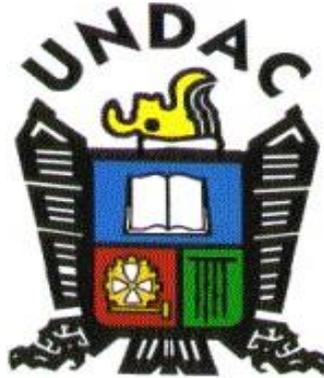


UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA

METALÚRGICA



TESIS

**Aplicación de la función Rosin Rammler para el control del circuito
de molienda - clasificación de la planta concentradora San Expedito –
Pasco**

Para optar el título profesional de:

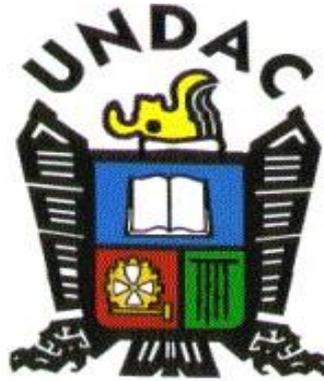
Ingeniero Metalurgista

Autor: Bach. Carlos Erik ESTEBAN HUAYANAY

Asesor: Mg. Ramiro SIUCE BONIFACIO

Cerro de Pasco – Perú - 2022

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA
METALÚRGICA



TESIS

**Aplicación de la función Rosin Rammler para el control del circuito
de molienda - clasificación de la planta concentradora San Expedito –
Pasco**

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Hildebrando Anival CONDOR GARCÍA
PRESIDENTE

Mg. José Elí CASTILLO MONTALVÁN
MIEMBRO

Mg. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO
MIEMBRO

DEDICATORIA

En homenaje a mis padres Dionicio E. y Nelly

H. a mi adorado hijo Elián Gabriel y a todas las personas que hicieron lo posible la elaboración del presente trabajo, con profundo reconocimiento y agradecimiento.

El Autor.

AGRADECIMIENTO

A mis profesores de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión de la escuela de formación profesional de Metalurgia que influyeron circunstancialmente en mi formación profesional.

A mis padres por el apoyo incondicional, doy gracias a la vida porque cada día me demuestra lo hermosa que es la vida y lo justa que puede llegar hacer; gracias a mi familia y en especial a mi hijo por ser mi mayor fortaleza de permitirme cumplir con excelencia en el desarrollo de esta tesis. Gracias por creer en mí y gracias a Dios por permitirme vivir y disfrutar de cada día.

No ha sido sencillo el camino hasta ahora, pero gracias a sus aportes, a su amor, a su inmensa bondad y apoyo, lo complicado de lograr esta meta se ha notado menos. Les agradezco, y hago presente mi gran afecto hacia ustedes, mi hermosa familia.

Finalmente, agradezco a quien lee esta investigación de mi tesis, por permitir a mis experiencias, investigaciones y conocimiento, incurrir dentro de su repertorio de información mental.

RESUMEN

El trabajo de investigación reporta los resultados de las pruebas experimentales realizados directamente en planta concentradora San Expedito, con el apoyo de los operadores y supervisores realizando un control estricto de las variables carga circulante y su relación con el D_{50} en función de la densidad de pulpa.

El objetivo de la tesis consistió, en aplicar la función Rosin Rammler para el control del circuito molienda-clasificación de la planta concentradora San Expedito. Para ello, se determinó la carga circulante del circuito de molienda-clasificación que se obtuvo de los análisis granulométricos del alimento, rebose y arenas de retorno. Siendo la carga circulante de 1,568.

El tamaño crítico D_{50} se determinó con el coeficiente de partición del rebose entre las arenas de retorno y se determinó que es 64,76 micrones

Aplicando la ecuación de Rosin Rammler y reemplazando los valores del tamaño crítico D_{50} al alimento del clasificador se determinó el porcentaje de las arenas de retorno que es 60,10% (Ac +) y las arenas del rebose es 39,90 % (Ac +) y con estos pesos se determinó la carga circulante 1,5062 que es similar a la que se obtuvo por análisis granulométrico 1,568.

En planta concentradora en una operación normal, el control de la carga circulante se realiza mediante densidades de pulpa y llevándolo a diluciones para posteriormente determinar la carga circulante 1,5656, como se ve es similar a lo determinado por análisis granulométrico, Rosin Rammler mediante la relación D_{50} , y densidades de pulpa. Con esto se confirma lo afirmado por el ingeniero José Manzaneda en su libro de procesamiento de minerales.

Palabras Clave: Análisis granulométrico, Carga circulante, D_{50}

ABSTRACT

The research work reports the results of the experimental tests carried out directly at the San Expedito concentrator plant, with the support of the operators and supervisors, carrying out a strict control of the circulating load variables and their relationship with the D50 based on the pulp density.

The objective of the thesis was to apply the Rosin Rammler function to control the classification grinding circuit of the San Expedito concentrator plant. For this, the circulating load of the grinding-classification circuit was determined, which was obtained from the granulometric analyzes of the feed, overflow and return sands. Being the circulating load of 1,568.

The critical size D50 was determined with the partition coefficient of the overflow between the return sands and it was determined to be 64.76 microns.

Applying the Rosin Rammler equation and replacing the values of the critical size D50 to the classifier feed, the percentage of the return sand was determined, which is 60.10% ($A_c +$) and the overflow sand is 39.90% ($A_c +$) and with these weights the circulating load was determined 1.5062, which is similar to that obtained by particle size analysis 1.568.

In a concentrator plant in normal operation, the control of the circulating load is carried out by means of pulp densities and taking it to dilutions to later determine the circulating load 1.5656, as seen is similar to that determined by granulometric analysis, Rosin Rammler by means of the D50 ratio, and pulp densities. This confirms what was stated by engineer José Manzaneda in his book on mineral processing.

Keywords: Granulometric analyzes, Circulating load, D50

INTRODUCCIÓN

Los problemas metalúrgicos siempre están al acecho en toda planta concentradora, esto debido a la geología del mineral que ingresa a las operaciones metalúrgicas, si bien es cierto las variaciones de la ley de cabeza del mineral hace que las plantas concentradoras no se automaticen en su totalidad realizándose el control solamente en partes.

El control de las operaciones metalúrgicas es importante para tener buenas recuperaciones, buenos concentrados comerciables y unas leyes de relaves bajas, por tal motivo la presente tesis tiene como objetivo aplicar la función Rosin Rammler para el control del circuito molienda clasificación, si se controla este circuito tendremos una buena libración del tamaño de partícula y por ende una buena recuperación y excelentes concentrados.

La importancia de la investigación radica estrictamente en el control del circuito de molienda-clasificación mediante el control de las variables de carga circulante y el tamaño crítico de separación D50. Normalmente todo control en este circuito se realiza mediante un análisis granulométrico en función a la malla 200 en el rebose del clasificador.

El problema que tenemos en la planta concentradora es que no se está controlando pertinentemente el circuito de molienda clasificación por parte de los operadores y esto trae como consecuencia perdida de minerales valiosos en el relave e incrementándose el costo por el consumo excesivo de los reactivos y costos operativos, razón fundamental del presente trabajo de investigación.

Para alcanzar el objetivo de la presente tesis se estructuro de la siguiente manera:

En el capítulo I, se presenta el planteamiento del problema, objetivos y las razones por la que se decide realizar el estudio del control del circuito molienda - clasificación

que influye en la recuperación del mineral valioso.

En el Capítulo II, compuesto por el marco teórico se presenta el sustento teórico y científico relacionado con los parámetros que influyen en la recuperación del estaño.

En el Capítulo III, concerniente a la metodología, en esta sección se sustenta como se desarrolló la investigación con el diseño metodológico y la toma y recolección de datos informativos.

