecto Hall
<i>Máximo consumo de corriente</i>	15 [mA] a 5 [V]
<i>Voltaje de funcionamiento</i>	5 a 18 Volt Direct Current [VDC]
<i>Trabajo del Caudal</i>	1-30 [LPM]
<i>Temperatura de funcionamiento</i>	-25 a 80 [°C]
<i>Precisión</i>	± 2%
<i>Longitud del cable</i>	15 [cm]
<i>Pulsos por litro</i>	450



**Figura 18. Conexión del sensor de flujo de agua a la protoboard y placa Arduino.**

En la Figura 18 se observan los cables de conexión del sensor al sistema Arduino. Cada uno de los cables se conecta con su correspondiente en la protoboard y la placa Arduino: rojo potencia (5-24 VDC), negro (tierra) y amarillo (salida de impulsos de efecto Hall). Para ello se hace uso de cables jumpers y cinta de aislar. Lo anterior se realiza con el equipo apagado.

La escritura del código se llevó a cabo en el IDE de Arduino, por lo que fue necesario de una computadora y un cable USB para realizar la conexión entre la computadora y la protoboard. Los pasos que seguir son los siguientes:

- Con el equipo apagado, conectar los cables del sensor de flujo de agua a la protoboard. Conectar un extremo del cable USB a la protoboard y el otro extremo conectarlo a la computadora.
- Encender la protoboard de Arduino.
- En la computadora abrir el IDE de Arduino, cargando el código que se debe de ejecutar.
- En la barra de herramientas del IDE de Arduino seleccionar el puerto de conexión de Arduino y en placa elegir Arduino UNO.
- Compilar el programa para evitar errores de ejecución del código.
- Subir el programa a la protoboard.

### **2.3 Calibración del Sensor de Flujo de Agua y del Rotámetro**

Con el código cargado en el IDE de Arduino, se realizó la calibración del sensor de agua para obtener lecturas del flujo en [LPM] para cada porcentaje de flujo indicado en el rotámetro. Una vez armado el elutriador y conectado al sensor y al sistema Arduino se abrió la válvula de alimentación de agua durante un tiempo aproximado de 1 [min]. A lo largo de esta operación se obtuvieron los flujos promedios y los flujos instantáneos. Se determinaron valores promedios para los porcentajes de flujo de agua del 20-80%.

Para determinar el flujo volumétrico correspondiente a los diferentes valores porcentuales del rotámetro empleado, se registraron los tiempos requeridos para aforar una probeta de 1000 [mL].

Finalmente, con la pareja de datos del sistema Arduino y del rotámetro se realizó la construcción de la curva de calibración para medir los flujos de agua a diferentes porcentajes de flujo.

### **2.4 Preclasificación de la Mezcla de Arenas Ferrotitaníferas**

La mezcla de arenas fue proporcionada por el laboratorio de Beneficio de Minerale. Su composición mineral corresponde a magnetita, ilmenita y arena sílice (arena de playa).

De forma visual se analizaron diferentes conjuntos de arenas clasificadas en distintos tamaños de partícula, considerando la tonalidad que presentaban. Tomando en cuenta este criterio se seleccionó el tamaño que mejor se ajustara al intervalo requerido por la Leyes de Stokes y Newton para la concentración gravimétrica por medio de un elutriador.

### **2.5 Operación de los Elutriadores**

Aunque de manera general los parámetros de operación son iguales para ambos elutriadores (velocidad del flujo de agua, mezcla mineral y tamaño de partícula) cada uno tiene particularidades en su manejo y operación, ya sea por la forma en que se alimenta el material sólido o por la cantidad de mineral con la que se puede trabajar.

### **2.5.1 Operación del Elutriador Nuevo (EN)**

La operación del equipo constó de los siguientes pasos:

1.- Pesar aproximadamente 50 [g] de la mezcla de arenas ferrotitaníferas utilizando una báscula digital y se depositarla sobre un vaso de precipitados de 50 [mL] para una fácil manipulación.

2.- Conectar el sistema Arduino al sensor de flujo de agua. Una vez conectado encender el sistema y cargar el código que permite la lectura del caudal.

3.- Colocar la manguera de salida de agua de las colas sobre un recipiente para la recuperación de dichos productos.

4.- Alimentar del sistema. La alimentación sólida se realizó de dos maneras diferentes:

a) Alimentación Directa. Abrir la llave de alimentación de agua y una vez que alcanza aproximadamente la mitad de la altura de la columna del elutriador, verter los 50 [g] de muestra teniendo cuidado de no derramarlo fuera de la columna. Tapar la columna con un corcho e inmediatamente ajustar el flujo de agua.

b) Alimentación con Embudo. Abrir la válvula de alimentación y calibrar hasta alcanzar el valor de flujo de operación deseado. Una vez alcanzado el flujo de trabajo, alimentar los 50 [g] de muestra abriendo el corcho que se encuentra en la parte superior de la primera columna. Si es necesario, utilizar una piseta con agua para provocar un mejor resbale de la mezcla.

5.- Transcurrido el tiempo de concentración de 15 minutos, cerrar la válvula de agua, detener el sistema Arduino y vaciar el agua de las columnas.

6.- Para obtener los concentrados, desenroscar las tapas de ambas columnas y vaciarlas sobre un recipiente debidamente identificado para cada uno de los productos.

7. Filtrar los productos utilizando un equipo de vacío. Identificar cada uno de los productos de acuerdo con el número de prueba, número de concentrado, tamaño

de partícula y porcentaje de flujo correspondiente. Todos los productos se llevan a la estufa para asegurar un secado completo.

8. Pesarse los diferentes productos de concentración obtenidos con el registro de sus masas correspondientes.

10. Finalmente, se tomará una muestra de aproximadamente 1 [g] de cada uno de los productos y se pulverizará para poder analizarlo mediante la técnica de Espectroscopía de Absorción Atómica. Esta prueba se realizó en el laboratorio de análisis químico vía Húmeda del Departamento de Ingeniería Metalúrgica (DIM) de la Facultad de Química de la UNAM.

La Figura 19 muestra el resumen de los pasos generales a seguir en la operación del EN.



**Figura 19. Diagrama de flujo para la concentración gravimétrica por medio del elutriador propuesto.**

\*C1 y C2, concentrado 1 y 2 respectivamente, \*\*T, colas.

### 2.5.2 Operación del Elutriador Actual (EA)

Para la operación del EA, se siguieron los pasos mostrados en la Figura 19. Sin embargo, debido a las complicaciones en el manejo y operación del EA, se realizaron las siguientes modificaciones al paso 4 de dicha Figura:



- Alimentación del sistema. Introducir la alimentación sólida por la parte inferior de la primera columna del elutriador. A través de esta misma entrada, alimentar el flujo de agua.

## Capítulo 3. Resultados y Discusión de Resultados

### 3.1 Diseño del Elutriador, Selección de los Materiales y Ensamblaje de las Piezas

Debido a que la tubería de PVC trabaja con medidas estandarizadas, la selección en las dimensiones de los componentes del elutriador se ve limitado a determinados valores. Además, se deben de tomar en cuenta las dimensiones del EA para poder comparar el funcionamiento de ambos equipos. Por ello, las dimensiones seleccionadas fueron de 2.54 [cm] (1 [in]) para la columna de menor diámetro y de 3.20 [cm] (1 ¼ [in]) para la columna de mayor tamaño.

Los componentes de unión, coples, tapas y demás material mostrado en la Tabla 6, siguen las medidas establecidas según formen parte de la primera o segunda columna. La Figura 20 muestra al EN armado y ensamblado en su totalidad.



Figura 20. Elutriador ensamblado.

La Figura 21 muestra al EA completo y conectado al rotámetro. Pese a que el elutriador actual cuenta con 4 columnas, únicamente se utilizaron las columnas centrales debido a que son las columnas que presentan dimensiones similares a las del nuevo elutriador y con las cuales se puede hacer una comparación directa.



**Figura 21. EA del laboratorio de Beneficio de Minerales.**

Tomando en cuenta las dimensiones establecidas para el EN y considerando el CC de las diferentes especies minerales (anexo A), se calcularon las velocidades terminales a partir de la ley de Stokes. Estos cálculos se muestran en el anexo B, en ellos se observa que el número de columnas necesarias para separar la mezcla de arena en dos concentrados distintos (magnetita e ilmenita) es de 2, a partir de un porcentaje de 60% de fluido.

Los productos obtenidos bajo las diferentes pruebas demuestran que con la construcción del EN es posible obtener concentrados de Fe y de Ti, por lo que el diseño propuesto fue el adecuado. Asimismo, los resultados de los cálculos realizados para la obtención de los productos en base a las dimensiones y al número de columnas del elutriador, permitieron incrementar la concentración de los minerales, como se observa en la Figura 23, en la cual de momento, se puede

confirmar de manera visual el incremento en la concentración. La Figura 22 sirve como referencia visual de la mezcla mineral antes de ser tratada en el EN.



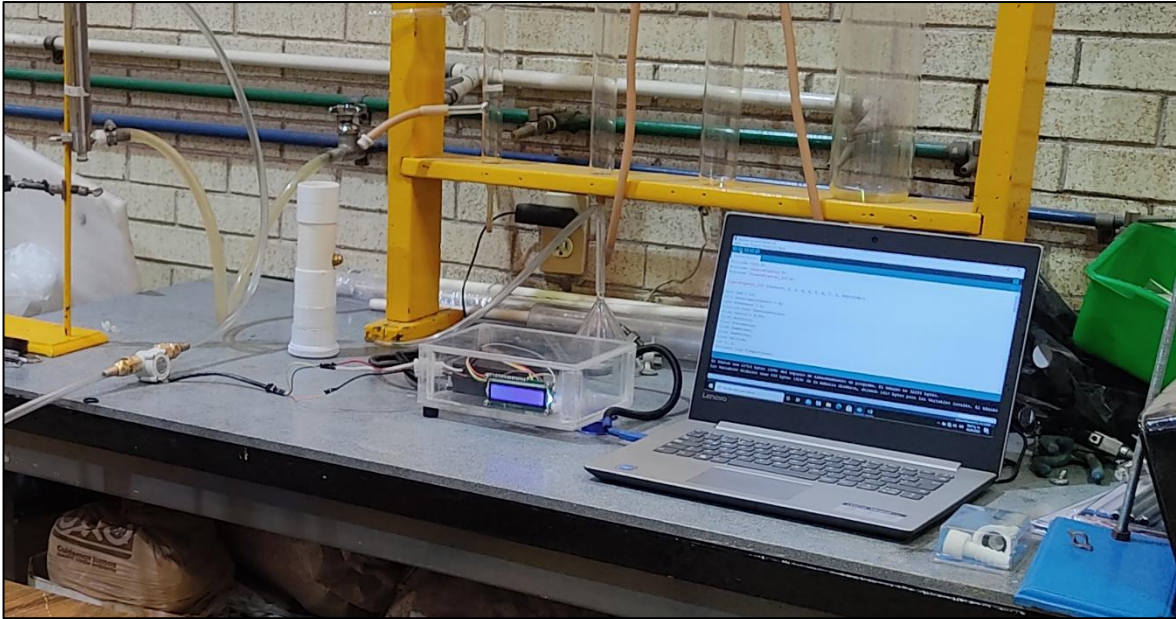
**Figura 22. Cabeza de la mezcla mineral de arenas ferrotitaníferas con tamaño de partícula en número de malla 100.**



**Figura 23. Productos obtenidos al operar el elutriador construido A) C1, B) C2 y C) T2.**

### 3.2 Conexión Sensor de Flujo y del Sistema Arduino

Una vez verificado y cargado el código se realizaron las pruebas. En un inicio el flujo de agua que proyectado en la pantalla LCD es de 0 [L/min]. Al ponerse en operación el elutriador, este valor cambia y se mantiene constante según sea el flujo de agua con el que se trabaje. En la Figura 24 se muestra el sistema sensor-Arduino-computadora armado y equipado con una pantalla LCD.



**Figura 24. Sistema sensor-Arduino-computadora. Mediante la pantalla LCD se muestra la lectura del flujo de agua a lo largo de la operación del elutriador.**

La incorporación de este sistema permite tener un mejor control del flujo de agua debido a que en todo momento de la operación se tiene conocimiento de este valor gracias a los cálculos que realiza el sistema Arduino. Basta únicamente con manipular la válvula de agua para ajustar el flujo necesario para las condiciones particulares de trabajo.

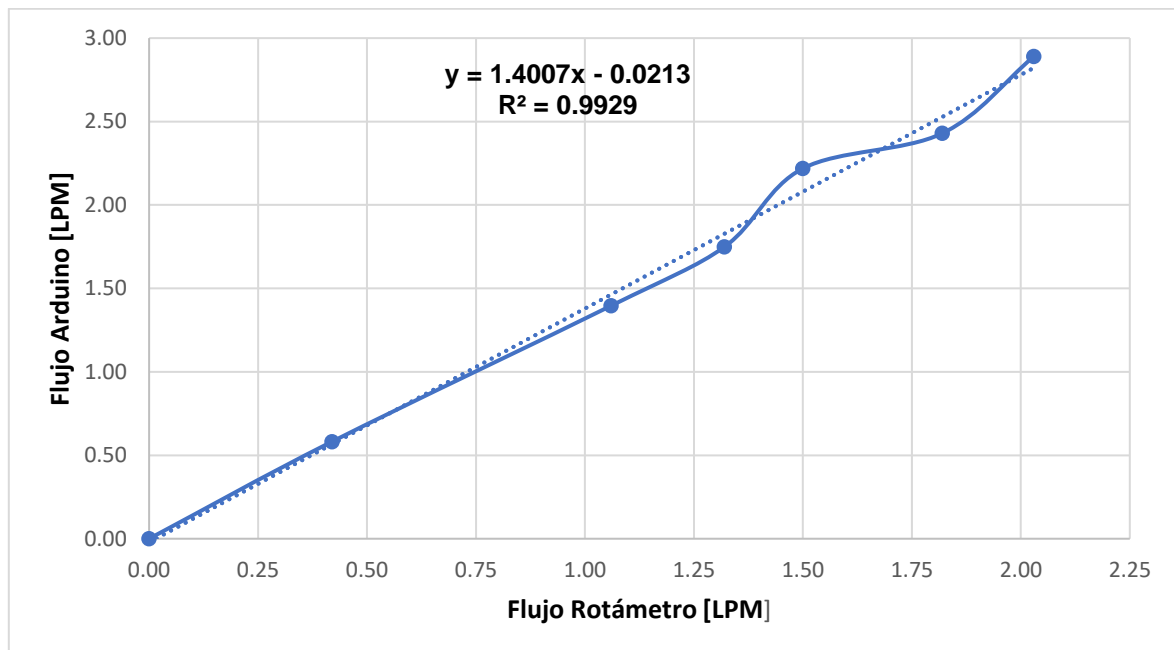
Este sistema es un añadido tecnológico que además permite optimizar el tiempo requerido para realizar pruebas de concentración.

### 3.3 Calibración del Sensor de Flujo de Agua y del Rotámetro

Para tener resultados confiables sobre el flujo de trabajo, primeramente se calibró el sensor de flujo de agua. En el anexo D se muestran los datos obtenidos en el rotámetro para obtener el flujo de agua en [LPM]. En el caso del sistema Arduino, este valor se calculó al ejecutar el código. La Tabla 8 muestra los valores obtenidos tanto del rotámetro como del sensor.

**Tabla 8. Flujos en [LPM] del rotámetro y del sensor de flujo de agua para su calibración.**

Rotámetro [LPM]	Arduino [LPM]
0.00	0.00
0.42	0.58
1.06	1.40
1.32	1.75
1.50	2.22
1.82	2.43
2.03	2.89



**Figura 25. Curva de calibración del sensor de flujo de agua.**

Mediante una regresión lineal se obtiene la ecuación para para medir el caudal de agua que ingresa al elutriador. Esta ecuación se muestra en la Figura 25, la cual se describe como:

$$y = 1.4007x - 0.0213 \quad Ec. 21$$

donde:

y = flujo del sistema Arduino [LPM]

x = flujo del rotámetro [LPM]

De esta manera los flujos de trabajo a 60%, 70% y 80% corresponden a 2.08 [LPM], 2.53 [LPM] y 2.82 [LPM] respectivamente.

Esta calibración es importante ya que el flujo de agua que ingresa al sistema es un parámetro que afecta la concentración que se puede llegar a obtener de los minerales. Al implementarse el sistema Arduino, este valor se proyecta en la pantalla LCD en todo momento del proceso, siendo más fácil su control y visualización.