En el Capítulo IV, discusión y resultados, se presentan todos los datos informativos de la investigación llegando posteriormente a una conclusión final.

Carlos Erik Esteban Huayanay

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	Identificación y determinación del problema.....	1
1.2.	Delimitación de la investigación	2
1.3.	Formulación del problema.....	2
	1.3.1. Problema General.....	2
	1.3.2. Problemas Específicos	2
1.4.	Formulación de objetivos	2
	1.4.1. Objetivo General.....	2
	1.4.2. Objetivos Específicos	2
1.5.	Justificación de la investigación	3
1.6.	Limitaciones de la investigación.....	3

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1.	Antecedentes de estudio	4
2.2.	Bases teóricas - científicas	6
2.3.	Definición de términos básicos	26
2.4.	Formulación de hipótesis	27
	2.4.1. Hipótesis General.....	27

2.4.2. Hipótesis Específicas.....	27
2.5. Identificación de variables	27
2.6. Definición operacional de variables e indicadores.....	28

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación	38
3.2. Nivel de investigación	38
3.3. Métodos de Investigación	38
3.4. Diseño de Investigación	39
3.5. Población y muestra	41
3.6. Técnicas e instrumentos de recolección de datos	42
3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación	43
3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos.....	44
3.9. Tratamiento estadístico	44
3.10. Orientación ética filosófica y epistémica	44

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo	46
4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.....	47
4.3. Prueba de hipótesis	59
4.4. Discusión de resultados	61

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

ANEXOS

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

El problema que tenemos en planta concentradora San Expedito, es la ley de cabeza, que es demasiado variable, esto debido a que el mineral viene de diferentes zonas de extracción con diferentes leyes, el cual impiden realizar una buena homogenización del mineral a tratar. Los minerales que ingresan a la planta concentradora vienen de las unidades de producción de Islay, Vinchos, Tacora Norte e interior mina.

Esta variada mineralización influye en la recuperación del mineral valioso, leyes comerciales del concentrado y en el control de costos operativos, además adolecemos de un estricto control del circuito de molienda - clasificación. Normalmente todo control del circuito de molienda - clasificación se sujeta a un ligero análisis granulométrico en el rebose del hidrociclón, dato único casi inmediato que se cuenta para estimar el trabajo que se está realizando en la operación.

Cuando el jefe de guardia esté en condiciones de evaluar rápidamente y directamente sus parámetros de carga circulante y D_{50} tendrá mayor posibilidad de resolver los permanentes problemas de recuperación.

1.2. Delimitación de la investigación

El trabajo de investigación se realizó en la Empresa Minera Cerro S.A.C. ubicado en la región de Pasco, provincia de Pasco, distrito de Paragsha, situada a una altura de 4 380 metros sobre el nivel del mar

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema General

¿Es factible aplicar la función Rosin Rammler para el control del circuito molienda - clasificación de la planta concentradora San Expedito?

1.3.2. Problemas Específicos

- ¿Cuál es la carga circulante del circuito molienda-clasificación por análisis granulométrico?
- ¿Cuál es el tamaño de corte D_{50} mediante coeficientes de partición del rebose y arenas de retorno?
- ¿Cuál es la función Rosin Rammler de la descarga del molino aplicando el tamaño de corte D_{50} ?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo General

Aplicar la función Rosin Rammler para el control del circuito molienda clasificación de la planta concentradora San Expedito.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Determinar la carga circulante del circuito molienda - clasificación mediante

análisis granulométrico

- Establecer el tamaño de corte D_{50} mediante coeficientes de partición del rebose y arenas de retorno
- Determinar la función Rosin Rammler de la descarga del molino aplicando el tamaño de corte D_{50} .

1.5. Justificación de la investigación

Con la aplicación de la función Rosin Rammler en la descarga del molino, se pretende controlar el circuito de molienda - clasificación de la planta concentradora San Expedito, para lo cual, se controlará las arenas de retorno al molino y se evitará la sobre molienda de partículas de minerales ya liberadas y por ende tendrán influencia en el proceso de flotación del mineral valioso.

El control de la carga circulante es importante, debido a que, se debe reducir parte de la arena fina ya liberado para que vaya directamente a la flotación y no retornar como carga circulante. Motivo por la cual, si se controla el circuito de molienda - clasificación, se tendrá una buena molienda y una buena recuperación.

1.6. Limitaciones de la investigación

En el estudio no se tuvo limitaciones debido a que se contó con el apoyo de los ingenieros que laboran en la planta concentradora San Expedito, y para las pruebas de laboratorio también se tuvo el apoyo del jefe de laboratorios metalúrgico contando con todos los equipos e instrumentos de medición con que cuenta la empresa minera y personal de apoyo.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes de estudio

Manzaneda (1994), presentó un estudio titulado **Aplicación de la Función Rosin Rammler al circuito de molienda Clasificación** en el IV Simposio Congreso de Ingeniería Metalúrgica realizado en la ciudad de Arequipa, planteándose como objetivo, realizar la relación de carga circulante y el D_{50} proporcionando la posibilidad de control en un circuito de molienda - clasificación, realizada las pruebas llega a las siguientes conclusiones.

Demostrar la relación existente entre la carga circulante y el D_{50} proporcionando una buena posibilidad de control del circuito de molienda y clasificación.

Toda planta concentradora debe tener establecida su función Rosin Rammler y sus parámetros de mayor importancia, de no hacerlo significaría dejar de percibir los aspectos de todo metalurgista de identificar permanentemente en tal circuito, a pesar de que hacerlo es una tarea sencilla, pero de responsabilidad.

Con la experiencia de aplicación de dicha función en su propio centro de

trabajo, el metalurgista debe descartar el inútil análisis de malla 200 en el rebose del clasificador.

Basurto (2010), Presentó la tesis Modelo “Cebaco” aplicado al control de procesos en el circuito de Molienda-Clasificación en una planta concentradora de minerales mediante el software LabVIEW, El estudio tiene como objetivo, diseñar, elaborar e implementar la metodología “Cebaco” de tal manera que el control de procesos en el circuito de molienda-clasificación en una planta concentradora sea más eficiente, rápido y rentable, que otras metodologías tradicionales mediante el software Goliat 0.2.

En la tesis que presenta llega a las siguientes conclusiones:

1. El control de las variables operativas en el circuito de molienda - clasificación realizadas con la metodología propuesta “CEBACO” es eficiente hasta en un 90 % con un nivel de significancia de 0,08 y económicamente rentable en 11,53 dólares americanos por tonelada de mineral tratado.
2. El tamaño de partición llamado D_{50} calculado por el método tradicional es de 81,31 micrones y por el método propuesto es de 83,56 micrones siendo la variación de tan solamente 2,7 %.
3. La eficiencia de clasificación calculada por la metodología tradicional es de 57,93 % y por la metodología propuesta es de 53,18 %, siendo la variación solamente del 8% y con un nivel de significancia del 0,08.
4. Los resultados más óptimos que se obtuvieron fue donde el tamaño de corte (D_{50}) calculado con la metodología “Cebaco” es de 85,2559 micrones y el d_{50} calculado con los datos del análisis granulométrico

realizado por la metodología tradicional es de 88,3061 micrones casi son similares siendo la diferencia de tan solamente 3,45%, la eficiencia de clasificación calculada por la metodología “Cebaco” es de 51,6255% y haciendo los cálculos con la metodología tradicional da que la eficiencia de clasificación es de 51,8102 % los resultados son similares siendo la diferencia de tan solamente el 0,36%, y la razón de la carga circulante calculada por la metodología “Cebaco” es de 1,887 y la razón de carga circulante calculada por la metodología tradicional es de 1,903, existiendo una diferencia de tan solamente 0,84%, valores que están muy cercanos.

5. El tiempo que se demora para realizar el control de las variables operativas con el método tradicional es de aproximadamente 4 horas y con el método propuesto el tiempo es de tan solamente 5 minutos, existiendo una diferencia considerable.
6. El modelo matemático que tienen mayor ajuste y se acerca más a lo real, para el análisis de distribución granulométrica de partículas mineralizadas es la de Rosin – Rammler.

2.2. Bases teóricas - científicas

2.2.1. Molienda

La liberación de un mineral empieza con el chancado y culmina con la molienda; esta etapa es importante porque de la molienda depende el tonelaje y la liberación del mineral valioso que después, debe concentrarse (por flotación, separación gravimétrica, magnética, lixiviación, etc.). En esta operación unitaria, se debe liberar completamente el mineral valioso (sulfuros de Pb, Cu, Ag, Zn) de la ganga, antes de proceder a la concentración. Castillo (1987).

La operación de molienda habitualmente se efectúa en etapa primaria en

los molinos de barras y molino de bolas, produciéndose la descarga del molino de barras en un producto de 991 micrones (16 % malla -200), alcanzándose cualquier tamaño, dentro de los límites económicos, en los de bolas. Esta operación unitaria se logra con alta eficacia cuando los molinos son operados en condiciones normales en cuanto a homogeneidad del tamaño de alimentación, dilución y si satisfacen además las siguientes constantes: Velocidad (velocidad crítica y de trabajo; $V_c = 76,62/\sqrt{D}$, $V_t = 0,75V_c$, carga de bolas y potencia del motor.

Cuanto más se muele el mineral, el costo de molienda se incrementa y hasta cierto grado, una molienda demasiado fina repercute en la mejora de la recuperación de valores. En función de esto, la molienda óptima es aquella malla de molienda en el cual los beneficios son máximos, cuando se considera tanto el, costo de energía, así como los retornos netos de dólares de los productos. Industrias (2015)

La eficacia del proceso unitario de molienda va depender en gran medida de una serie de factores como:

- Distribución de tamaños en la alimentación del mineral.
- Velocidad y tamaño del molino.
- Tamaño del cuerpo moedor
- Diseño de los revestimientos del molino.
- Cambios en las características del mineral
- Distribución de tamaños del producto del molino.

– Volumen de carga moledora y su distribución de tamaño.

– Eficiencia de la clasificación, etc.

Las interacciones con estos factores son complejas y para realizar el estudio de la influencia es indispensable fijar algunas variables.

Figura 1

Molienda de minerales en molino de Bolas de 8 x 8



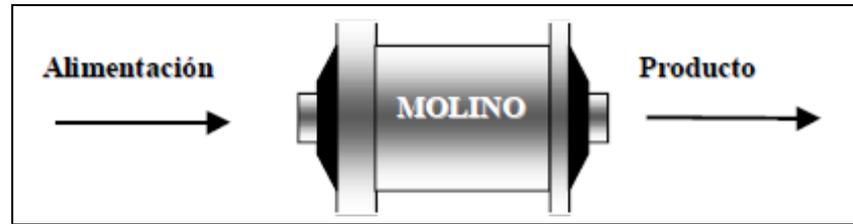
Nota. Fotografía tomada de Vargas Gonzales (2010)

2.2.2. Circuitos de molienda

La molienda se realiza en distintas etapas implicando molinos de barras, bolas y autógenos en ciertos casos. Es poco frecuente moler el mineral en una sola etapa para alcanzar los rangos de tamaños necesarios en la operación de concentración subsiguiente, debido a que el consumo energético resulta demasiado que cuando se reduce de tamaño en distintas etapas.

Circuitos abiertos. Cuando el mineral pasa a fracturamiento a través de los molinos sin una etapa de clasificación paralela.

Figura 2
Circuito Abierto

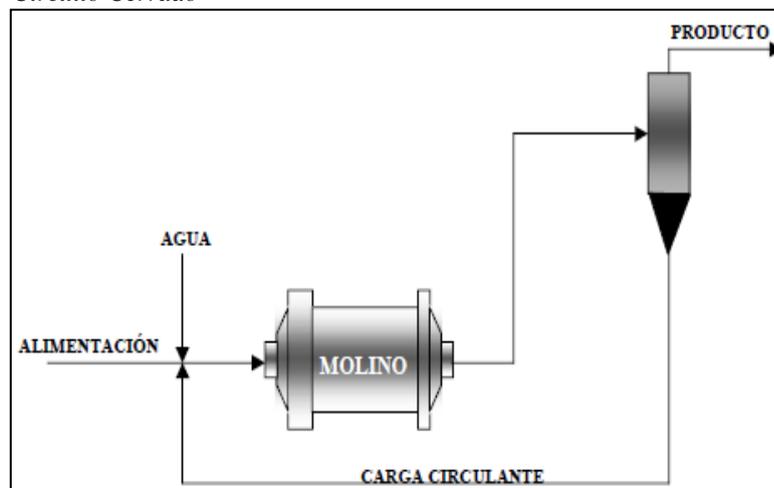


Nota. Molienda de una sola etapa. Fuente: José Luis Bouso (2004)

Circuitos cerrados. Cuando el molino opera con un clasificador donde el producto grueso retorna nuevamente al molino, mientras que el material fino se va directamente a la flotación de minerales.

Este tipo de molienda se utilizan para evitar la generación demasiada de partículas finas donde el hidrociclón trabaja en circuito cerrado con el molino, alcanzado se una disminución fundamental en el consumo energético al desaguar del circuito el material ya molido, al tamaño esperado. Un circuito abierto si moliera el mineral al tamaño semejante al circuito cerrado, consumiría una cantidad extra de energía y originaría una elevada proporción de finos.

Figura 3
Circuito Cerrado



Nota. Molienda en circuito cerrado. Fuente: José Luis Bouso (2004)

2.2.3. Sistema de bombeo para el circuito de molienda

Hay un sin números de diferentes tipos de bombas utilizadas para el bombeo de pulpa, hay las de desplazamiento positivo y los de tipo de efectos especiales tales como aductores Venturi, pero el tipo mucho más común son las bombas centrífugas.

La bomba centrífuga utiliza la fuerza centrífuga por una rotación del impulsor para impartir energía cinética a la pulpa de la misma manera como a un líquido claro. Sin embargo, es aquí donde terminan las similitudes. Warman (2011)

El proceso de selección de bombas de lodos centrífuga deben incluir la consideración para el tamaño del impulsor y el diseño para el paso de sólidos, las posibilidades adecuadas sobre el sello del eje y óptima calidadde los minerales que lo conforman causado por el desgaste de la abrasión o un ataque corrosivo por contacto en el medio. (Ver figura 4).

Figura 4
Bomba centrífuga



Nota. Sistema de bombeo de pulpa Denver. Fuente: Vargas Gonzales (2010)

BOMBAS DE CIRCUITO DE MOLIENDA

En una operación de circuito cerrado molienda-clasificación, donde el molino es la estrella del sistema, la bomba centrífuga y el hidrociclón deben trabajar para que este tenga un rendimiento óptimo.

La bomba debe de cumplir con una serie de requisitos propios de un sistema de molienda que son iguales al resto de los sistemas de bombeo en una planta de procesamiento de minerales.

La bomba no solo tiene que servir al molino sino también a las necesidades operacionales del hidrociclón; tanto el molino como el hidrociclón, para su rendimiento óptimo, necesita una serie de variables muy estrictas las que en parte tiene que entregar la bomba.