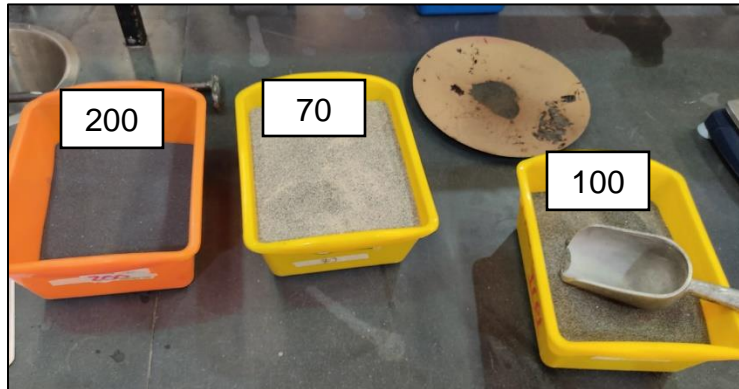
Trabajar con el rotámetro implica una serie de pasos para poder determinar el valor del flujo de agua con cada cambio en la velocidad del fluido, siendo menos eficiente que el sensor de efecto Hall, el cual puede determinar este valor de manera instantánea gracias al código de programación implementado por medio del sistema Arduino que permite calcular el valor de flujo de agua en [LPM]. Puesto que se pretende que este equipo sea utilizado en las sesiones de laboratorio en las cuales es importante optimizar los tiempos de trabajo, la implementación de este sistema significa un ahorro en los tiempos de operación.

#### **3.4 Preclasificación de la Mezcla de Arenas Ferrotitaníferas**

Para operar los elutriadores es importante trabajar con un tamaño de partícula en específico. Esto permite tener un mejor control en la operación de los elutriadores y mayores eficiencias, evitando problemas como la pérdida de material por exceso de finos.

La tonalidad de las mezclas de arena ferrotitaníferas indican de forma cualitativa una menor o mayor concentración de los minerales de Fe y Ti, así, las arenas con

una tonalidad más clara tienen una menor presencia de estos minerales y una mayor cantidad de sílice. Estas arenas, a medida que aumentan en tamaño de partícula disminuyen en su concentración Fe y Ti. Por el contrario, conforme su tamaño de partícula es menor, su tonalidad se vuelve más oscura y su concentración de Fe y Ti incrementa. La Figura 26 muestra las mezclas de arena preseleccionadas para la realización de las pruebas de concentración.



**Figura 26. Mezclas de arenas ferrotitaníferas proporcionadas por el laboratorio de beneficio de minerales.**

#### **3.4.1 Determinación del Tamaño de Partícula Seleccionado**

Con los flujos suministrados por las llaves de agua del laboratorio de Beneficio de Minerales (lugar donde se realizaron las pruebas y ubicación final que tendrá este equipo), no es posible concentrar minerales que cumplen “idealmente” con el tamaño de partícula requerido para la ley de Stokes ya que como se muestra en el anexo C, los flujos de agua con los que se puede trabajar dentro del laboratorio no permiten que haya una concentración de los minerales con tamaño de partícula de 74 [ $\mu\text{m}$ ] (número de malla 200). Se necesitarían de cuatro o más columnas para poder llegar a concentrar el mineral, incrementando así el costo del equipo. Al trabajar con este tamaño de partícula en el EA, la mayor parte del mineral es arrastrado hacia el final del elutriador, recuperándose en las colas. Además, como se puede apreciar en la Figura 26, a un tamaño de partícula en número de malla 200 hay una gran cantidad de material concentrado, por lo que seguir concentrando esta mezcla por medio del EN sería poco eficiente y costoso.



Por otro lado, trabajar con minerales que cumplen “idealmente” con el tamaño de partícula requerida por la ley de Newton (por ejemplo, mezclas de partículas en número de malla menor a 70), por la forma en la que se debe de alimentar el EA, no es posible introducir las partículas en este dispositivo y, por tanto, no se puede tener una comparación del EA con el EN.

En consecuencia, se determinó trabajar con un tamaño de partícula que no necesitara de la incorporación de más de dos columnas, que permitiera comparar la efectividad de ambos elutriadores y en el que se tuviera una concentración significativa de los minerales. Por ello, se seleccionó el tamaño de partícula en malla 100 [150  $\mu\text{m}$ ], que de acuerdo con los cálculos del anexo B y a la Figura 9, aplicando la ley de Stokes existe cercanía con el valor real de la velocidad terminal que presentan las partículas de este tamaño y requiere de dos columnas para su concentración.

Con los flujos de trabajo establecidos y con el tamaño de partícula seleccionado, se determinaron las condiciones de operación de cada elutriador, como se muestra en la Tabla 9.

**Tabla 9. Condiciones experimentales para la operación de cada elutriador.**

<b>Característica</b>	<b>EN</b>	<b>EA</b>
<b>Tamaño de Partícula [<math>\mu\text{m}</math>]</b>	150	150
<b>Flujos de Trabajo [LPM]</b>	2.08 2.53 2.82	2.08 2.53 2.82
<b>Cantidad de Muestra [g]</b>	50 50 50	15 20 20
<b>Forma de alimentación del elutriador</b>	Directa Con embudo	Parte inferior
<b>Tiempo de operación [min]</b>	15	15

### **3.5 Resultados de la Operación de los Elutriadores**

A través del análisis químico se determinó el porcentaje de ley de Fe y de Ti para ambos elutriadores bajo los flujos de 2.08 [LPM] (60%), 2.53 [LPM] (70%), y 2.82 [LPM] (80%), que son los flujos en los cuales además de existir una separación de

la arena de playa con los minerales, se presenta también la separación de la magnetita de la ilmenita (anexo B). El tamaño de partícula se mantuvo en un número de malla 100.

También se analizó el porcentaje de ley de estos elementos en las cabezas de alimentación antes de realizar el proceso de elutriación. Su composición se muestra en la Tabla 10.

**Tabla 10. Composición química de la cabeza de la mezcla de arena ferrotitanífera.**

Número de malla	Producto	%Ley Ti	%Ley Fe
100	Cabeza	1.183	10.96

Conociendo el porcentaje de ley que presenta cada uno de los productos se realizó el balance metalúrgico. Las ecuaciones utilizadas para realizar el balance metalúrgico se presentan en el anexo E.

Tanto para el EN como para el EA el número de columnas empleadas para concentrar es de dos. En la primera columna de ambos equipos se obtiene un C1 y T1. Este T1 es la alimentación (F) que ingresa a las columnas 2, que a su vez producen un C2 y un T2. A partir datos obtenidos de las Tablas 11-19, que considera estos cuatro productos (C1, T1, C2 y T2), se generaron las siguientes Figuras 27-38 que muestran el comportamiento de las leyes de Fe y Ti, los porcentajes de recuperación y la forma en que se alimenta el equipo.

Los datos generados por medio del balance se muestran de la Tabla 11 a la Tabla 13 para el uso del EA, y de la Tabla 14 a la Tabla 19 para el uso del EN alimentando de manera directa (END) y por medio de un embudo (ENE).

**Tabla 11. Balance metalúrgico en el EA para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.08 [LPM].**

Producto	Masa [g]	%Peso	%Ley Fe	%Ley Ti	CM Fe [g]	CM Ti [g]	% Rec Fe	% Rec Ti
C1	0.214	1.495	45.780	6.370	0.098	0.014	4.419	2.863
C2	13.400	93.582	15.700	3.400	2.104	0.456	94.900	95.672
T2	0.705	4.924	2.140	0.990	0.015	0.007	0.681	1.466
<b>Feed</b>	<b>14.319</b>	<b>100.000</b>	<b>10.960</b>	<b>1.183</b>	<b>2.217</b>	<b>0.476</b>	<b>100.000</b>	<b>100.000</b>
T1	14.105	98.505	15.022	3.280	2.119	0.463	95.581	97.137

**Tabla 12. Balance metalúrgico en el EA para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.53 [LPM].**

Producto	Masa [g]	%Peso	%Ley Fe	%Ley Ti	CM Fe [g]	CM Ti [g]	% Rec Fe	% Rec Ti
C1	0.033	0.165	<LIM DET	<LIM DET	0.000	0.000	0.000	0.000
C2	16.300	81.366	14.680	2.560	2.393	0.417	95.822	93.454
T2	3.700	18.470	2.820	0.790	0.104	0.029	4.178	6.546
<b>Feed</b>	<b>20.033</b>	<b>100.000</b>	<b>10.960</b>	<b>1.183</b>	<b>2.497</b>	<b>0.447</b>	<b>100.000</b>	<b>100.000</b>
T1	20.000	99.835	12.486	2.233	2.497	0.447	100.000	100.000

**Tabla 13. Balance metalúrgico en el EA para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.82 [LPM].**

Producto	Masa [g]	%Peso	%Ley Fe	%Ley Ti	CM Fe [g]	CM Ti [g]	% Rec Fe	% Rec Ti
C1	0.012	0.061	<LIM DET	<LIM DET	0.000	0.000	0.000	0.000
C2	11.000	55.522	21.120	3.820	2.323	0.420	82.915	85.497
T2	8.800	44.418	5.440	0.810	0.479	0.071	17.085	14.503
<b>Feed</b>	<b>19.812</b>	<b>100.000</b>	<b>10.960</b>	<b>1.183</b>	<b>2.802</b>	<b>0.491</b>	<b>100.000</b>	<b>100.000</b>
T1	19.800	99.939	14.151	2.482	2.802	0.491	100.000	100.000

**Tabla 14. Balance metalúrgico en el EN para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.08 [LPM] vertiendo directamente la alimentación sólida.**

Producto	Masa [g]	%Peso	%Ley Fe	%Ley Ti	CM Fe [g]	CM Ti [g]	% Rec Fe	% Rec Ti
C1	19.800	39.960	26.650	5.756	5.277	1.140	69.973	68.533
C2	28.850	58.224	7.709	1.770	2.224	0.511	29.491	30.698
T2	0.900	1.816	4.498	1.421	0.040	0.013	0.537	0.769
<b>Feed</b>	<b>49.550</b>	<b>100.000</b>	<b>10.960</b>	<b>1.183</b>	<b>7.541</b>	<b>1.663</b>	<b>100.000</b>	<b>100.000</b>
T1	29.750	60.040	7.611	1.759	2.264	0.523	30.027	31.467

**Tabla 15. Balance metalúrgico en el EN para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.53 [LPM] vertiendo directamente la alimentación sólida.**

Producto	Masa [g]	%Peso	%Ley Fe	%Ley Ti	CM Fe [g]	CM Ti [g]	% Rec Fe	% Rec Ti
C1	9.100	18.236	32.870	0.690	2.991	0.063	46.997	2.518
C2	39.400	78.958	8.422	6.094	3.318	2.401	52.133	96.335
T2	1.400	2.806	3.958	2.042	0.055	0.029	0.871	1.147
<b>Feed</b>	<b>49.900</b>	<b>100.000</b>	<b>10.960</b>	<b>1.183</b>	<b>6.365</b>	<b>2.492</b>	<b>100.000</b>	<b>100.000</b>
T1	40.800	81.764	8.268	5.954	3.373	2.429	53.003	97.482

**Tabla 16. Balance metalúrgico en el EN para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.82 [LPM] vertiendo directamente la alimentación sólida.**

Producto	Masa [g]	%Peso	%Ley Fe	%Ley Ti	CM Fe [g]	CM Ti [g]	% Rec Fe	% Rec Ti
C1	2.950	5.954	40.325	0.970	1.190	0.029	16.909	1.407
C2	43.450	87.689	13.045	4.405	5.668	1.914	80.565	94.095
T2	3.150	6.357	5.643	2.904	0.178	0.091	2.526	4.498
<b>Feed</b>	<b>49.550</b>	<b>100.000</b>	<b>10.960</b>	<b>1.183</b>	<b>7.035</b>	<b>2.034</b>	<b>100.000</b>	<b>100.000</b>
T1	46.600	94.046	12.545	4.303	5.846	2.005	83.091	98.593

**Tabla 17. Balance metalúrgico en el EN para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.08 [LPM] utilizando un embudo para la alimentación sólida.**

Producto	Masa [g]	%Peso	%Ley Fe	%Ley Ti	CM Fe [g]	CM Ti [g]	% Rec Fe	% Rec Ti
C1	19.400	38.569	23.916	3.170	4.640	0.615	66.650	59.446
C2	30.250	60.139	7.659	1.374	2.317	0.416	33.279	40.183
T2	0.650	1.292	0.761	0.590	0.005	0.004	0.071	0.370
<b>Feed</b>	<b>50.300</b>	<b>100.000</b>	<b>10.960</b>	<b>1.183</b>	<b>6.961</b>	<b>1.034</b>	<b>100.000</b>	<b>100.000</b>
T1	30.900	61.431	7.513	1.357	2.322	0.404	33.350	39.643

**Tabla 18. Balance metalúrgico en el EN para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.53 [LPM] utilizando un embudo para la alimentación sólida.**

Producto	Masa [g]	%Peso	%Ley Fe	%Ley Ti	CM Fe [g]	CM Ti [g]	% Rec Fe	% Rec Ti
C1	7.450	15.066	30.732	2.499	2.289	0.186	32.529	17.124
C2	40.200	81.294	11.777	2.217	4.734	0.891	67.263	81.972
T2	1.800	3.640	0.811	0.546	0.015	0.010	0.207	0.904
<b>Feed</b>	<b>49.450</b>	<b>100.000</b>	<b>10.960</b>	<b>1.183</b>	<b>7.038</b>	<b>1.087</b>	<b>100.000</b>	<b>100.000</b>
T1	42.000	84.934	11.307	2.145	4.749	0.901	67.471	82.876

**Tabla 19. Balance metalúrgico en el EN para el tamaño de partícula en malla 100 y flujo de agua de 2.82 [LPM] utilizando un embudo para la alimentación sólida.**

Producto	Masa [g]	%Peso	%Ley Fe	%Ley Ti	CM Fe [g]	CM Ti [g]	% Rec Fe	% Rec Ti
C1	2.850	5.752	34.5925	3.661	0.986	0.104	14.191	10.529
C2	40.300	81.332	14.569	2.089	5.871	0.842	84.511	84.951
T2	6.400	12.916	1.4095	0.7	0.090	0.045	1.298	4.521
<b>Feed</b>	<b>49.550</b>	<b>100.000</b>	<b>10.960</b>	<b>1.183</b>	<b>6.947</b>	<b>0.991</b>	<b>100.000</b>	<b>100.000</b>
T1	46.700	94.248	12.766	1.899	5.962	0.887	85.809	89.471

### 3.5.1 Porcentajes de Ley y de Recuperación de Fe y Ti a un Flujo de Agua de 2.08 [LPM]

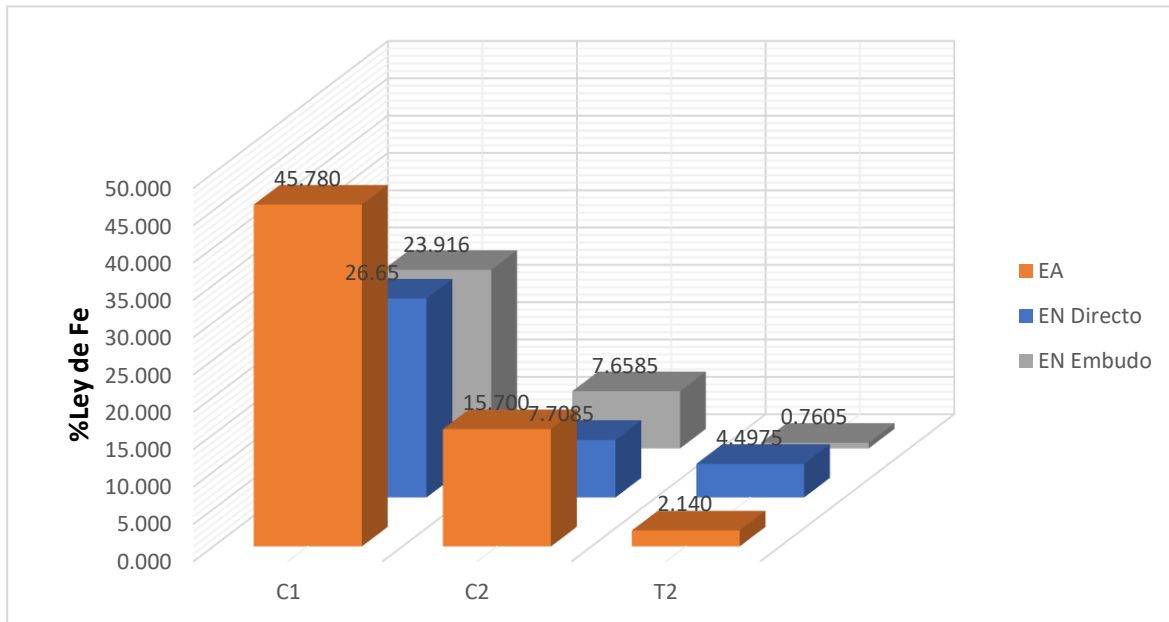


Figura 27. Comparación de los porcentajes de ley de Fe en EA vs EN con un flujo de agua de 2.08 [LPM].