2.2.4. Carga circulante

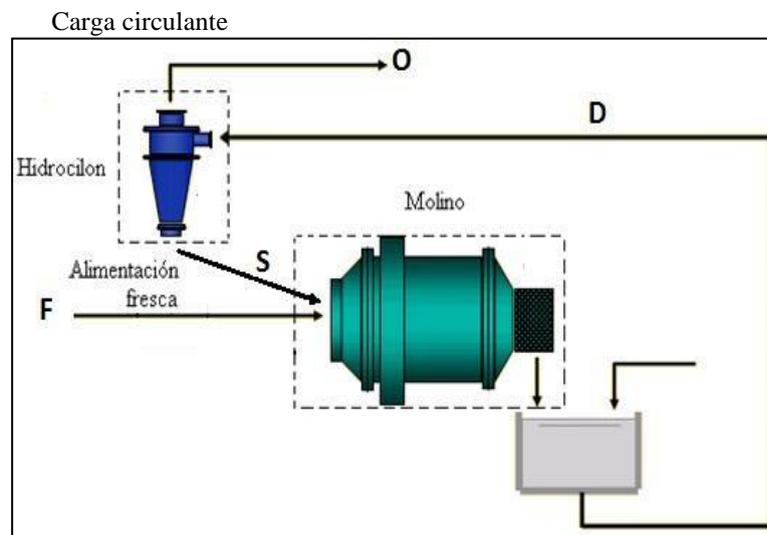
Mucho de los procesos de concentración de minerales requieren un rango adecuado de tamaño de partículas. Del producto de un molino, habitualmente solo un determinado porcentaje de tamaño es adecuado para procesos como la flotación, por lo que este producto deberá ser clasificado para que el material grueso retorne al molino. El tonelaje de producto grueso que retorna al molino, es definido como carga circulante, mientras que la relación de carga circulante, tonelaje de alimentación original al molino, se define como el porcentaje de carga circulante. Manzaneda (1994).

La determinación de la carga circulante de un circuito cerrado de molienda y el porcentaje de carga circulante se efectúa por varios métodos: En función de las densidades de pulpa, en función de porcentajes de sólidos y en función del análisis granulométrico de los principales productos del circuito, puesto que la

gravedad específica de los sólidos se determina previamente y se considera como una constante. Manzaneda (1994)

Los principales productos de un circuito cerrado de molienda están constituidos por, descarga del molino o alimentación al clasificador (F), las arenas o carga circulante (S) y el rebose del clasificador (O).

Figura 5



Nota. Esquema adaptado de molienda- clasificación. Fuente: Chica (2009)
Donde:

F = tonelaje de alimento fresco

D = tonelaje en la descarga del molino

S = tonelaje de arenas del clasificador

O = tonelaje en rebose del clasificador

2.2.5. Cálculo de la carga circulante

a) Por análisis Granulométrico

Realizando el balance de materiales

$$D = S + F \quad (1)$$

Para el equilibrio: $F = O$

$$D = S + O \quad (2)$$

La ecuación (2) aplicando para una fracción determinada de tamaño granulométrico

$$Dd = Ss + Oo \quad (3)$$

Donde:

D, S, O = Tonelaje de mineral en descarga de molino, arenas de retorno y rebose del clasificador.

d, s, o = % retenido acumulado en una malla determinada referido a la descarga del molino, arenas de retorno y rebose del clasificador.

En (3) reemplazamos la ecuación (2) y despejando se tiene:

$$\frac{S}{O} = \frac{d - o}{s - d} \quad \text{Carga circulante}$$

b) Por dilución de pulpa

Haciendo el balance de agua:

$$\text{Agua}_{\text{descarga molino}} = \text{Agua}_{\text{rebose}} + \text{Agua}_{\text{arenas}} \quad \dots\dots (4)$$

La dilución de pulpa expresa la proporción de líquido: sólido en una pulpa.

$$\text{Dilución} \times \text{tonelaje} = \text{Peso de Agua en pulpa} \dots\dots\dots(5)$$

Aplicando (5) en ecuación (4) tenemos:

$$D(Dd) = O(Do) + S(Ds) \dots\dots\dots (6)$$

Donde:

D, S, O = Tonelaje de mineral en descarga de molino, arenas de retorno y rebose del clasificador.

(Dd), (Ds), (Do) = Diluciones de pulpa de la descarga del molino, Arenas y Rebose.

Haciendo: $D = O + S$ reemplazando en (6)

$$\frac{S}{O} = \frac{D_o - D_d}{D_d - D_s} \quad \text{Carga circulante}$$

2.2.6. Clasificación

Se denomina clasificación, a la separación de un conjunto de partículas de tamaños heterogéneos en dos porciones, cada una conteniendo partículas de granulometría u otra propiedad más específica que el conjunto original. La clasificación se realiza por diferencias de tamaño y de gravedad específica que originan diferentes velocidades de sedimentación entre las partículas en un fluido (agua o aire), cuando sobre ellas actúan campos de fuerzas como el gravitatorio u otros. Según Basurto (2011)

Las operaciones de clasificación se efectúan en diferentes tipos de aparatos

de clasificación hidrociclonica y zarandas de alta frecuencia. (Ver Fig. 6)

Figura 6
Zaranda de alta frecuencia



Nota: Equipo de 5 pisos. Fuente: Derrick

a. Hidrociclón

Los hidrociclones son equipos de clasificación importante que engloba en la categoría de los ciclones, orientados a la separación de soluciones bifásicas sólido-líquido o líquido-líquido.

Su uso es demasiado amplio entre la industria química, metalúrgica, petroquímica, textil y alimentaria, no obstante, es la industria metalúrgica y minera su principal usuaria y la que ha incentivado su evolución y desarrollo desde la aparición de la primera patente de hidrociclón a inicios del siglo XX, fundamentalmente a partir de la Segunda Guerra Mundial cuando su utilización a

escala industrial se extendió.

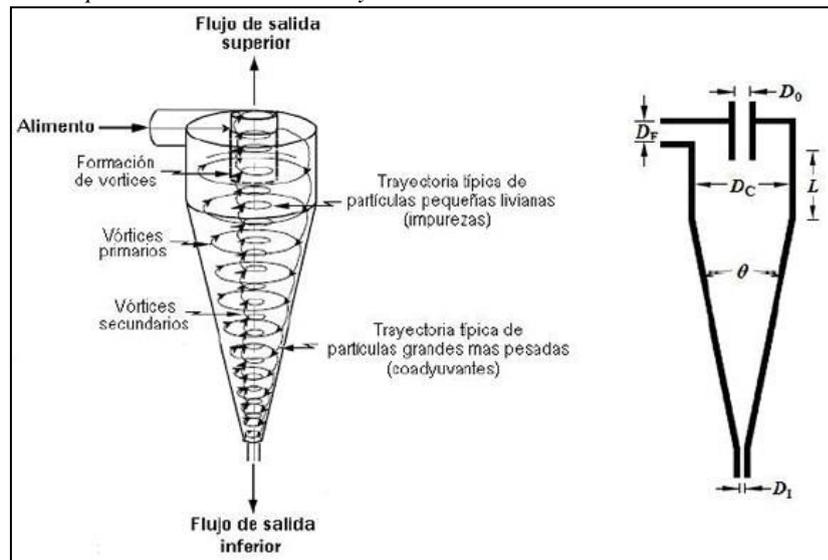
Los hidrociclones son dispositivos de gran versatilidad, con diámetros que van desde los 10 mm a 2,5 m, caudales de operación desde 0,1 a 7000 l/h, tamaño de separación de partículas desde 5 a 500 micras y caídas de presión desde 0,35 a 6 bares. Sus principales ventajas de uso son su bajo costo de inversión en comparación con otros equipos de funciones similares, son sencillos de construir y operar gracias a la inexistencia de partes móviles y su reducido tamaño. Como desventaja tienen el alto consumo de energía eléctrica de la impulsión fluida y problemas de desgaste y taponamiento, especialmente en los hidrociclones de pequeño diámetro.

Los hidrociclones fundamentan su mecanismo de separación de las fases de la solución en la fuerza centrífuga, aunque a diferencia de las centrífugas, sin utilizar partes móviles, sino mediante la generación de un doble movimiento en espiral en el interior de su geometría. (Ver figura 7)

Constan de las siguientes partes:

- Una entrada tangencial para el flujo de alimentación llamado Inlet con sección cilíndrica (formadores del remolino)
- Un conducto para el efluente superior (‘overflow’) llamado vórtex, que se extiende por debajo de la entrada tangencial.
- Una sección tronco-cónica adyacente a la sección cilíndrica
- Un conducto para el flujo de descarga (‘underflow’) llamado ápex que puede ser de diámetro variable.

Figura 7
Operación del hidrociclón y dimensiones características



Nota. Patrones de flujo. Fuente: Tomado de (Rief & Blanco & Arboleda, 2010)

La suspensión es bombeada bajo presión y entrando al hidrociclón a través del tubo de alimentación tangencialmente, que genera un movimiento de tipo espiral descendente debido a la forma del equipo y la acción de la fuerza de gravedad, conocida como vórtice primario.

Este movimiento giratorio genera una aceleración centrífuga que puede ser de hasta 200G's, que provoca que las partículas más pesadas de la solución, la fracción gruesa, se vayan contra la pared interna hasta que son evacuadas por la abertura inferior. La progresiva disminución de la sección transversal en la parte cónica evita que todo el flujo de alimentación se evacue por el ápex superponiéndose una corriente interior que genera un flujo neto ascendente también de tipo espiral, con el mismo sentido de giro a lo largo del eje central del equipo.

Esto permite que el flujo encuentre en su camino al vórtice que actúa como conducción del flujo de rebalse. Este segundo flujo se conoce como vórtice

secundario y contiene a las partículas menos pesadas, la fracción fina. A razón de este movimiento se produce una zona de muybaja presión a lo largo del eje del equipo, desarrollándose en consecuencia un núcleo de aire en ese lugar. Dicha diferencia de presiones responsable de una separación secundaria, arrastrando a partículas más finas.

b. Influencia del D50 en la capacidad de un circuito de molienda

El procesamiento de minerales establece que las sustancias minerales se requieren en su estado libre para ser concentrados. Desde un punto de vista económico no se pueden aplicar procesos de extracción y refinación muy caros a pequeñas cantidades de metales tales como, el cobre, plomo, zinc y níquel, tal como se encuentra en la corteza terrestre; por lo que se hace necesario obtenerlos en forma de mineral.

c. Clasificación de partículas

Se denomina clasificación a la separación de un conjunto de partículas de tamaños heterogéneos en dos porciones, cada uno con partículas de granulometría con tendencia a la homogeneidad, la clasificación se realiza por diferencia de tamaños y por gravedad específica que originan diferentes velocidades de sedimentación entre las partículas de un fluido (agua o aire).
<http://procesaminerales.blogspot.com/2012/09/clasificacion>

Cuando sobre ellas actúan campos de fuerzas como el gravitatorio u otras las operaciones de clasificación se efectúan en diferentes tipos de aparatos tales como: los clasificadores helicoidales, los de rastrillos, los ciclones etc.

Figura 8
Rebose y descarga del hidrociclón



Nota. Fotografía tomada de Vargas Gonzales (2010)

d. Curva de partición de un clasificador

En forma ideal, un clasificador deberá separar de una mezcla original de partículas, dos porciones una de partículas gruesas de tamaño mayor a un cierto valor llamado D_{50} y otra de partículas menores al D_{50} (finos), pero en la práctica no ocurre así, sucediendo que partículas menores al d_{50} pasan a la fracción gruesa y viceversa. Una forma de determinar cuán alejado del comportamiento ideal opera un clasificador es mediante la determinación de sus curvas de partición al graficar el tamaño promedio de un rango de tamaños de partículas x versus el porcentaje pasante de partículas en ese rango de tamaños alimentadas al clasificador.

e. Determinación del D_{50}

Diferentes tipos de cálculos para determinar en planta el D_{50} simple:

- Gráficamente en papel semi logarítmico
- El D_{50} calculado matemáticamente
- El D_{50} corregido en función del efecto del corto circuito.

También se tiene el método para calcular el D_{50} relacionado con la carga

circulante que es un método simple para el cálculo del d_{50} conociendo la carga circulante y el análisis granulométrico de la alimentación al clasificador, es un método gráfico. Además, se establecen los criterios para interpretar la distribución de las partículas de tamaño de corte, tales como las siguientes suposiciones, si tenemos en el alimento partículas de tamaño iguales a la del D_{50} la mayor parte de estas se van en las arenas, podríamos decir entonces que el D_{50} del clasificador es ideal.

También se debe considerar la pregunta ¿Qué tipo de clasificador es el más eficiente: los clasificadores mecánicos o los hidráulicos? Siempre, se ha manifestado que para plantas de gran capacidad son más eficientes los ciclones y para plantas pequeñas los mecánicos

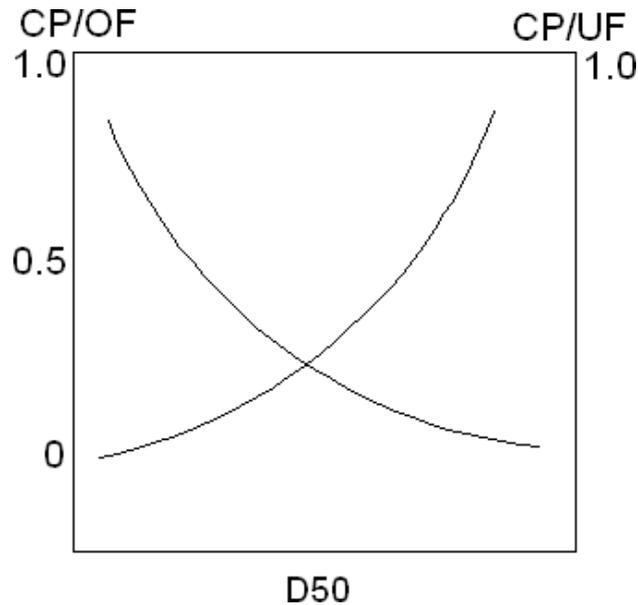
Para determinar el d_{50} de un clasificador, ya sea mecánico o hidráulico, durante el funcionamiento de una planta, hay varios métodos o formas para determinarlos.

2.2.7. Tamaño de corte de la clasificación D_{50}

El corte de la clasificación D_{50} es un parámetro expresado en micras que indica en que tamaño de partícula se está efectuando la separación entre el grueso y lo fino, (Manzaneda, 2002).

Tradicionalmente se ha estimado gráficamente, mediante el cálculo de los coeficientes de partición para el rebose y arenas, el cruce de ambas curvas fija el D_{50} . Este sistema de estimación del corte es suficiente como herramienta de apoyo en el procesamiento de los minerales por ser un cálculo posterior a la operación, luego de un cuidadoso muestreo y análisis granulométrico de alimento y productos de clasificación, tal como se muestra en la siguiente figura. N°9

Figura 9
Tamaño de corte D_{50}



Nota: En esta figura se determina el D_{50} . Tomado de Manzaneda, 2000

2.2.8. Tamaño de partícula

En los circuitos de molienda - clasificación, el tamaño de partícula constituye una de las variables de mayor importancia operacional. El comportamiento del mineral a través de la etapa de molienda-clasificación de minerales depende en gran medida del tamaño de las partículas tratadas en cada una de estos circuitos del proceso. De allí la necesidad entonces de definir y cuantificar apropiadamente esta variable. Basurto (2011).