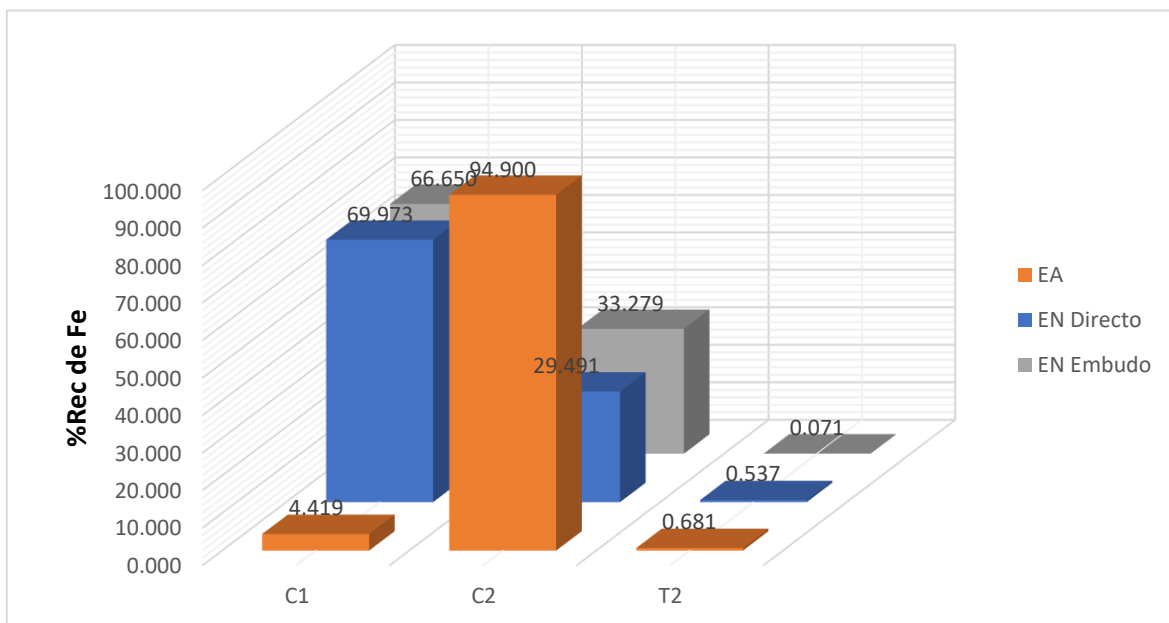
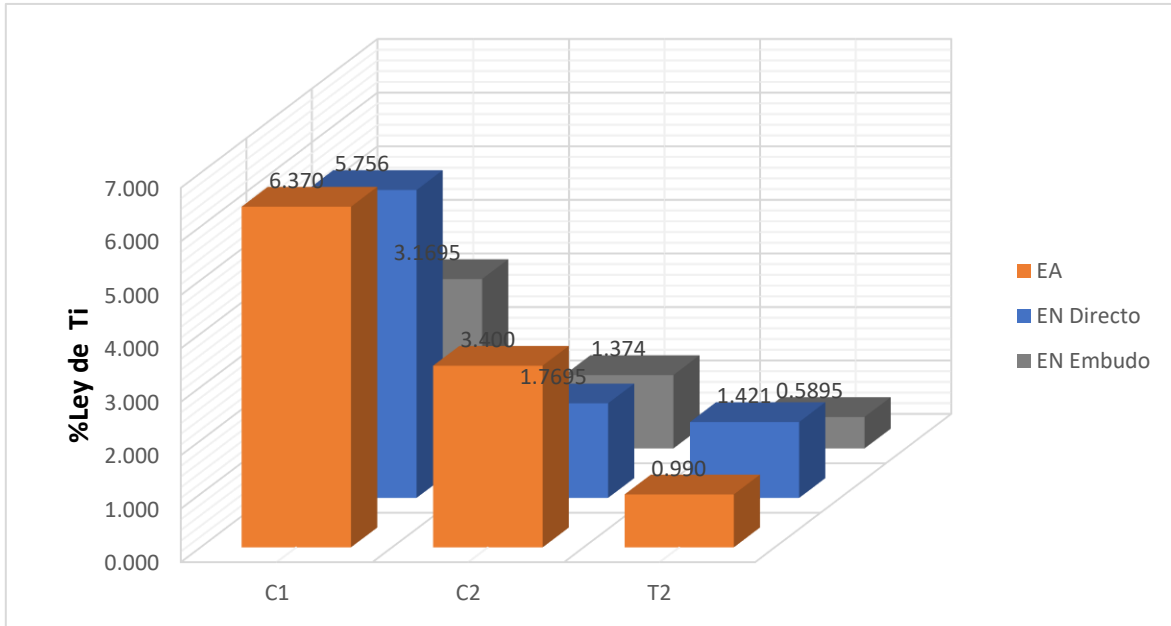


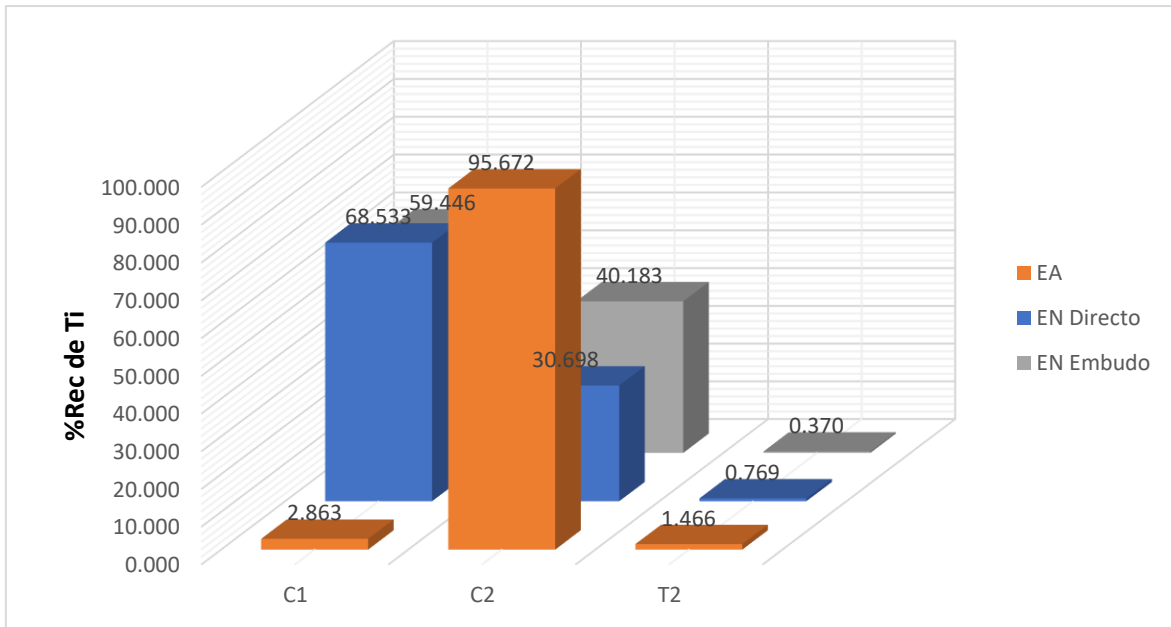
Figura 28. Comparación de los porcentajes de recuperación de Fe en EA vs EN con un flujo de agua de 2.08 [LPM].

La Figura 27 muestra el porcentaje de ley de Fe obtenido por los elutriadores. En ella se puede observar que utilizando el EA se obtiene el mayor porcentaje de ley de Fe, poco más del 45%. Sin embargo, su porcentaje de recuperación es el de menor valor en C1, de casi el 4.5% (Figura 28) . Esto quiere decir que aunque sí se logra incrementar de manera considerable el porcentaje de ley de Fe en C1, la cantidad que se obtiene del mineral es muy poca. Conforme el mineral avanza de una columna a otra, su porcentaje de ley decrece a 15.70% y 2.14% en C2 y T2 respectivamente. No así su porcentaje de recuperación, el cual llega a un valor de casi el 95% en C2 y menor al 1% para T2. Con el comportamiento mostrado, el EA logra recuperar la mayor parte del Fe en C2 con un ligero incremento en su porcentaje de ley, mientras que T2 al presentar valores bajos tanto para el porcentaje de ley como para el porcentaje de recuperación puede considerarse que únicamente presenta trazas del mineral.

Al utilizar el EN los porcentajes de ley de Fe incrementan a valores mayores al 23% en C1, por lo que duplica el porcentaje de ley de Fe que presenta la cabeza del mineral. Además, las recuperaciones que se obtienen en esta misma columna son superiores al 65%, esto indica que el mineral se concentra al mismo tiempo que aumenta la cantidad que se obtiene de este concentrado. Al pasar el mineral a la segunda columna y hasta T2, los porcentajes de ley y de recuperación disminuyen, siendo en T2 los valores más bajos. Por ello, al obtener porcentajes de ley de Fe inferiores a los porcentajes mostrados en la cabeza del mineral, el EN funciona como un elutriador simple ya que únicamente en C1 logra desempeñarse de manera exitosa, esto es, incrementar los porcentajes de ley así como los porcentajes de recuperación.



**Figura 29. Comparación de los porcentajes de ley de Ti en EA vs EN con un flujo de agua de 2.08 [LPM].**



**Figura 30. Comparación de los porcentajes de recuperación de Ti en EA vs EN con un flujo de agua de 2.08 [LPM].**



En el caso de la concentración de Ti mostrado en la Figura 29, se puede observar que por medio del EA el porcentaje de ley que se alcanza en C1 es superior a 6.3%, mayor a los porcentajes obtenidos a través del EN. A pesar de este porcentaje de ley de Ti obtenido, la recuperación que logra alcanzar es menor al 3% (Figura 30), por lo que al igual que en el caso del Fe, su rendimiento llega a ser bastante bajo. Sin embargo, con los valores obtenidos en C2 se puede apreciar que el mineral de Ti se sigue concentrando, debido a que a pesar de que el porcentaje de ley disminuye de C1 a C2, sigue siendo mayor (casi el triple) al porcentaje de ley de Ti que presenta la cabeza. Así mismo, también se ve incrementado su porcentaje de recuperación, de aproximadamente 96%. Con estos resultados, aunados a los mostrados en el caso del Fe, el EA únicamente presenta resultados óptimos utilizando la segunda columna del elutriador.

Con el EN los porcentajes de ley de Ti alcanzan los mayores incrementos en C1, del mismo modo que los porcentajes de recuperación. Esto quiere decir que el producto de mayor concentración es también el que mayormente se recupera, lo cual no ocurre cuando se utiliza el EA. De manera similar al comportamiento mostrado en el caso del Fe con el EN, los incrementos en los porcentajes de ley y de recuperación disminuyen en C2 y en T2.

Según los cálculos mostrados en el anexo B, a un flujo de 2.08 [LPM] (60%) es posible concentrar y separar la mezcla mineral en dos productos: magnetita en C1 e ilmenita en C2. Sin embargo, ninguno de los dos elutriadores logra esta separación debido principalmente a que el valor del CC no es el adecuado para poder separar a dichos productos. Pese a ello, sí se logra concentrar a los minerales.

Para poder afirmar que los elutriadores presentan un desempeño óptimo y eficiente, deben presentar valores en los porcentajes de ley superiores a los que presenta la cabeza de la mezcla mineral. Asimismo, deben presentar porcentajes de recuperación elevados. Con el EA, este comportamiento se presenta en la segunda columna (C2). En cambio, en el EN este comportamiento se obtiene en la primera columna (C1). Por obtener porcentajes de ley más elevados y porcentajes de

recuperación de entre 59% a 69%, el EN logra un mejor desempeño que el mostrado por el EA.

### 3.5.2 Porcentajes de ley y de recuperación de Fe y Ti a un flujo de agua de 2.53 [LPM]

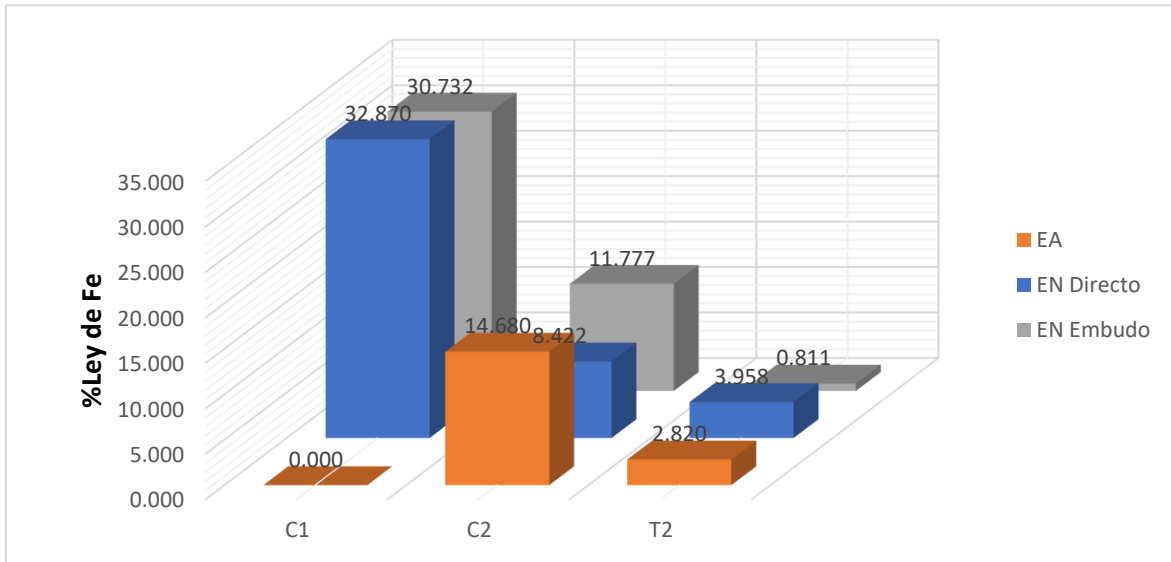


Figura 31. Comparación de los porcentajes de ley de Fe en EA vs EN con un flujo de agua de 2.53 [LPM].

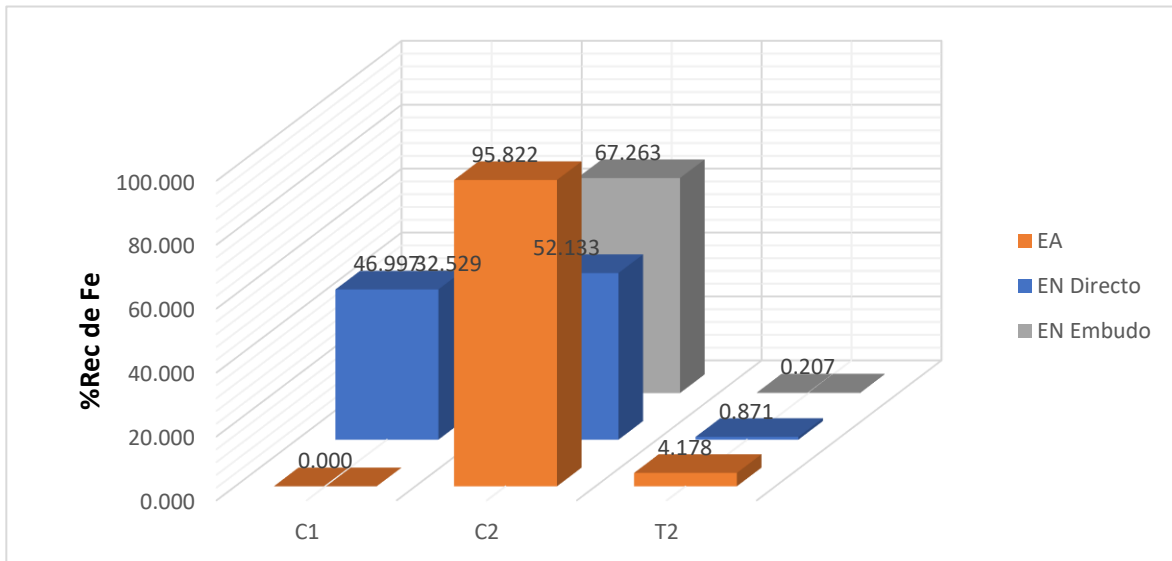


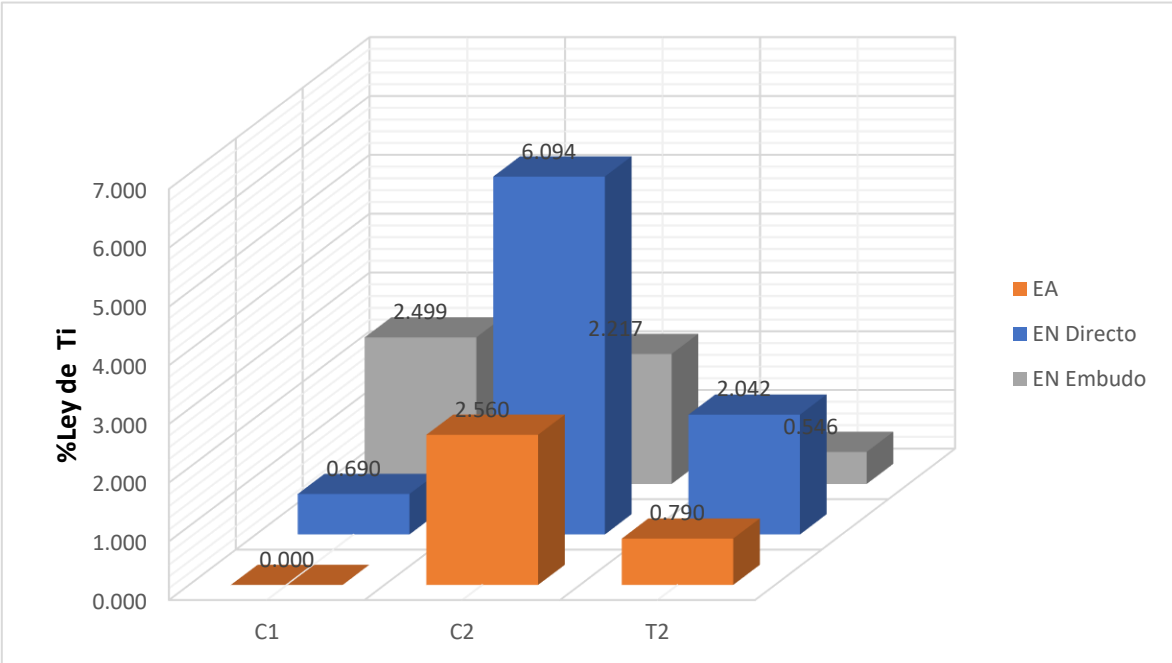
Figura 32. Comparación de los porcentajes de recuperación de Fe en EA vs EN con un flujo de agua de 2.53 [LPM].