El tamaño de una partícula; según Jaime Sepúlveda (1986), es una medida representativa de su extensión en el espacio.

Esta puede ser caracterizada por una dimensión lineal, tal como, por ejemplo, la longitud de una cuerda que cruza la sección proyectada de la partícula desde una posición predeterminada. Dependiendo de la técnica de medición empleada, se puede también caracterizar el tamaño de una partícula en función de su área superficial, su volumen a su masa, siendo posible definir asimismo

relaciones matemáticas de equivalencia entre las distintas metodologías. Basurto (2011).

En las faenas mineras-metalúrgicas, la técnica predominantemente para la cuantificación de estas partículas mineralizadas utilizada, consiste en el uso de mallas o tamices con abertura standard calibrada (Ejemplo: Serie de tamices Tyler, con razón constante de aberturas; la cual se puede ver en la figura 11.

En este caso, el "tamaño de partícula" queda caracterizado por la máxima abertura de malla sobre la cual la partícula queda retenida. Gutiérrez & Sepúlveda, 1986

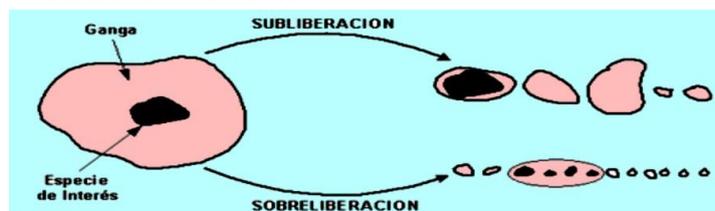
2.2.9. Caracterización del tamaño de partículas

La caracterización del tamaño de partículas y conjuntos de partículas es muy importante en el procesamiento de minerales, ya que el tamaño se usa como una medida de control para la conminución que tiene como finalidad la liberación de las especies de interés. Según Tapia Quezada (2011).

La conminución de minerales tiene un alto costo económico, por lo que se debe evitar una sobre liberación o sub liberación de la especie mineralógica de interés la sub liberación ocurre cuando el grado de reducción de la partícula no es suficiente para liberar completamente a la especie de interés.

En cambio, la sobre liberación ocurre cuando el grado de reducción de la partícula es mayor que el necesario para liberar completamente la partícula.

Figura 10
Conminución de mineral



Nota. Grado de liberación del mineral. Fuente: Tomado de Cesar Basurto (2011)

2.2.10. Análisis granulométrico

El análisis granulométrico es una disciplina que estudia la composición granular de mezcla de partículas, con el fin específico de describir su tamaño y superficie.

En toda operación de la metalurgia la granulometría juega un papel importantísimo.

Una adecuada caracterización de las partículas es un requisito esencial para cuantificar procesos.

De los métodos de análisis mencionados anteriormente nos referimos en particular al tamizaje.

Figura 11
Tamices para análisis granulométrico



Nota. Juego de Tamices. Fuente: Tomado de Cesar Basurto (2011)

2.2.11. Función de distribución granulométrica

Los minerales sujetos a quebrantamiento han sido clasificados respecto a su relación energética (proporcional a la inversa de la raíz cuadrada del tamaño de partícula (Bond 1930) y la distribución de tamaños generados como resultado del quebrantamiento. También ha sido referida a una relación matemática entre la cantidad y el tamaño de cada fracción analizada.

En ese entonces el objeto de hallar estas relaciones de distribución

granulométrica fue exclusivamente para lograr una mejor presentación y hacer algunas proyecciones respecto del material retenido o que pasaría determinada malla que no ha sido usada durante el proceso de análisis granulométrico.

El desarrollo posterior de las mismas ha sido orientado a explicar la cantidad de muestra mineral según la reducción de tamaños (Harris 1968); en los últimos años son usadas en el modelamiento de molienda Sankara 1983) y en claros intentos de la estimación de corte de clasificación D50 (plitt 1979).

Las funciones de distribución granulométrica son aproximadamente ocho (Sankara 1983), pero las más importantes son aquellas que pueden adquirir la forma de ecuación de recta por la facilidad de encontrar sus parámetros mediante mínimos cuadrados.

Para propósito de nuestro trabajo son dos.

GAUDIN SHUMANN

$$y = (x/k)^m \dots\dots\dots(7)$$

En forma de recta:

$$\log(y) = m \log(X) - m \log(K) \dots\dots\dots (8)$$

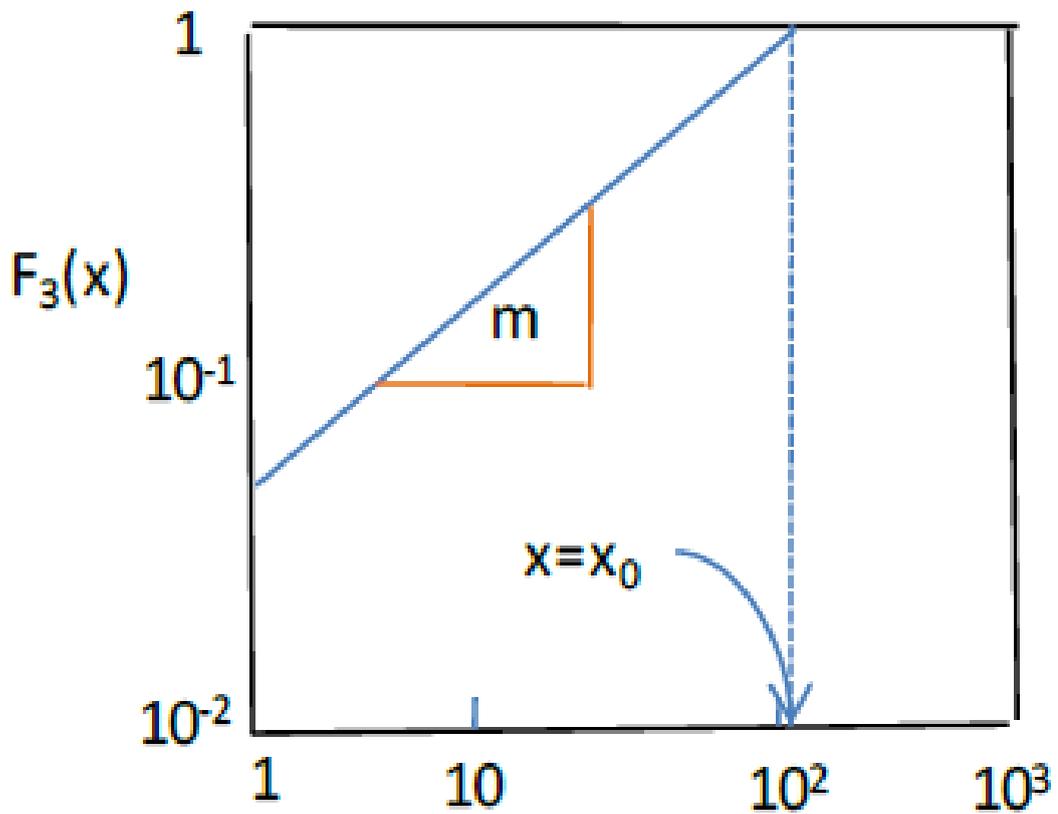
Dónde:

Y = % acumulado que pasa determinada apertura de malla

X = apertura de malla en micrones

K, m = parámetros

Figura 12
Función Gaudin Shumann



Nota. Tomado de Cesar Basurto (2011)

ROSIN RAMMLER

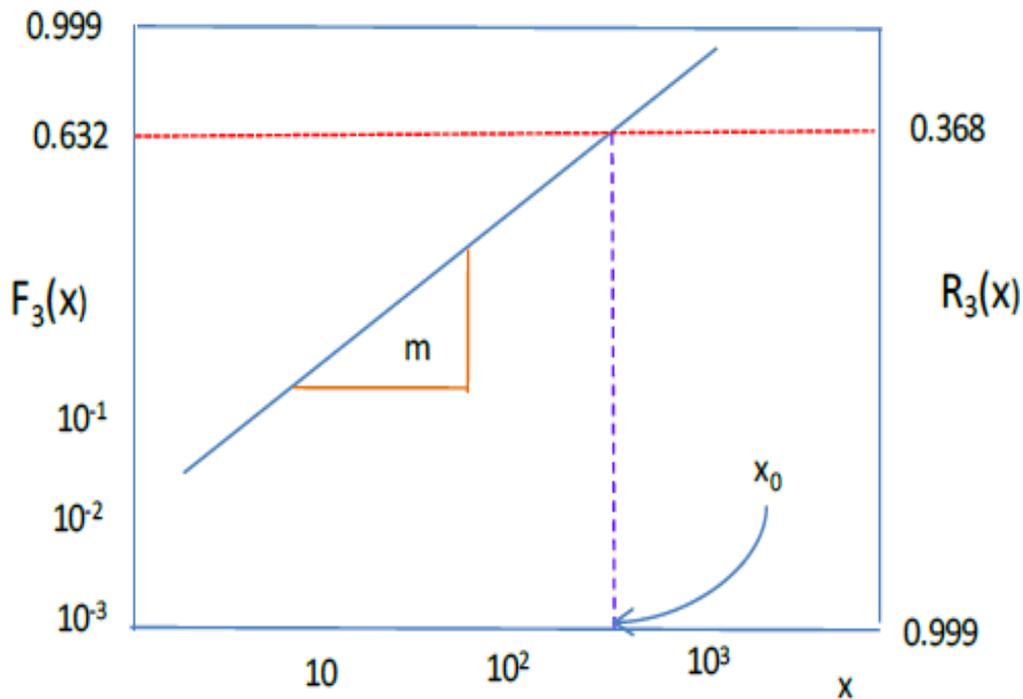
$$W = 100 e^{-(D/a)^b} \dots\dots\dots 9$$

En forma de recta:

$$\text{Ln}(\text{Ln}(100/W)) = b \text{Ln}(D) - b\text{Ln}(a) \dots\dots\dots 10$$

Por lo tanto, hallar una función de distribución granulométrica significa tener una ecuación que relaciona apertura en micrones con el acumulado de la muestra que pasa dicha apertura (Gaudin Shumann) o con el retenido acumulado de la misma (Rosin-Rammler).

Figura 13
Función Rosin Rammler



Nota. Tomado de Cesar Basurto (2011)

2.3. Definición de términos básicos

Clasificación. Es la separación del material obtenido en los procesos anteriores por tamaños similares.

Carga circulante. Material que regresa al molino por el clasificador y su peso se expresa como un porcentaje de peso de la nueva alimentación.

Densidad. Relación entre masa por unidad de volumen de una sustancia expresada en g/cc.

Granulometría. Es la composición granular de mezclas con el fin de conocer el tamaño promedio de las partículas y separación de ellas de acuerdo a su tamaño.

Muestreo. Es una operación de control metalúrgico que se hace en toda planta concentradora que consiste en la obtención de pequeñas muestras que representan todas las cualidades del tonelaje tratado.

Densidad de pulpa. Es el peso del mineral molido en un litro de agua, que también

se puede expresar en porcentajes de sólidos.

2.4. Formulación de hipótesis

2.4.1. Hipótesis General

Con la aplicación de la función Rosin Rammler se controla el circuito de molienda clasificación de la planta concentradora San Expedito.

2.4.2. Hipótesis Específicas

- Conociendo el análisis granulométrico en el circuito de molienda se determinará la carga circulante
- Estimando el tamaño de corte se determinará los coeficientes de partición del rebose y arenas de retorno.
- Aplicando el tamaño de corte D_{50} se determinará la función Rosin Rammler de la descarga del molino.

2.5. Identificación de variables

2.5.1. Variable independiente:

- Aplicación de la función Rosin Rammler.

2.5.2. Variable dependiente:

- Control del circuito de molienda clasificación.

2.5.3. Variable interviniente

- Carga de bolas
- Tamaño de partícula
- Tiempo de molienda
- Velocidad critica
- Carga
- Insolubles

- Condiciones de chaqueta

2.6. Definición operacional de variables e indicadores

Ítem	VARIABLES	DIMENSIONES	INDICADORES
V.I	Aplicación de la función Rosin Rammler	Análisis granulométrico en el circuito de molienda	– % Acum (+) del alimento, descarga y rebose
		Tamaño de corte D ₅₀ mediante coeficientes de partición del rebose y arenas de retorno	– D ₅₀ en micrones
		Función Rosin Rammler de la descarga del molino	– % en peso del alimento – % en peso del Rebose
V.D	Control del circuito de molienda - clasificación de la planta concentradora San Expedito	Control del circuito molienda-clasificación	– Relación: Carga circulante - D ₅₀ - Densidad de pulpa

CAPÍTULO III

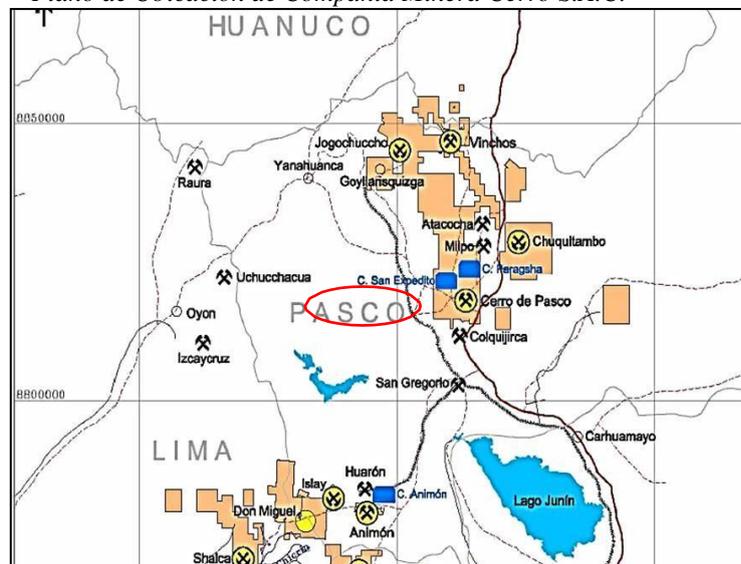
METODOLOGÍA Y TÉCNICAS DE INVESTIGACIÓN

Ubicación del Estudio

San Expedito, como parte de U.E.A Cerro de Pasco de la Empresa Volcán Compañía Minera S.A.A., se localiza en el centro poblado de Paragsha, distrito de Simón Bolívar, Provincia y Región de Pasco.

Figura 14

Plano de Ubicación de Compañía Minera Cerro S.A.C.



Nota. Planta concentradora San expedito. Fuente: Tomado de Ingemet –Mapa de Minas

MINERALES PROCESADOS EN LA ACTUALIDAD:

El mineral proveniente 100% de Vinchos, de los niveles:

- María Inés NV 105
- NV 145
- Balarin 185
- Rampa NV 125.