En la Figura 31 se muestran los porcentajes de ley de Fe obtenidos a un flujo de agua de 2.53 [LPM]. Debido a que en C1 la cantidad de material recuperado por medio del EA es muy pequeña, el análisis químico da como resultado una cantidad por debajo del Límite de Detección (<LD), por lo que tanto el porcentaje de ley como de recuperación son de 0. Puesto que el flujo de agua presenta una mayor velocidad, al entrar en contacto las partículas minerales con el fluido se genera una mayor turbulencia provocando que las partículas del mineral sean arrastradas hacia la segunda columna del elutriador. Aunado a esto, las dimensiones que presenta este equipo no permiten un recorrido lo suficientemente largo que permita a las partículas alcanzar su velocidad terminal. Por otro lado, el porcentaje de ley que se alcanza en C2 solo es cerca de 2.7% mayor al porcentaje de ley que presenta la cabeza del mineral y observando la Figura 32, el porcentaje de recuperación es de casi 96%. Por su mínimo incremento en el porcentaje de ley de Fe y ser recuperado casi en su totalidad en la segunda columna, se puede afirmar que el EA no está concentrando de manera óptima al mineral de Fe y por lo tanto no presenta un buen desempeño.

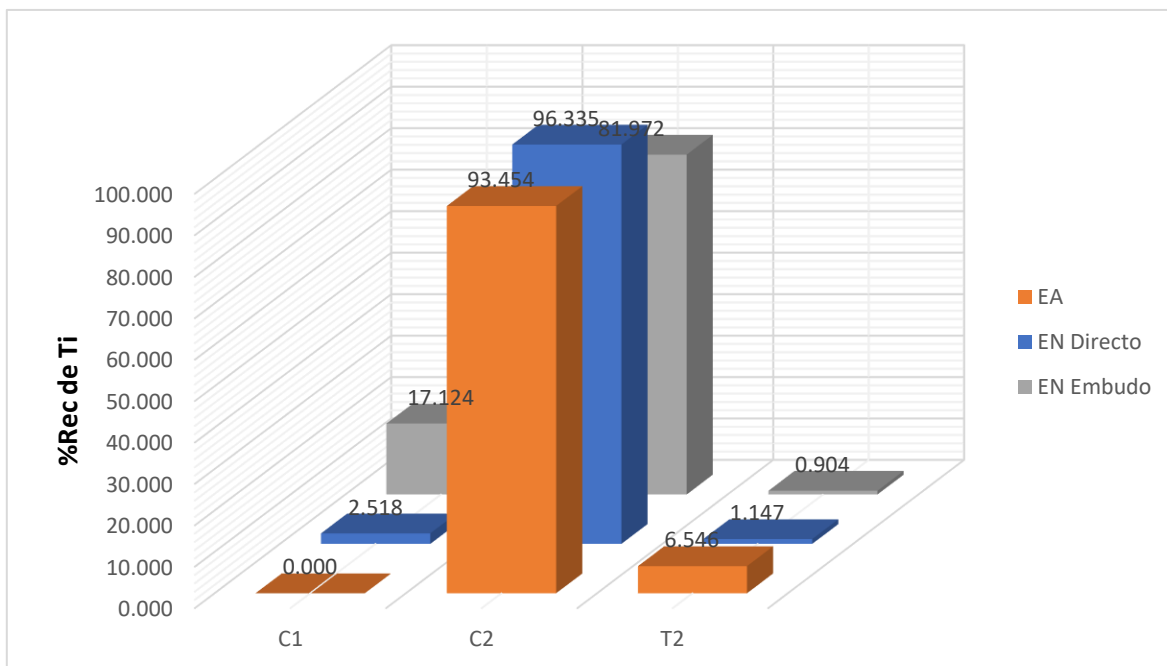
El incremento en la velocidad del flujo de agua tiene un impacto directo en el porcentaje de ley y de recuperación de las partículas minerales. Como se observa en la Figura 31, utilizando el EN los porcentajes de ley de Fe se incrementan en C1 a valores mayores al 30%, lo que representa un valor superior a los porcentajes obtenidos con el flujo de agua anterior (cercanos al 23%) y de casi el triple respecto al porcentaje de ley de Fe que presenta la cabeza del mineral. Por el contrario, el porcentaje de recuperación disminuye y oscila entre valores que van del 32.5% al 47% (Figura 32). Esta disminución se debe a que hay una mayor turbulencia en el fluido lo que genera que las partículas minerales se mezclen y sean desplazadas hacia la segunda columna. Este mismo fenómeno también provoca que los porcentajes de recuperación se incrementen en C2 debido a que hay una mayor cantidad de partículas de Fe en el medio. Sin embargo, no únicamente existen partículas de Fe sino que también se encuentran otras partículas de la mezcla mineral, provocando que los valores obtenidos para los porcentajes de ley de Fe

disminuyan a valores cercanos al valor que presenta la muestra mineral, es decir, no existe una concentración significativa del mineral en esta columna.

A pesar de que en el anexo B los cálculos demuestran que a un flujo de 2.53 [LPM] ambos minerales se pueden concentrar en C2, el comportamiento mostrado por el EN sugiere la separación entre ambos minerales ya que el porcentaje de ley que se obtiene en C1 es mucho mayor al valor que se obtiene en C2, siendo la magnetita el producto mineral correspondiente a C1 debido a que presenta una mayor densidad y por tanto, logra una velocidad terminal mayor a la velocidad del flujo de agua.



**Figura 33. Comparación de los porcentajes de ley de Ti en EA vs EN con un flujo de agua de 2.53 [LPM].**



**Figura 34. Comparación de los porcentajes de recuperación de Ti en EA vs EN con un flujo de agua de 2.53 [LPM].**

En referencia a los porcentajes de ley de Ti, la Figura 33 muestra los valores obtenidos por ambos elutriadores. El comportamiento del EA en C1 es el mismo que el mostrado en la Figura 31: valores de 0 en porcentajes de ley y de recuperación como resultado de una cantidad <LD del análisis químico. La concentración de Ti se logra hasta C2 donde alcanza un valor de 2.56% y cuya recuperación es poco más del 93% (Figura 34). Por ello, la tendencia de este elutriador sigue siendo la de no concentrar a los minerales sino hasta la segunda columna sin lograr una separación entre ellos.

A diferencia del EA, utilizando el EN se obtienen mejores resultados en ambas formas de alimentación del sistema. Cuando se alimenta al equipo por medio del embudo, la concentración de Ti es muy similar tanto en C1 como en C2 (concentraciones mayores al 2.2%), siendo este incremento de casi el doble respecto a la ley del mineral que presenta la cabeza. Cuando el elutriador es alimentado directamente, el porcentaje de ley de Ti en C1 es menor al 1%, mientras que el producto concentrado de Ti en C2 es de casi 6 veces mayor a ley mineral de Ti presente en la cabeza de la mezcla mineral. Al comparar la Figura 31 (ley de Fe) con la Figura 33 (ley de Ti), la concentración de Fe es mayor en C1 y disminuye

paulatinamente hasta llegar a T2. En contraste, la concentración de Ti obtiene el mínimo valor en C1, alcanza su valor máximo en C2 para finalmente disminuir en T2. Este comportamiento se debe a la diferencia de densidades que presentan las partículas en la mezcla mineral. La magnetita es el mineral de mayor densidad dentro de la mezcla, por lo tanto es la especie que alcanza la mayor velocidad terminal. Esta velocidad le permite sumergirse y concentrarse en la primera columna del equipo. En contraparte, al no alcanzar una velocidad terminal mayor a la velocidad del flujo de agua, la arena sílice y la ilmenita son arrastradas hacia la segunda columna del elutriador.

Con cada cambio de columna la velocidad del flujo de agua disminuye, por lo que ahora la velocidad terminal de la ilmenita es superior a la velocidad del flujo de agua, permitiéndole hundirse y concentrarse en la descarga de la segunda columna, incrementando así los porcentajes de ley de Ti en C2. Sin embargo, el Fe se sigue concentrando en esta columna. Esto se debe a que la ilmenita cuenta con una parte férrica, por lo que la mayor parte del Fe que se concentra en este producto corresponde principalmente a este mineral.

En base a los porcentajes de ley y de recuperación de Fe y Ti obtenidos mediante el uso del EN, es posible afirmar que el EN muestra un mejor desempeño al presentado por el EA, ya que además de concentrar y presentar cierto grado de separación de los productos (magnetita en C1 e ilmenita en C2), permite estudiar la influencia que tienen algunos parámetros en el nivel de concentración y recuperación de los productos minerales, como lo es la velocidad del flujo de agua, la cual, mediante el uso del EN, permite el incremento en los porcentajes de ley del mineral a medida que aumenta la velocidad del fluido.

### 3.5.3 Porcentajes de Ley y de Recuperación de Fe y Ti a un Flujo de Agua de 2.83 [LPM]

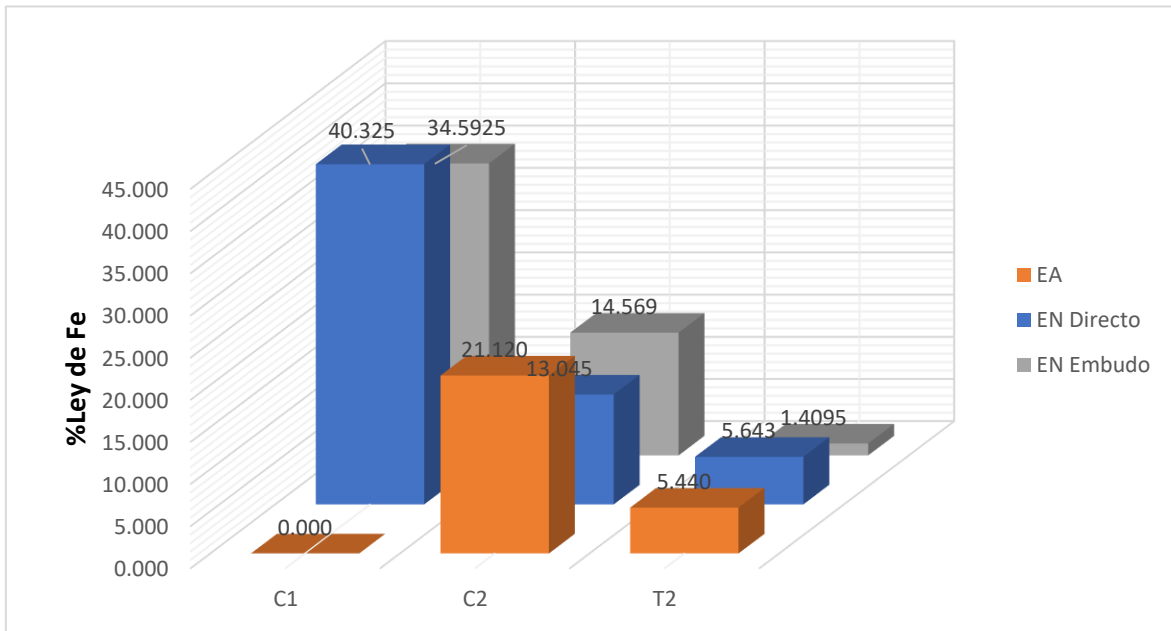


Figura 35. Comparación de los porcentajes de ley de Fe en EA vs EN con un flujo de agua de 2.82 [LPM].

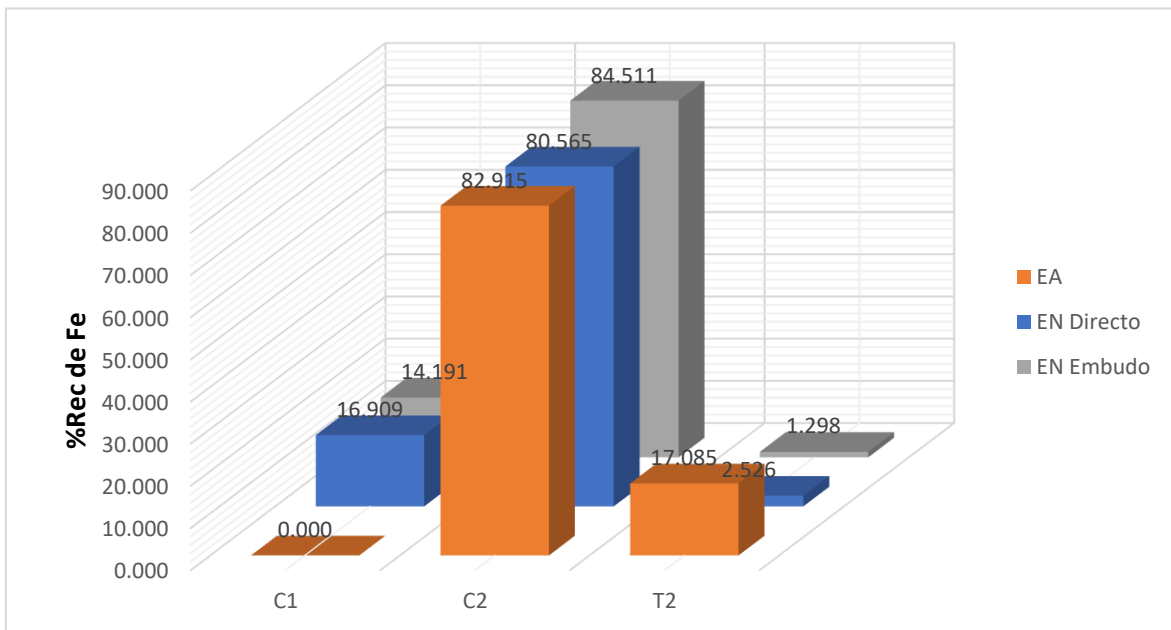


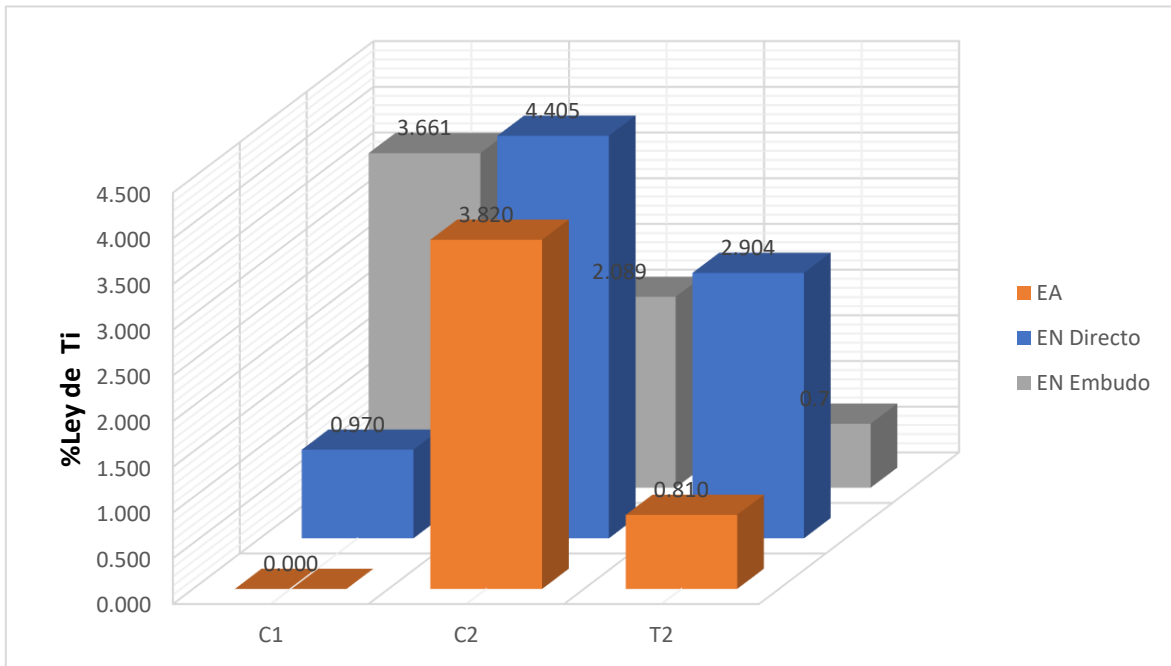
Figura 36. Comparación de los porcentajes de recuperación de Fe en EA vs EN con un flujo de agua de 2.82 [LPM].

Los porcentajes de ley y de recuperación de Fe bajo un flujo de trabajo de 2.82 [LPM] se observan en las Figuras 35 y 36, respectivamente. La tendencia de valores de 0 continua para los productos de C1 cuando se utiliza el EA. Sin embargo, este es el único flujo de trabajo en el cual el EA alcanza una concentración mayor al 20% en ley de Fe, con un porcentaje de recuperación de casi 83%. Estos resultados se obtienen en C2, y sin duda pueden ser considerados como un desempeño óptimo. El incremento en los valores obtenidos en C2 se debe al incremento en la velocidad del flujo de agua, la cual arrastra a las partículas más ligeras (menos densas) hacia las colas, permitiendo que en la segunda columna se obtenga un producto con una mejor concentración.

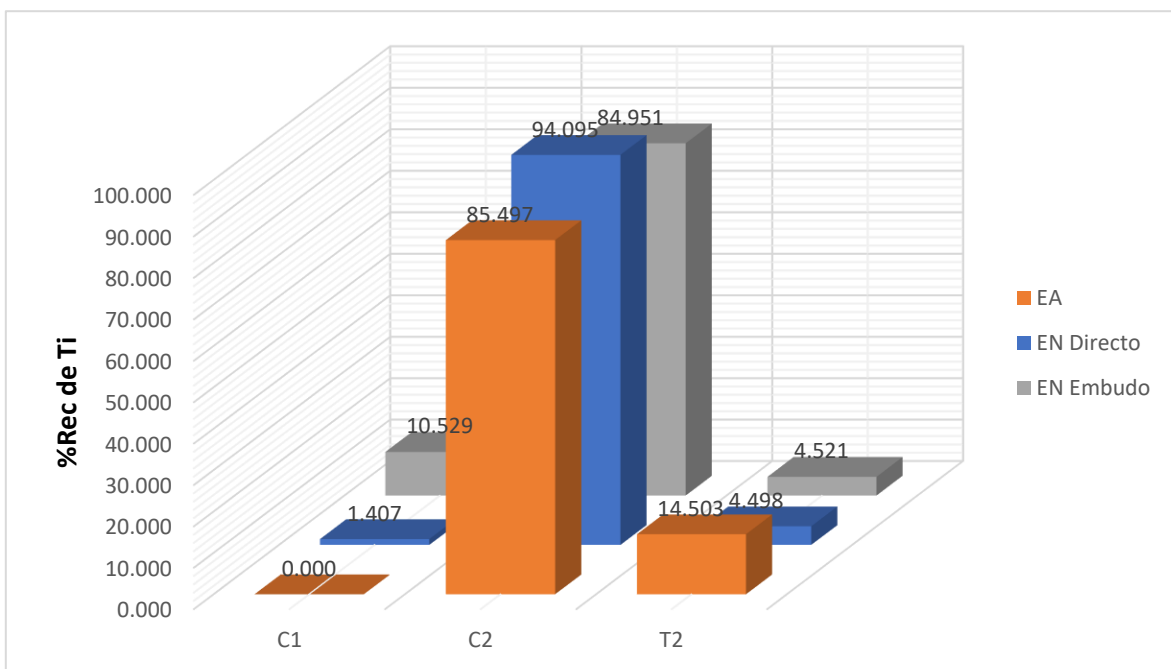
El EN también se ve beneficiado con el incremento en la velocidad del flujo de agua, debido a que bajo este flujo de trabajo el equipo alcanza los mayores porcentajes en la concentración de Fe. Con cada incremento en la velocidad del flujo de agua aumenta la diferencia entre las velocidades terminales de las partículas de arena sílice e ilmenita con la velocidad del agua. En consecuencia, es más fácil para el agua arrastrar a estas partículas que arrastrar a las partículas de magnetita, cuya densidad y velocidad terminal son mayores. No obstante, la diferencia de velocidad entre la magnetita y el agua se estrecha con este incremento, lo cual aunado a una mayor turbulencia, provoca que algunas partículas de magnetita sean arrastradas hacia la segunda columna y hacia las colas, disminuyendo el porcentaje de recuperación en C1 (Figura 36).

Los resultados obtenidos por el EN difieren con los cálculos determinados en la Tabla 32 del anexo B, en donde a un flujo de agua de 2.82 [LPM] no se presentaría concentración alguna en la primera columna del elutriador. En contraste, los resultados experimentales demuestran que es bajo este flujo de agua en el cual se obtienen los mejores porcentajes de ley de Fe.





**Figura 37. Comparación de los porcentajes de ley de Ti en EA vs EN con un flujo de agua de 2.82 [LPM].**



**Figura 38. Comparación de los porcentajes de recuperación de Ti en EA vs EN con un flujo de agua de 2.82 [LPM].**

Al utilizar el EA, los resultados obtenidos en C1 siguen el mismo patrón que las pruebas anteriores (valores de 0). De forma similar al caso del Fe, bajo un flujo de trabajo de 2.82 [LPM] este equipo alcanza en C2 un valor de 3.82% de ley de Ti (Figura 37), con una recuperación mayor al 85% (Figura 38). Con estos resultados es posible afirmar que estas son las condiciones ideales en las cuales el EA puede presentar un buen desempeño.

Puesto que Fe y Ti se concentran en la segunda columna de este elutriador, no existe una separación entre ambos minerales. Al no contar con una mayor altura, la turbulencia del fluido no permite que las partículas minerales se separen durante su recorrido a lo largo de la primera columna, llegando casi la totalidad de la mezcla a la segunda columna. Con el cambio de columna, la velocidad del fluido disminuye así como su turbidez, lo que permite que ambas especies minerales se sumerjan y se concentren en la descarga.

El EN presenta dos comportamientos diferentes en la concentración de Ti. Cuando las partículas se alimentan al sistema por medio de un embudo, los porcentajes de ley disminuyen de forma gradual desde C1 hasta T2. El embudo está conectado a un manguera que tiene la finalidad de introducir el mineral a un nivel más cercano a la alimentación del fluido. La inmersión de la manguera dentro del fluido genera una mayor turbulencia e impide que las partículas logren avanzar hacia la segunda columna, concentrándose principalmente en la primera columna del elutriador. Por el contrario, alimentando de forma directa el mineral la mayor concentración se obtiene en C2, cuyo valor es el cuádruple del valor de Ti que contiene la cabeza mineral. Al no presentar ningún impedimento en el movimiento de las partículas, estas son arrastradas de forma libre hacia la segunda columna. Con la disminución en la velocidad del flujo de agua que se presenta por el cambio de columna, la ilmenita se puede concentrar en mayor cantidad que la concentrada en la primera columna.

El desempeño mostrado por el EA es mejor a los resultados que se obtienen en las pruebas a menores flujos de trabajo, aunque siguen siendo inferiores a los conseguidos por el EN. Si bien ambos elutriadores muestran un desempeño óptimo bajo un flujo de trabajo de 2.83 [LPM], es el EN el equipo que además de obtener mejores concentraciones y recuperaciones tanto de Fe como de Ti, permite obtener productos diferentes siendo la magnetita el principal producto en C1 y la ilmenita el producto principal de C2, brindándole una ventaja adicional. En cambio el EA, concentra ambos productos en C2 (con menores valores que el EN).

En términos generales, trabajar con el EN permite obtener valores de ley y de recuperación más elevados, estudiar diferentes parámetros involucrados en el proceso y logra la separación de la mezcla mineral en diferentes productos, por lo que su implementación en laboratorio se recomienda ampliamente. Cabe señalar que el EN sirve como un proceso de preconcentración de minerales, mediante el cual se eleva la ley del mineral a la vez que se ahorra el uso de reactivos y energía, reduciendo de esta forma tanto gastos operativos así como el impacto al medio ambiente, optimizando de esta manera el proceso de concentración.

### **3.6 Comparación Entre Ambos Elutriadores**

Con los resultados obtenidos, es en el EN el equipo mediante el cual se logran apreciar comportamientos que requieren de un mayor análisis. Por un lado, está la influencia que genera el incremento en la velocidad del flujo de agua sobre los productos concentrados, tanto en los porcentajes de ley como de recuperación. Relacionado a este comportamiento, está la separación de los productos minerales, que de igual forma se alcanza a través del dispositivo construido.

#### **3.6.1 Velocidad del Flujo de Agua vs Porcentaje de Ley y de Recuperación**

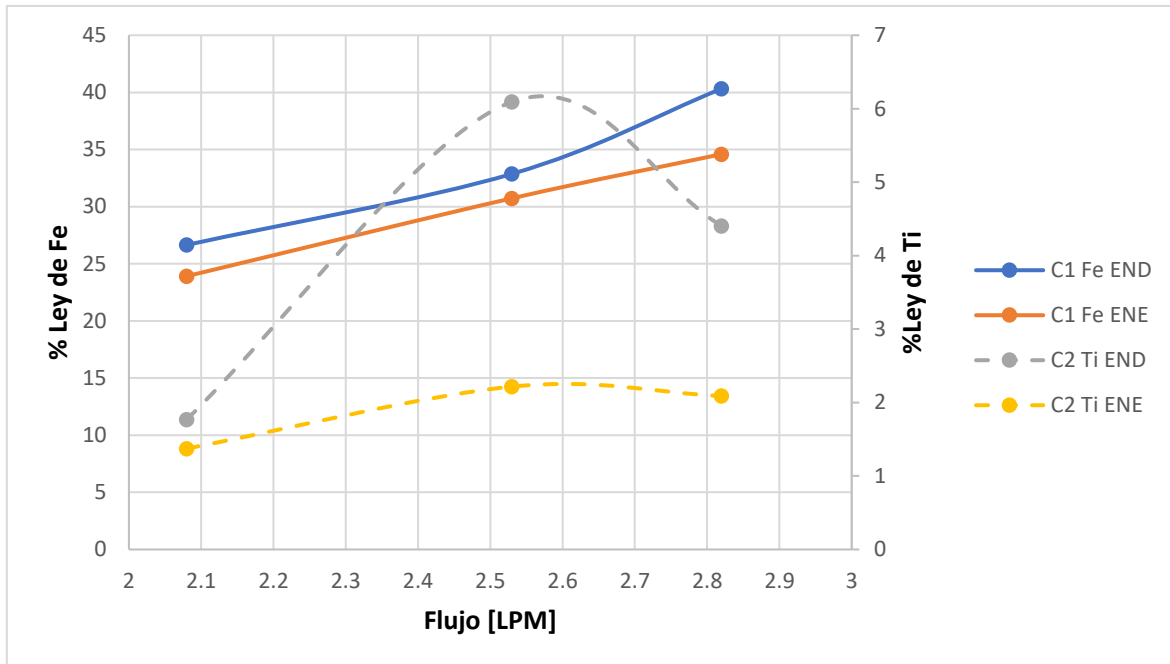
A lo largo de las pruebas realizadas, fue posible identificar un comportamiento relacionado con el incremento en la velocidad del flujo de agua. Si bien los cálculos mostrados en el anexo B permiten determinar bajo que flujos de trabajo se puede llegar a concentrar a los minerales, no indican de qué forma afecta el incremento de dichos flujos. Con los resultados obtenidos en los apartados 3.5.1, 3.5.2 y 3.5.3, se

logra reconocer un patrón que vincula el flujo de agua con la concentración de los minerales: “A mayor flujo de agua, mayor concentración del mineral”.

Dentro de la mezcla mineral, la magnetita es la especie de mayor densidad. De acuerdo con la ley de Stokes (ecuación 14), su velocidad terminal también es la de mayor valor. Debido a que la velocidad del agua es menor a esta velocidad terminal, la tendencia que muestra la magnetita es a concentrarse mayormente en la primera columna. Sin embargo, la velocidad del agua es superior a las velocidades terminales de la ilmenita y de la arena sílice y se incrementa con cada aumento en la velocidad del fluido, por lo que el producto obtenido en C1 se va limpiando de partículas de ilmenita y arena sílice, y se concentra de partículas de magnetita. Por ello, los concentrados de C1 presentan un incremento en la ley de Fe y una baja ley de Ti.

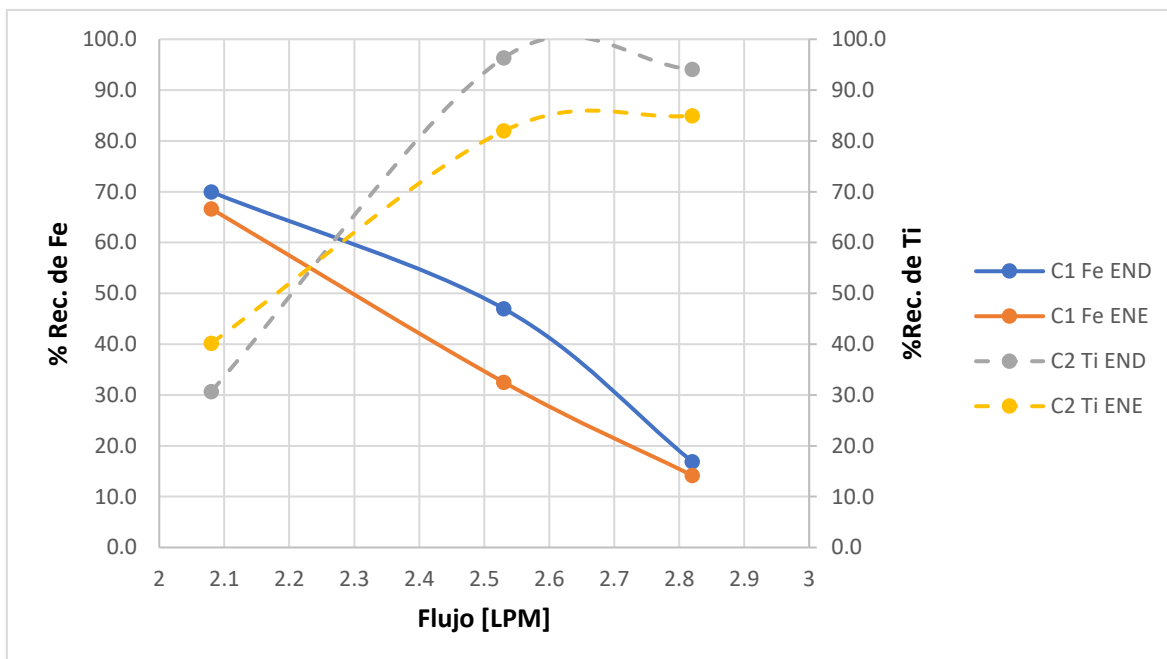
Por otro lado, la ilmenita es una especie mineral cuya densidad y velocidad terminal son menores a las de la magnetita. En cada prueba, en la primera columna el agua presenta una mayor velocidad que la que muestra la ilmenita, por lo que estas partículas son arrastradas hacia la segunda columna del elutriador. El cambio de columna involucra una disminución en la velocidad del fluido, siendo ahora la ilmenita quien presenta una velocidad mayor en comparación con la del agua. A pesar de esta disminución, las partículas de arena sílice siguen presentando una velocidad menor que la del agua por lo que continúan siendo arrastradas hacia las colas, con lo que se logra obtener un producto con una mayor concentración de ilmenita en C2.

Como se muestra en la Figura 39, incrementos demasiado elevados pueden llegar a ser perjudiciales especialmente para las partículas de menor densidad. En la Figura 39 se observa que el Ti alcanza su concentración máxima a un valor de flujo de agua de aproximadamente de 2.6 [LPM], después de este valor su concentración comienza a disminuir. A medida que incrementan los flujos, la velocidad del agua es tan grande que arrastra tanto a las partículas de arena sílice como a las partículas de ilmenita. En cambio, partículas más densas resisten de mejor manera los incrementos en los flujos de agua y obtienen una mejor concentración.



**Figura 39. Comportamiento de la ley de Fe en C1 y Ti en C2 bajo los diferentes flujos de trabajo.**

La velocidad del flujo agua no solamente tiene implicaciones en los porcentajes de ley de las especies minerales, sino que también afecta los porcentajes de recuperación (Figura 40). En el caso del Fe, los porcentajes de recuperación en C1 disminuyen con cada incremento de flujo, manteniendo siempre un valor mayor al 10% de recuperación. La turbulencia generada con los incrementos de flujo es lo que provoca un mayor arrastre de partículas de magnetita hacia los otros productos. Por medio de una recirculación de los productos de C2 y T2 hacia la primera columna, se puede agotar a ambos minerales para asegurarse que los productos obtenidos en la colas contengan la menor cantidad de mineral y la mayor cantidad de arena sílice.



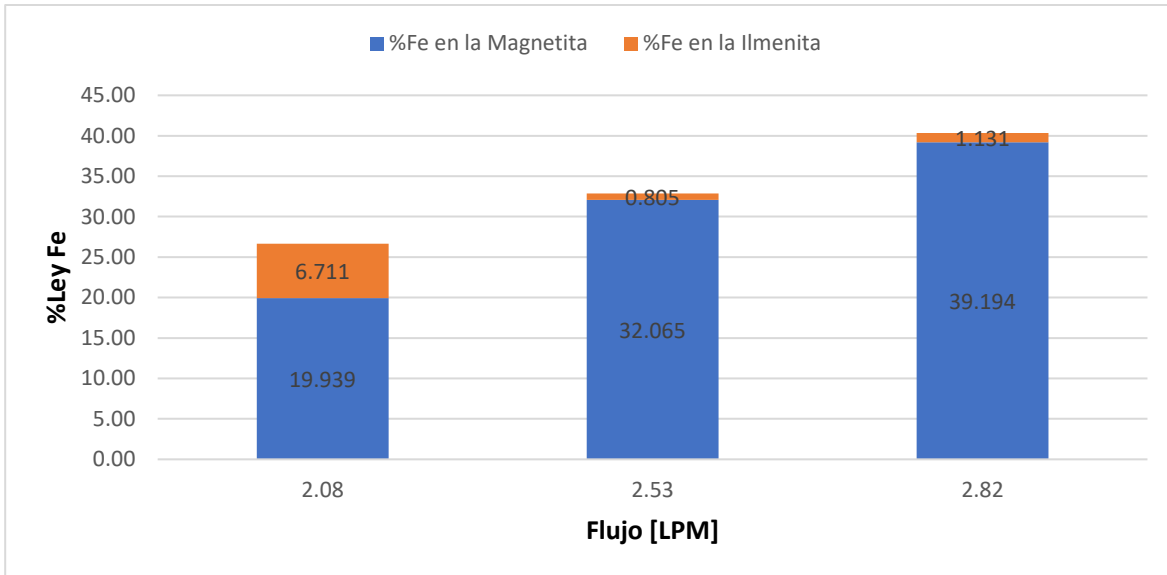
**Figura 40. Comportamiento del porcentaje de recuperación de Fe en C1 y Ti en C2 bajo los diferentes flujos de trabajo.**

A diferencia de la recuperación de Fe, los porcentajes de recuperación de Ti incrementan en C2 a medida que aumenta la velocidad del flujo de agua. En la primera columna la velocidad terminal de la ilmenita es inferior a la velocidad del fluido. Por tal motivo, el agua arrastra casi la totalidad de la ilmenita presente en la mezcla hacia la segunda columna. En la segunda columna la velocidad del agua disminuye por lo que ahora la velocidad de la ilmenita es mayor a la del agua y, al existir una mayor cantidad de partículas de ilmenita en esta columna, la recuperación se ve favorecida.

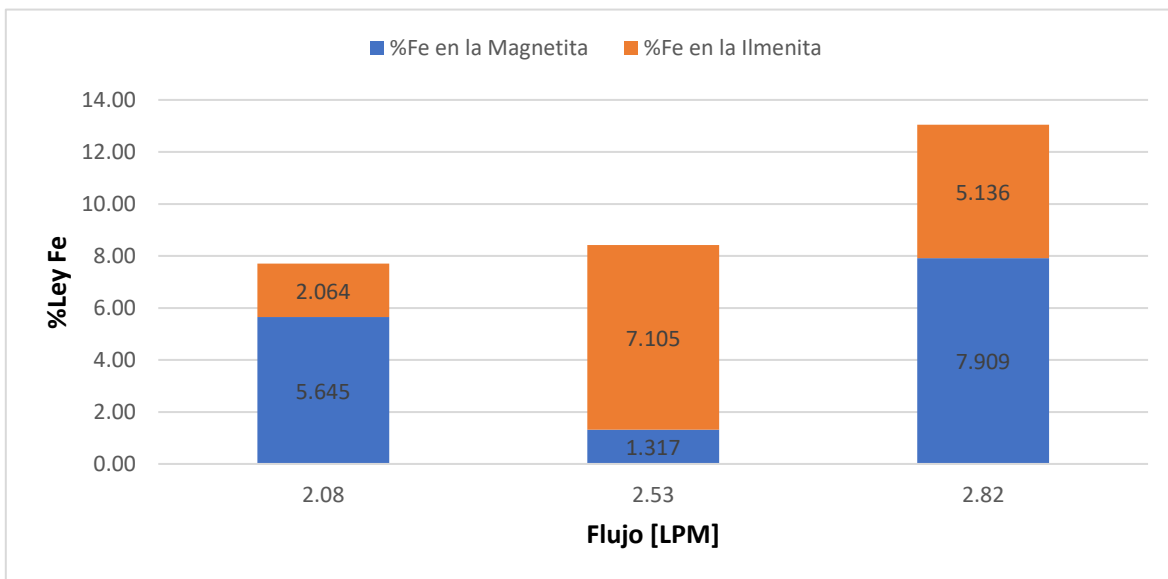
### 3.6.2 Ley de Fe en Magnetita y Ley de Fe en Ilmenita

La concentración de minerales por medio de métodos gravimétricos involucra diferentes parámetros de control. Durante la operación de los elutriadores los parámetros que se consideraron fueron la densidad de las especies minerales y los flujos de trabajo, siendo el EN el equipo que logra un mejor desempeño, ya que además de obtener mejores valores en la concentración y recuperación de Fe y Ti, permite obtener productos en los que predomina una especie mineral sobre la otra.

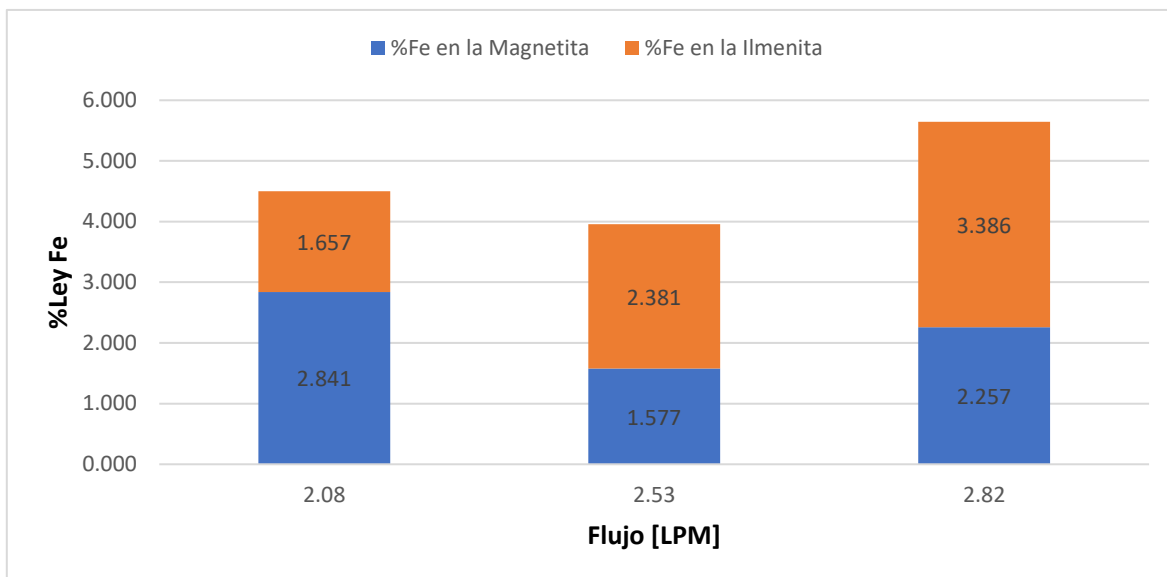
En el anexo F se muestran los cálculos para determinar el porcentaje de Fe que corresponde a la magnetita y el porcentaje correspondiente a la ilmenita. Los resultados se muestran en las Figuras 41-46.



**Figura 41. Ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en el C1 utilizando el END.**



**Figura 42. Ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en el C2 utilizando el END.**



**Figura 43. Ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en el T2 utilizando el END.**

A partir de las estimaciones realizadas en el anexo B, se muestra que por lo menos a un flujo de agua de 2.08 [LPM] se puede obtener una separación de las partículas de magnetita (C1), de las partículas de ilmenita (C2). Sin embargo, los resultados experimentales obtenidos por medio del EN muestran que esta separación se puede obtener de igual manera a flujos de agua mayores.

La diferencia de densidades y el incremento en el flujo de agua es lo que permite esta separación, y es la magnetita la especie que primero logra sumergirse y concentrarse en la descarga de la primera columna, por lo que los valores de ley de Fe en C1 que corresponden a la parte férrica de la magnetita son los de mayor magnitud en todos los productos del elutriador y se incrementan a medida que incrementa el flujo de agua (Figura 41).

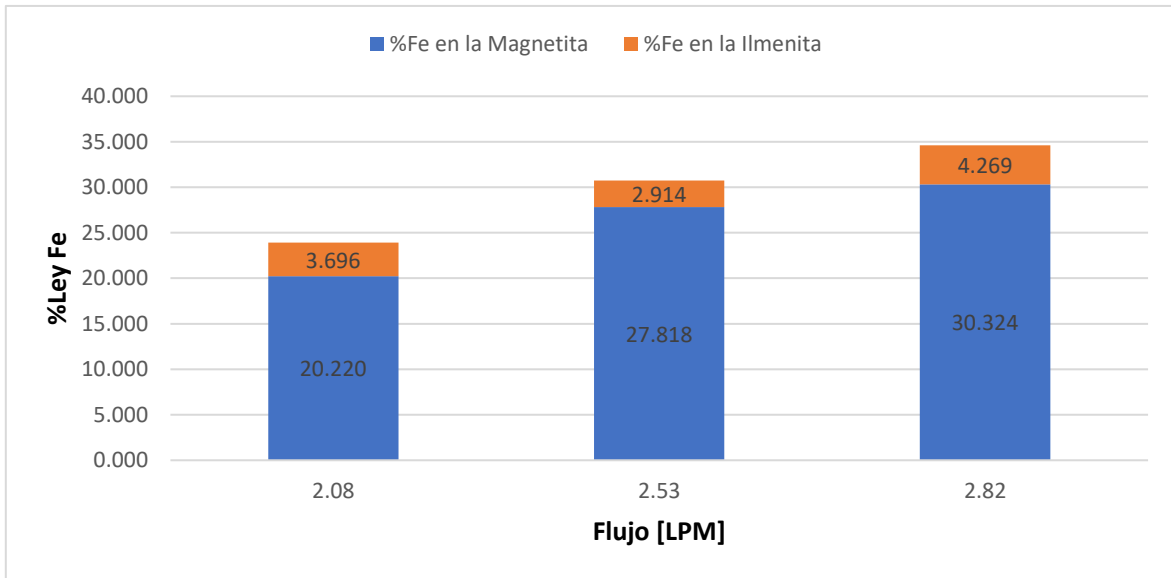
La Figura 41 también muestra concentraciones de Fe correspondientes a la parte ferrosa de la ilmenita. Sin embargo, al ser una partícula más liviana, la velocidad del flujo de agua en la primera columna es demasiado grande como para desplazar la mayor parte de las partículas de ilmenita hacia la segunda columna y en consecuencia, los productos obtenidos en C1 son los de menor ley de Fe de ilmenita.



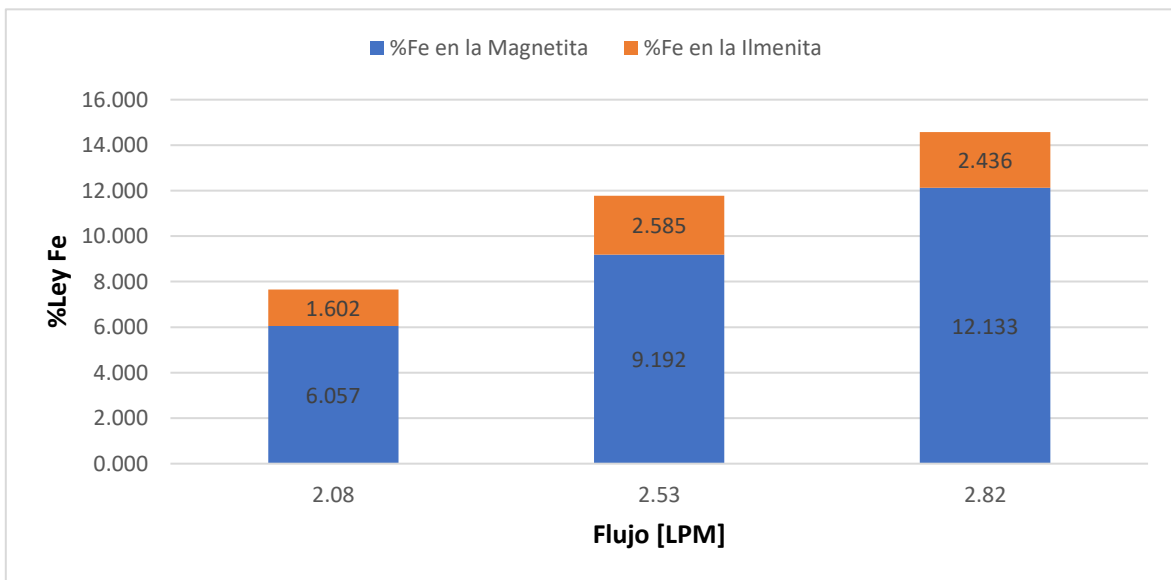
Al cambiar hacia la segunda columna, la velocidad del flujo de agua disminuye permitiendo que partículas más ligeras como la ilmenita puedan sumergirse y concentrarse para obtenerse también como parte de los productos de C2, disminuyendo de esta manera la concentración de Fe asociado a la magnetita, como se observa en la Figura 42. La disminución en la velocidad del fluido beneficia la concentración de ilmenita, debido a que su parte férrica incrementa en esta columna y es aún mayor a medida que el flujo de agua aumenta. Así mismo, los porcentajes de ley de Ti en C2 son los de mayor magnitud (Figuras 33 y 37). Por lo tanto, es posible afirmar que el producto principal de C2 es la ilmenita.

Como era de esperarse, en la Figura 43 el porcentaje de ley de Fe disminuye en T2, siendo la parte férrica de la magnetita la especie que presenta una mayor disminución, debido a que gran parte de este material se ha ido concentrando a lo largo de su recorrido por el elutriador. En cambio, a pesar de que la concentración de Fe proveniente de la ilmenita disminuye en comparación con la concentración obtenida en C2, aún presenta porcentajes de ley que pueden seguir recuperándose, por lo que se recomienda recircular los productos hacia el inicio del proceso.

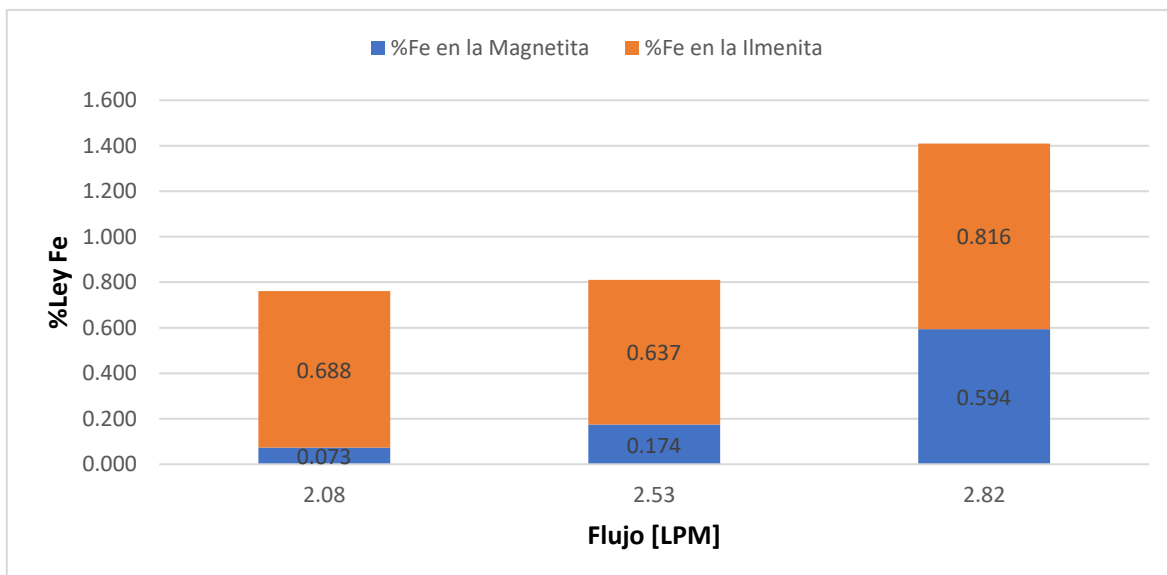
La tendencia mostrada mediante uso del END en las Figuras 41, 42 y 43 demuestra que el Fe asociado a la magnetita disminuye a medida que recorre el elutriador y alcanza sus valores máximos en C1, beneficiado por el incremento en la velocidad del fluido. En cambio, el Fe perteneciente a la ilmenita también se ve beneficiado por este aumento, pero sus valores máximos se concentran en C2. Esta misma tendencia se obtiene al utilizar el ENE cuyos resultados se muestran en las Figuras 44, 45 y 46.



**Figura 44. Ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en el C1 utilizando el ENE.**



**Figura 45. Ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en el C2 utilizando el ENE.**



**Figura 46. Ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en el T2 utilizando el ENE.**

### 3.6.3 Comparación en la Operación del EA y el EN

En la comparación de los elutriadores además de considerar los resultados que se obtienen en los porcentajes de ley y de recuperación, también se debe de tomar en cuenta la facilidad de su operación. El EN es más fácil de ensamblar y operar, hace uso de materiales tecnológicos (sistema Arduino y sensor de flujo) y de materiales resistentes a golpes y caídas (PVC y válvulas de cobre). La zona de alimentación es lo suficientemente amplia para poder añadir el material sólido, abarcando una gran gama de tamaños de partícula. Asimismo, permite trabajar con una mayor cantidad de muestra. Este elutriador puede ser desensamblado para recuperar todo el producto que pudiera llegar a quedar atrapado en alguna de las columnas, asegurando de igual modo la limpieza del equipo.

En contraparte, utilizar el EA presentó varias dificultades. En primera instancia la alimentación del sólido, ya que a pesar de que el elutriador contaba con una “supuesta” adaptación para la alimentación del mineral, este simplemente se atoraba y no llegaba a la columna debido a la poca inclinación que presenta la adaptación, reteniendo todo el mineral en esta parte del equipo (Figura 47). Por ello, este equipo se ve limitado tanto a trabajar con tamaños de partículas muy finos, así como con poca cantidad de mineral.



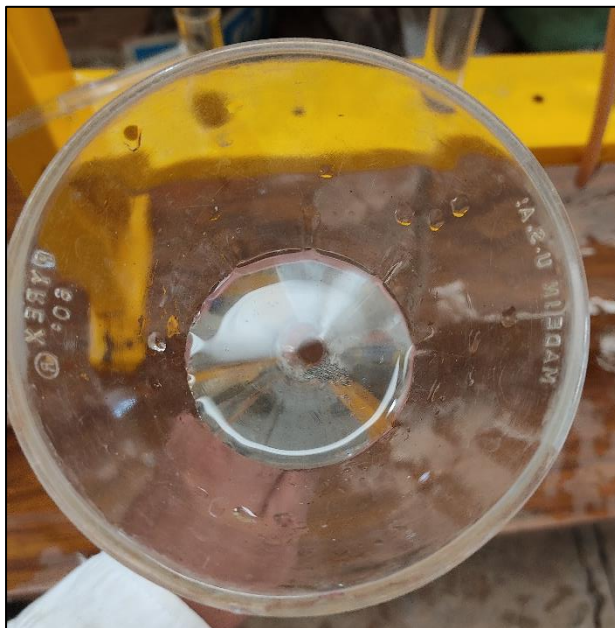
**A)**



**B)**

**Figura 47. A) Entrada de la alimentación del sólido al EA, B) se observa al mineral (sin avance) siendo introducido en el EA.**

Otro aspecto negativo es la fragilidad del equipo ya que el material es pequeño y no permite una gran manipulación de algunas partes, sobre todo en las uniones donde se conectan las mangueras o en la alimentación del sólido. Estas pueden llegar a romperse al limpiarse o al tratar de realizar las conexiones. Asimismo, al abrir la llave de alimentación de agua, está ya no llegaba al derrame ubicado en la parte superior de la columna, sino que fluía por la entrada de la alimentación sólida y regresaba el mineral hacia el exterior, como se observa en la Figura 48, por lo que introducir el mineral por esta entrada no fue posible.



**Figura 48. Embudo para la alimentación del sólido al EA. En la parte central se puede apreciar cierta cantidad de mineral que regresa por la entrada de la alimentación.**

Por las complicaciones ya mencionadas, el material sólido se introdujo por la parte inferior de una de las columnas a través de la manguera de agua. Como el material no fluía hacia el interior de la columna solamente se pudo trabajar con cantidades muy pequeñas de material: 15 [g] para la primera prueba y 20 [g] para las demás. Por tanto, la cantidad de muestra con la que se puede trabajar para las pruebas es una limitante más de este equipo. Es por ello por lo que las recuperaciones que se obtienen en los C1 son demasiado bajas.

Una vez introducido este material a la manguera, la corriente de agua empujó hacia el interior de la columna el material sólido. Como se puede observar en las Figuras 28 y 30, la recuperación es mínima para el primer flujo y casi cero para los flujos superiores. Esto se debe a que el material sólido está directamente encima del flujo de agua, provocando una mayor turbulencia del fluido lo que a su vez genera un arrastre de casi la totalidad de las partículas hacia la siguiente columna, mezclándolas a lo largo de su recorrido y no permitiendo que los diferentes

minerales alcancen sus velocidades terminales, por tanto, casi todo el material se va hacia el derrame y no se obtiene producto alguno (Figura 49).



**Figura 49. EA en operación.**

Otra de las complicaciones que presentó la operación de este elutriador fue en la obtención de los productos y la limpieza del equipo. Al finalizar las pruebas cierta porción del material quedaba adherido a las columnas y para obtenerlos se necesitó de flujos mayores de agua para poder arrastrar a las partículas hacia el final del equipo, es decir, concentrarlas en la T2. Con ello, hay pérdida de material para los concentrados C1 y C2.

Una posible ventaja que presenta el EA es la cantidad de agua que utiliza, ya que, al presentar menor altura, la cantidad de agua que requiere es mucho menor que la que se ocupa con el

EN. En términos generales, además de conseguir mejores rendimientos de operación en la concentración y recuperación de los minerales, el EN es mucho más

fácil de preparar, operar y limpiar. Inclusive, el mantenimiento es menos costoso debido a que si alguna de sus conexiones se daña o se rompe, el laboratorio cuenta con estos materiales para su reemplazo o si fuera el caso, hay una mayor facilidad para conseguir las piezas que cambiar toda la columna, como sería con el EA.

### **3.7 Elutriador Nuevo**

Actualmente, el EN se encuentra instalado en el laboratorio de Beneficio de Minerales. A través del programa de Servicio Social “*Acondicionamiento y Modificación de Equipos de Conminución y Concentración del Laboratorio de Procesamiento de Minerales, del Departamento de Ingeniería Metalúrgica, Facultad de Química, UNAM*”, se añadió una estructura para darle un mejor soporte a las columnas que conforman al elutriador. Dicha estructura brinda una mayor estabilidad al equipo, por lo que su manipulación es aún más fácil y se reduce al mínimo el riesgo de caída de alguna de las columnas. Además, presenta un acabado estético que está en armonía con los demás dispositivos que se encuentran dentro del laboratorio. La Figura 50 muestra como luce el elutriador en la actualidad.



**Figura 50. Elutriador nuevo instalado en el laboratorio de Beneficio de Minerales.**

## Capítulo 4. Conclusiones

- El diseño y los materiales seleccionados para la elaboración del elutriador permitieron construir un equipo funcional y de fácil operación.
- La construcción del nuevo elutriador permitió obtener productos concentrados, la separación entre diferentes especies minerales y el estudio de parámetros de operación.
- La incorporación de un sensor de flujo y de un sistema Arduino al elutriador, permite optimizar el tiempo requerido para determinar los flujos de agua, así como una mejor visualización y control del flujo de trabajo.
- El EN logra porcentajes de ley y porcentajes de recuperación de Fe y Ti más elevados en comparación a los obtenidos mediante el EA.
- Las condiciones más favorables para concentrar Fe son alimentando de manera directa el mineral con un flujo de 2.82 [LPM], obteniendo una ley de 40.325%.
- Las condiciones más favorables para concentrar Ti son alimentando de forma directa el mineral con un flujo de 2.53 [LPM], obteniendo una ley de 6.094%.
- El EN permite obtener diferentes productos: en C1 se concentra principalmente magnetita mientras que en C2 se concentra mayormente ilmenita.
- A medida que aumenta la velocidad del flujo de agua, incrementa la ley de Fe y la ley de Ti.
- El EN es un dispositivo fácil de armar, manipular, limpiar y desensamblar, por lo que su uso en el laboratorio es ampliamente recomendable para los fines didácticos del DIM.



## Bibliografía

- [1]. *Minería Y Medio Ambiente*. Secretaría de Economía. (2012). Consultado el 10 de abril de 2023 de: [https://www.economia.gob.mx/files/comunidad\\_negocios/informacion\\_sectorial/mineria/mineria\\_y\\_medio\\_ambiente.pdf](https://www.economia.gob.mx/files/comunidad_negocios/informacion_sectorial/mineria/mineria_y_medio_ambiente.pdf)
- [2]. Kelly, G. E. & Spottiswood, D. J. (1990). *Introducción al Procesamiento de Minerales*. Ciudad de México. LIMUSA. Pp 263.
- [3]. Bustamante, M. O., Gaviria, A. C. & Restrepo, O. J. (2008). *Notas de la asignatura de Concentración de Minerales*. Facultad Nacional de Minas, Universidad Nacional de Colombia. Medellín, Colombia. Pp 1. Consultado el 24 de febrero de 2022 de: [https://minas.medellin.unal.edu.co/centro-editorial/cuadernos/download/24\\_5a1004a32dcbd619453c3eed562725f0](https://minas.medellin.unal.edu.co/centro-editorial/cuadernos/download/24_5a1004a32dcbd619453c3eed562725f0)
- [4]. Fuerstenau, M. C. & Han, K. N. (2003). *Principles of Mineral Processing*. Colorado, USA. Society of Mining, Metallurgy and Exploration. Pp 185.
- [5]. Wills, B. A. & Finch, J. A. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology (Eighth Edition) An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery*. Science Direct. Pp 219-220, 223,265-266. Consultado el 24 de febrero de 2022 de: <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1016/C2010-0-65478-2>
- [6]. Yan, A. & Gupta A. (2016). *Mineral Processing Design and Operations: An Introduction, Second Edition*. Science Direct. Pp 563-565, 570. Consultado el 24 de febrero de 2022 de: <https://doi-org.pbidi.unam.mx:2443/10.1016/C2014-0-01236-1>
- [7]. Reinoso Méndez, J. (2019). *Determinación de los parámetros operacionales para la Concentración de Oro en un Espiral*. [Tesis de Licenciatura, Universidad del AZUAY]. Repositorio Institucional-Universidad del Azuay. Consultado el 30 de mayo de 2023 de: <http://dspace.uazuay.edu.ec/handle/datos/8956>
- [8] *Tema 8. Concentración por Gravedad*. (s.f.). Universidad Politécnica de Cartagena. Consultado el 30 de mayo de 2023 de: [https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5555/mod\\_resource/content/1/Tema\\_8\\_-\\_Concentracion\\_por\\_Gravedad\\_I\\_-\\_Pulsadoras.pdf](https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5555/mod_resource/content/1/Tema_8_-_Concentracion_por_Gravedad_I_-_Pulsadoras.pdf)

- [9]. Biddulph, M. W. (1980). *Separation of Waste by Elutriation*. Conservation & Recycling, Vol. 3. Pp 361-373.
- [10]. *Separación de Sólidos*. (s.f.). Consultado el 20 de septiembre de 2022 de: [https://www.academia.edu/6618227/SEPARACI%C3%93N\\_SEPARACI%C3%93N\\_DE\\_S%C3%93LIDOS\\_DE\\_S%C3%93LIDOS](https://www.academia.edu/6618227/SEPARACI%C3%93N_SEPARACI%C3%93N_DE_S%C3%93LIDOS_DE_S%C3%93LIDOS)
- [11]. Subba Rao, D. V. (2016). *Minerals and Coal Process Calculations*. London, UK. CRC Press, Taylor & Francis Group. Pp 143-146.
- [12]. Chitra, A., Prasad Kumar, B. & Narayana, A. C. (2010). *Influence of Particle Shape on Drag Coefficient for Commonly Occuring Sandy Particles in Coastal Areas*. International Journal of Ocean and Climate Systems. Vol. 1, No. 2. Pp 99-112.
- [13]. *Capítulo 4. Interacción entre Partículas y Fluidos*. (s.f.). Consultado el 20 de septiembre de 2022 de: <http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo4.pdf>
- [14]. Dietrich, W. E. (1982). *Settling Velocity of Natural Particles*. Water Resources Research, Vol. 18. Pp. 1615-1626. Consultado el 22 de septiembre de: [http://geoweb.uwyo.edu/geol5330/Dietrich\\_SettlingVelocity\\_WRR82.pdf](http://geoweb.uwyo.edu/geol5330/Dietrich_SettlingVelocity_WRR82.pdf)
- [15]. Jiménez, J. A. & Madsen, O.S. (2003). *A Simple Formula to Estimate Settling Velocity of Natural Sediments*. Journal of Waterway, Port, Coastal and Ocean Engineering, Vol. 129. Pp 70-78. Consultado el 24 de septiembre de: <https://www.scopus.com/record/display.uri?eid=2-s2.0-0037343195&origin=inward&txGid=14b6126c646aa0be70b792377874a268>
- [16]. Lambourne, R. & Strivens, T. A. (1999). *Paint and Surface Coatings. Theory and Practice. Second Edition*. Woodhead Publishing Ltd. England. Science Direct. Pp. 265-266. Consultado el 30 de mayo de 2022 de: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/B9781855733480500124#bb0230>
- [17]. Vasallo, L.F. (2008). *Yacimientos Minerales Metálicos. 4ta. edición*. Versión Online, Bol-e Centro de Geociencias, UNAM. Querétaro, México. Pp 15-17, 30-31.

Consultado el 22 de septiembre de: <https://pdfslide.net/documents/yacimientos-minerales-metalicos.html>

[18]. Alvarado Palacios, S. (2004). *Concentración de Ilmenita y Zircón a partir de Arenas de Playa*. Tesis de Licenciatura. Facultad de Química, UNAM. Consultado el 22 de septiembre de 2022 de: <http://132.248.9.195/ppt2004/0335715/Index.html>

[19]. Morales Zararías J. & Velásquez Gonzáles, P. (2009). *Prueba de Separación Gravimétrica a cuatro muestras de arenas, procedentes de Puerto Escondido y frontera, enviadas por la Gerencia de Yacimientos Minerales del SGM*. Servicio Geológico Mexicano. Pp 8.

[20]. Materialoteca México. *Mineral Magnetita*. Universidad Autónoma Metropolitana, Unidad Azcapotzalco. Consultado el 25 de septiembre de 2022 de: <http://materialoteca.azc.uam.mx/index.php/catalogo-de-materiales/item/41-de-origen-mineral/3942-mineral-magnetita>

[21]. Torrente Artero, O. (2013). *Arduino. Curso Práctico*. Madrid, España. RC Libros. Pp 66-75.

[22]. Minami Koyama, Y. (2019). *Arduino y Algunas Aplicaciones*. Dirección General de Cómputo y de Tecnologías de Información y Comunicación, UNAM. Consultado el 31 de mayo de 2023 de: <https://www.red-tic.unam.mx/content/arduino-y-algunas-aplicaciones>

[23]. Santillán Tovar, G. & Campos Delgado, D. (2016). *Procesamiento Digital de Señales. Prácticas de Laboratorio con Arduino DUE*. San Luis Potosí, México. Facultad de Ciencias, UASLP. Pp 3-5.

[24]. Lajara, J. & Peligrí Sebastiá, J. (2014). *Sistemas Integrados con Arduino*. Ciudad de México, México. Alfaomega Grupo Editor. Pp 11.

[25]. Bañuelos Saucedo, M. (2017). *Tutorial Sobre Arduino*. Instituto de Ciencias Aplicadas y Tecnología, UNAM. Pp 4-6. Consultado el 1 de junio de 2023 de: <https://www.rua.unam.mx/portal/Descargas/index/85002>

- [26]. *Estructura Básica de un Programa.*(s.f.). Manual de Programación de Arduino. Universidad de Alicante. Consultado el 1 de junio de 2023 de: [http://dfists.ua.es/~jpomares/arduino/page\\_04.htm](http://dfists.ua.es/~jpomares/arduino/page_04.htm)
- [27]. Arduino. *What is Arduino?* Consultado el 26 de febrero de 2022 de: <https://www.arduino.cc/>
- [28]. Santiago Cruz, L., Morales Mejía, J., Martínez del Cerro Santillán, G. & Vega Padilla, A. (2022). *Tratamiento de Aguas. Enfoque actualizado de la teoría y del laboratorio al perfil de Ingeniería Química.* Facultad de estudios Superiores Campus Cuautitlán, UNAM. Consultado el 12 de abril de 2023 de: <http://www.ii.unam.mx/es-mx/Investigacion/Proyecto/Paginas/desarrollo-equipos-saneamiento-de-aguas.aspx>
- [29]. Naylamp Mechatronics. *Sensor de flujo de agua.* Consultado el 26 de febrero de 2022 de: <https://naylampmechatronics.com/sensores-liquido/108-sensor-de-flujo-de-agua-12-yf-s201.html>
- [30]. Romero Arismendi, N., Martínez Ortiz, P., Espina Hernández, J. & Pérez Benítez, J. (2021). *Análisis de la sensibilidad, respuesta de pequeña señal y respuesta dinámica de un sensor GMR.* Científica, Vol. 25, No. 2, Pp. 01-14. Consultado el 13 de abril de 2023 de: <https://doi.org/10.46842/ipn.cien.v25n2a01>
- [31]. Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México. (s.f.). *Sensores Periféricos.* Consultado el 26 de febrero de 2022 de: <http://profesores.fi-b.unam.mx/guevarod/practicas/DDM/TeoDDM/SensoresB.pdf>
- [32]. Martínez Enríquez, H. (2022). *Diseñar Un Prototipo De Medición De Consumo De Agua En Entornos Residenciales Mediante El Uso De Un Sistema Bajo El Estándar IEEE 802.15.4, Soportado Por Un Sensor De Caudal Y Registro De Información En La Nube Para El Municipio De San Juan De Pasto.* Escuela de Ciencias Básicas Tecnología e Ingeniería, Universidad Nacional Abierta y a Distancia. Bogotá, Colombia. Consultado el 12 de abril de 2023 de: <https://repository.unad.edu.co/bitstream/handle/10596/54029/hdenriquezm.pdf?sequence=3&isAllowed=y>

[33] Cázarez Ayala, G., Rodríguez Beltrán, A., Ramírez Baldenegro, M., Lugo Zavala, S., Castillo Meza, H. & Morales López, H. (2014). *Sistema De Telemedición De Consumo De Agua Potable Para Aplicaciones Residenciales Y Comerciales*. Congreso Internacional en Ingeniería Electrónica. Vol. 36, Pp. 188-194. Consultado el 14 de abril de 2023 de: [http://depi.itchihuahua.edu.mx/display/memorias\\_electro/MemoriaElectro2014](http://depi.itchihuahua.edu.mx/display/memorias_electro/MemoriaElectro2014)

[34]. HETPRO. *Sensor de Flujo YF-S201 para agua*. Consultado el 25 de septiembre de 2022 de: <https://hetpro-store.com/TUTORIALES/sensor-de-flujo/>

## ANEXOS

### Anexo A. Criterios de Concentración.

#### Cálculo del Criterio de Concentración para Magnetita-Ilmenita.

$$CC = \Delta\rho = \frac{\rho_h - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} = \left( \frac{5.30 \frac{g}{cm^3} - 1 \frac{g}{cm^3}}{4.70 \frac{g}{cm^3} - 1 \frac{g}{cm^3}} \right) = 1.16$$

#### Cálculo del Criterio de Concentración para Magnetita-Arena de Playa.

$$CC = \Delta\rho = \frac{\rho_h - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} = \left( \frac{5.30 \frac{g}{cm^3} - 1 \frac{g}{cm^3}}{2.65 \frac{g}{cm^3} - 1 \frac{g}{cm^3}} \right) = 2.60$$

#### Cálculo del Criterio de Concentración para Ilmenita-Arena de Playa.

$$CC = \Delta\rho = \frac{\rho_h - \rho_f}{\rho_l - \rho_f} = \left( \frac{4.70 \frac{g}{cm^3} - 1 \frac{g}{cm^3}}{2.65 \frac{g}{cm^3} - 1 \frac{g}{cm^3}} \right) = 2.24$$

## Anexo B. Velocidades Terminales en Términos de la Ley de Stokes.

**Tabla 20. Valores de las constantes utilizadas para la determinar las velocidades terminales de las partículas minerales a través de la ley de Stokes.**

Valores Constantes	
Altura [cm]	100
Gravedad [cm/s <sup>2</sup> ]	981
$\rho$ agua [g/cm <sup>3</sup> ]	1
$\mu$ agua [g/cm s]	0.01
Tamaño de Partículas [cm]	0.015
$\rho$ Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	5.3
$\rho$ FeTiO <sub>3</sub> [g/cm <sup>3</sup> ]	4.7
$\rho$ AP [g/cm <sup>3</sup> ]	2.65

Las siguientes tablas muestran la velocidad que alcanza el agua bajo diferentes porcentajes de flujo. Además, cuando la velocidad terminal de la partícula es mayor a la velocidad del agua en color verde se aprecia la leyenda “Descarga”, lo que indica que en esa columna se puede concentrar a esa especie mineral, de lo contrario aparece en color rojo la leyenda “Derrame” y significa que el mineral es arrastrado hacia la siguiente columna o hacia las colas, según sea el caso.

**Tabla 21. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 20%.**

Tubo	Diámetro [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	V agua [cm/s]
1	2.54	5.07	1.37
2	3.20	8.04	0.86

**Tabla 22. Velocidad terminal de las partículas minerales bajo un flujo de agua del 20%.**

Partícula	V terminal [cm/s]	T1	T2
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5.27	Descarga	Descarga
FeTiO <sub>3</sub>	4.54	Descarga	Descarga
AP	2.02	Descarga	Descarga

**Tabla 23. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 40%.**

Tubo	Diámetro [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	V agua [cm/s]
1	2.54	5.07	3.49
2	3.20	8.04	2.20

**Tabla 24. Velocidad terminal de las partículas minerales bajo un flujo de agua del 40%.**

Partícula	V terminal [cm/s]	T1	T2
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5.27	Descarga	Descarga
FeTiO <sub>3</sub>	4.54	Descarga	Descarga
AP	2.02	Derrame	Derrame

**Tabla 25. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 50%.**

Tubo	Diámetro [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	V agua [cm/s]
1	2.54	5.07	4.34
2	3.20	8.04	2.73

**Tabla 26. Velocidad terminal de las partículas minerales bajo un flujo de agua del 50%.**

Partícula	V terminal [cm/s]	T1	T2
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5.12	Descarga	Descarga
FeTiO <sub>3</sub>	4.51	Descarga	Descarga
AP	2.14	Derrame	Derrame

**Tabla 27. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 60%.**

Tubo	Diámetro [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	V agua [cm/s]
1	2.54	5.07	4.94
2	3.20	8.04	3.11



**Tabla 28. Velocidad terminal de las partículas minerales bajo un flujo de agua del 60%.**

Partícula	V terminal [cm/s]	T1	T2
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5.25	Descarga	Descarga
FeTiO <sub>3</sub>	4.51	Derrame	Descarga
AP	2.01	Derrame	Derrame

**Tabla 29. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 70%.**

Tubo	Diámetro [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	V agua [cm/s]
1	2.54	5.07	5.98
2	3.20	8.04	3.77

**Tabla 30. Velocidad terminal de las partículas minerales bajo un flujo de agua del 70%.**

Partícula	V terminal [cm/s]	T1	T2
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5.12	Derrame	Descarga
FeTiO <sub>3</sub>	4.51	Derrame	Descarga
AP	2.14	Derrame	Derrame

**Tabla 31. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 80%.**

Tubo	Diámetro [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	V agua [cm/s]
1	2.54	5.07	6.69
2	3.20	8.04	4.22

**Tabla 32. Velocidad terminal de las partículas minerales bajo un flujo de agua del 80%.**

Partícula	V terminal [cm/s]	T1	T2
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	5.12	Derrame	Descarga
FeTiO <sub>3</sub>	4.51	Derrame	Descarga
AP	2.14	Derrame	Derrame

**Anexo C. Velocidades Terminales en Términos de la ley de Stokes para Partículas en Número de Malla 200.**

Al igual que con el anexo B, el anexo C sigue la misma convención para las leyendas mostradas a lo largo de las siguientes tablas.

**Tabla 33. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 20%.**

Tubo	Diámetro [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	V agua [cm/s]
1	2.54	5.07	1.37
2	3.20	8.04	0.86

**Tabla 34. Velocidad terminal de las partículas minerales en tamaño de malla 200 bajo un flujo de agua del 20%.**

Partícula	V terminal [cm/s]	T1	T2
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1.28	Derrame	Descarga
FeTiO <sub>3</sub>	1.10	Derrame	Descarga
AP	0.49	Derrame	Derrame

**Tabla 35. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 40%.**

Tubo	Diámetro [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	V agua [cm/s]
1	2.54	5.07	3.49
2	3.20	8.04	2.20
3	4.00	12.57	1.41
4	5.03	19.87	0.89

**Tabla 36. Velocidad terminal de las partículas minerales en tamaño de malla 200 bajo un flujo de agua del 40%.**

Partícula	V terminal [cm/s]	T1	T2	T3	T4
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1.28	Derrame	Derrame	Derrame	Descarga
FeTiO <sub>3</sub>	1.10	Derrame	Derrame	Derrame	Descarga
AP	0.49	Derrame	Derrame	Derrame	Derrame

**Tabla 37. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 50%.**

Tubo	Diámetro [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	V agua [cm/s]
1	2.54	5.07	4.34
2	3.20	8.04	2.73
3	4.00	12.57	1.75
4	5.04	19.95	1.10

**Tabla 38. Velocidad terminal de las partículas minerales en tamaño de malla 200 bajo un flujo de agua del 50%.**

Partícula	V terminal [cm/s]	T1	T2	T3	T4
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1.25	Derrame	Derrame	Derrame	Descarga
FeTiO <sub>3</sub>	1.10	Derrame	Derrame	Derrame	Derrame
AP	0.52	Derrame	Derrame	Derrame	Derrame

**Tabla 39. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 60%.**

Tubo	Diámetro [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	V agua [cm/s]
1	2.54	5.07	4.94
2	3.20	8.04	3.11
3	4.00	12.57	1.99
4	5.04	19.95	1.25

**Tabla 40. Velocidad terminal de las partículas minerales en tamaño de malla 200 bajo un flujo de agua del 60%.**

Partícula	V terminal [cm/s]	T1	T2	T3	T4
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1.28	Derrame	Derrame	Derrame	Descarga
FeTiO <sub>3</sub>	1.10	Derrame	Derrame	Derrame	Derrame
AP	0.49	Derrame	Derrame	Derrame	Derrame

**Tabla 41. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 70%.**

Tubo	Diámetro [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	V agua [cm/s]
1	2.54	5.07	5.98
2	3.20	8.04	3.77
3	4.00	12.57	2.41
4	5.04	19.95	1.52
5	6.34	31.57	0.96

**Tabla 42. Velocidad terminal de las partículas minerales en tamaño de malla 200 bajo un flujo de agua del 70%.**

Partícula	V terminal [cm/s]	T1	T2	T3	T4	T5
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1.25	Derrame	Derrame	Derrame	Derrame	Descarga
FeTiO <sub>3</sub>	1.10	Derrame	Derrame	Derrame	Derrame	Descarga
AP	0.52	Derrame	Derrame	Derrame	Derrame	Derrame

**Tabla 43. Velocidad del agua a través de tubos de diferentes diámetros con un flujo de agua del 80%.**

Tubo	Diámetro [cm]	Área [cm <sup>2</sup> ]	V agua [cm/s]
1	2.54	5.07	6.69
2	3.20	8.04	4.22
3	4.00	12.57	2.70
4	5.04	19.95	1.70
5	6.34	31.57	1.07

**Tabla 44. Velocidad terminal de las partículas minerales en tamaño de malla 200 bajo un flujo de agua del 80%.**

Partícula	V terminal [cm/s]	T1	T2	T3	T4	T5
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	1.25	Derrame	Derrame	Derrame	Derrame	Descarga
FeTiO <sub>3</sub>	1.10	Derrame	Derrame	Derrame	Derrame	Descarga
AP	0.52	Derrame	Derrame	Derrame	Derrame	Derrame

**Anexo D. Cálculo de los Flujos de Agua del Rotámetro a partir de los Diferentes Flujos de Trabajo.**

**Tabla 45. Flujos de agua obtenidos mediante el uso del rotámetro para el llenado de un recipiente de 1 [L].**

<b>% Flujo</b>	<b>Prueba</b>	<b>t [s]</b>	<b>tprom [s]</b>	<b>Flujo [L/min]</b>
<b>20</b>	A	143	143.5	0.42
	B	144		
<b>40</b>	A	57	56.5	1.06
	B	56		
<b>50</b>	A	45	45.5	1.32
	B	46		
<b>60</b>	A	41	40	1.50
	B	39		
<b>70</b>	A	33	33	1.82
	B	33		
<b>80</b>	A	30	29.5	2.03
	B	29		

## Anexo E. Fórmulas para el Balance Metalúrgico

Ecuaciones utilizadas para el balance metalúrgico de la sección 3.5

$$F = C1 + C2 + T2 \text{ Ec. 22}$$

$$\frac{FX_F^i}{100} = \frac{C1X_{C1}^i}{100} + \frac{C2X_{C2}^i}{100} + \frac{T2X_{T2}^i}{100} \text{ Ec. 23}$$

$$CM_Y^i = \frac{C_Y^i X_Y^i}{100} \text{ Ec. 24}$$

$$CM_F^i = CM_{C1}^i + CM_{C2}^i + CM_{T2}^i \text{ Ec. 25}$$

$$\%Rec_Y^i = \frac{CM_Y^i}{CM_F^i} \text{ Ec. 26}$$

donde

F es la alimentación [g]

CM es el contenido metálico [g]

*i* es el elemento Fe o Ti

Y es el producto C1, C2 o T2

% Rec es el porcentaje de recuperación.

**Anexo F. Determinación del porcentaje de Fe en la ilmenita y magnetita.**

**Tabla 46. Pesos moleculares y porcentajes de Fe y Ti en los minerales de trabajo.**

Sustancia	Peso Molecular [g/mol]
Fe	55.85
Ti	47.9
O	16
Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	231.55
FeTiO <sub>3</sub>	151.75
% Fe en Fe <sub>3</sub> O <sub>4</sub>	72.36
% Fe en FeTiO <sub>3</sub>	36.80
% Ti en FeTiO <sub>3</sub>	31.57

**Tabla 47. Porcentaje de ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en los C1 utilizando el END.**

Flujo [LPM]	%Ley Fe	%Ley Ti	%Fe en la Ilmenita	%Fe en la Magnetita
2.08	26.65	5.756	6.711	19.939
2.53	32.87	0.69	0.805	32.065
2.82	40.325	0.97	1.131	39.194

**Tabla 48. Porcentaje de ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en los C2 utilizando el END.**

Flujo [LPM]	%Ley Fe	%Ley Ti	%Fe en la Ilmenita	%Fe en la Magnetita
2.08	7.709	1.77	2.064	5.645
2.53	8.422	6.094	7.105	1.317
2.82	13.045	4.405	5.136	7.909

**Tabla 49. Porcentaje de ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en los T2 utilizando el END.**

<b>Flujo [LPM]</b>	<b>%Ley Fe</b>	<b>%Ley Ti</b>	<b>%Fe en la Ilmenita</b>	<b>%Fe en la Magnetita</b>
2.08	4.498	1.421	1.657	2.841
2.53	3.958	2.042	2.381	1.577
2.82	5.643	2.904	3.386	2.257

**Tabla 50. Porcentaje de ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en los C1 utilizando el ENE.**

<b>Flujo [LPM]</b>	<b>%Ley Fe</b>	<b>%Ley Ti</b>	<b>%Fe en la Ilmenita</b>	<b>%Fe en la Magnetita</b>
2.08	23.916	3.17	3.696	20.220
2.53	30.732	2.499	2.914	27.818
2.82	34.593	3.661	4.269	30.324

**Tabla 51. Porcentaje de ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en los C2 utilizando el ENE.**

<b>Flujo [LPM]</b>	<b>%Ley Fe</b>	<b>%Ley Ti</b>	<b>%Fe en la Ilmenita</b>	<b>%Fe en la Magnetita</b>
2.08	7.659	1.374	1.602	6.057
2.53	11.777	2.217	2.585	9.192
2.82	14.569	2.089	2.436	12.133

**Tabla 52. Porcentaje de ley de Fe correspondiente a la magnetita y la ilmenita en los T2 utilizando el ENE.**

<b>Flujo [LPM]</b>	<b>%Ley Fe</b>	<b>%Ley Ti</b>	<b>%Fe en la Ilmenita</b>	<b>%Fe en la Magnetita</b>
2.08	0.761	0.59	0.688	0.073
2.53	0.811	0.546	0.637	0.174
2.82	1.41	0.7	0.816	0.594