Minerales Argentíferos:

Plata nativa	Ag
Argentita	Ag ₂ S
Proustita	Ag ₃ AsS ₃

Minerales Portadores de Plata:

Galena	PbS
Tetraedrita	(Cu, Fe, Au, Ag) ₁₂ SbS ₁₃
Chalcopirita	CuFeS ₂

Otros Minerales Presentes:

Esfalerita, (ZnS), Bournonita (PbCuSbS₃), Covelita (CuS), Pirita (FeS₂), Marcasita (FeS₂), Pirrotita (Fe_{1-x}S), Arsenopirita (FeAsS), Magnetita Fe₃O₄), Hematita (Fe₂O₃), Goethita (FeO.OH), Silicatos, Carbonatos.

Etapas de procesamiento de minerales en la concentradora sanexpedito.

A. CIRCUITO DE CHANCADO

El mineral proveniente de las minas de Islay, Vinchos y Tacora Norte son recepcionados en la cancha de almacenamiento con un tamaño máximo de

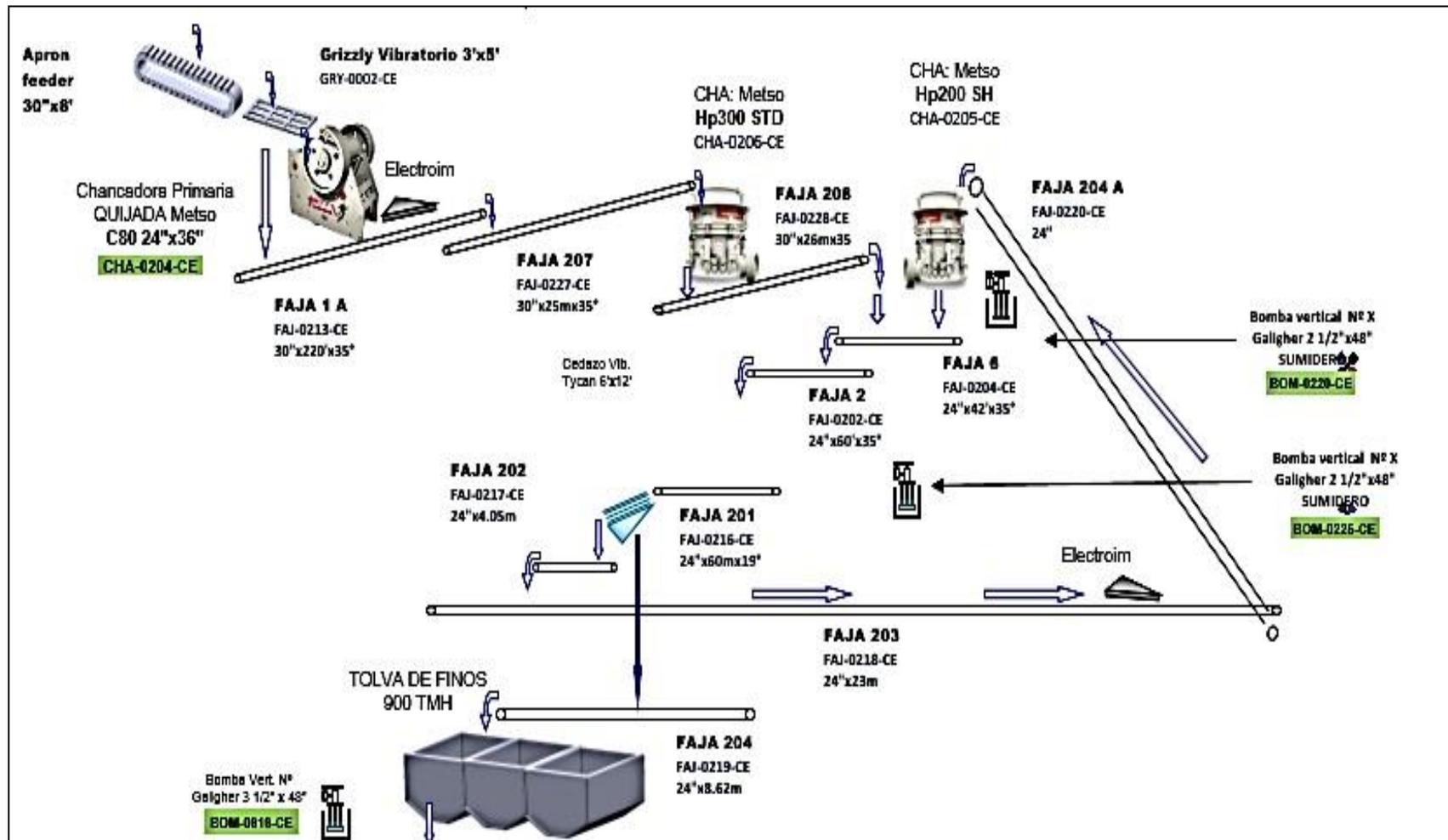
15”a 20”, que es sometido a un taladro (rompe bancos) a un tamaño menor de 12” que es la abertura de la parrilla de la tolva de gruesos, luego pasa a tres etapas consecutivas de conminución a fin de reducir a un tamaño menor de 3/8 de pulgada lo que constituye la alimentación a los molinos.

El chancado primario, se ejecuta en una chancadora de quijada C-80 que opera en circuito abierto, la cual se ubica en una cámara subterránea, el tamaño máximo del producto de esta etapa es de 4 pulgadas.

El chancado secundario, se efectúa en una chancadora cónica Symons Standard de 4 pies, que opera en circuito abierto. El mineral antes de ingresar a este equipo pasa por un magneto que se encarga de retener o captar toda clase de aceros, para que no plante la chancadora secundaria. El producto de -3/4” será transportado a la zaranda N° 1 y N° 2 donde se realiza la clasificación, el mineral -1/2” es transportado a la tolva de finos, y el mineral mayor a 3/4” pasa mediante las fajas a la tercera etapa de chancado.

El chancado terciario, que es la última etapa de la sección de chancado que se realiza mediante la chancadora Symons Short Head de 4’, todo el producto es transportado a los cedazos N°1 y N°2 donde se realiza la clasificación respectiva el producto final del circuito de chancado que en su mayoría de - 3/8 de pulgadas son almacenadas en las tolvas de finos de capacidad de 100 toneladas cada una.

Figura 15



ota. Tomado de Archivos de Cerro S.A.C

B. CIRCUITO DE MOLIENDA Y CLASIFICACIÓN

El mineral es alimentado a la etapa de molienda, conformado por un molino MARCY 9'x 12' y un molino secundario Allis Chalmers 7.5'x 7.5' y la clasificación se realiza mediante un hidrociclón de D-20", que opera en circuito cerrado, el overflow es enviado a una etapa de remolienda conformada por un nido de hidrociclones D-10 (6 ciclones) y tres molinos de bolas que trabajan en paralelo, en circuito cerrado, el overflow de los ciclones pasan al circuito de flotación.

C. CIRCUITO DE FLOTACIÓN PLOMO – ZINC

El overflow de los hidrociclones ingresa a la etapa rougher conformada por una celda RCS-30 y tres celdas OK-20, el concentrado de estas celdas es enviado a las etapas de primera, segunda y tercera limpieza, el concentrado final es enviado al espesador de plomo-plata, el relave de rougher es enviado a las celdas OK-8 N°1, 2 y 3 que trabajan como etapa scavenger , el concentrado scavenger retorna a la cabeza y el relave es considerado como cabeza para el circuito de Zn, que ingresa a los acondicionadores N°1, 2, 3 que luego pasan a la etapa rougher conformada por tres celdas OK-50, el concentrado de estas es enviado a las etapas de primera, segunda y tercera limpieza, el concentrado final es enviado al espesador de Zinc, el relave de rougher es enviado a dos celdas OK-50 N°4 y 5, que trabajan como etapa scavenger, el concentrado scavenger retorna a la cabeza y el relave final es enviado a la relavera de Ocroyoc.

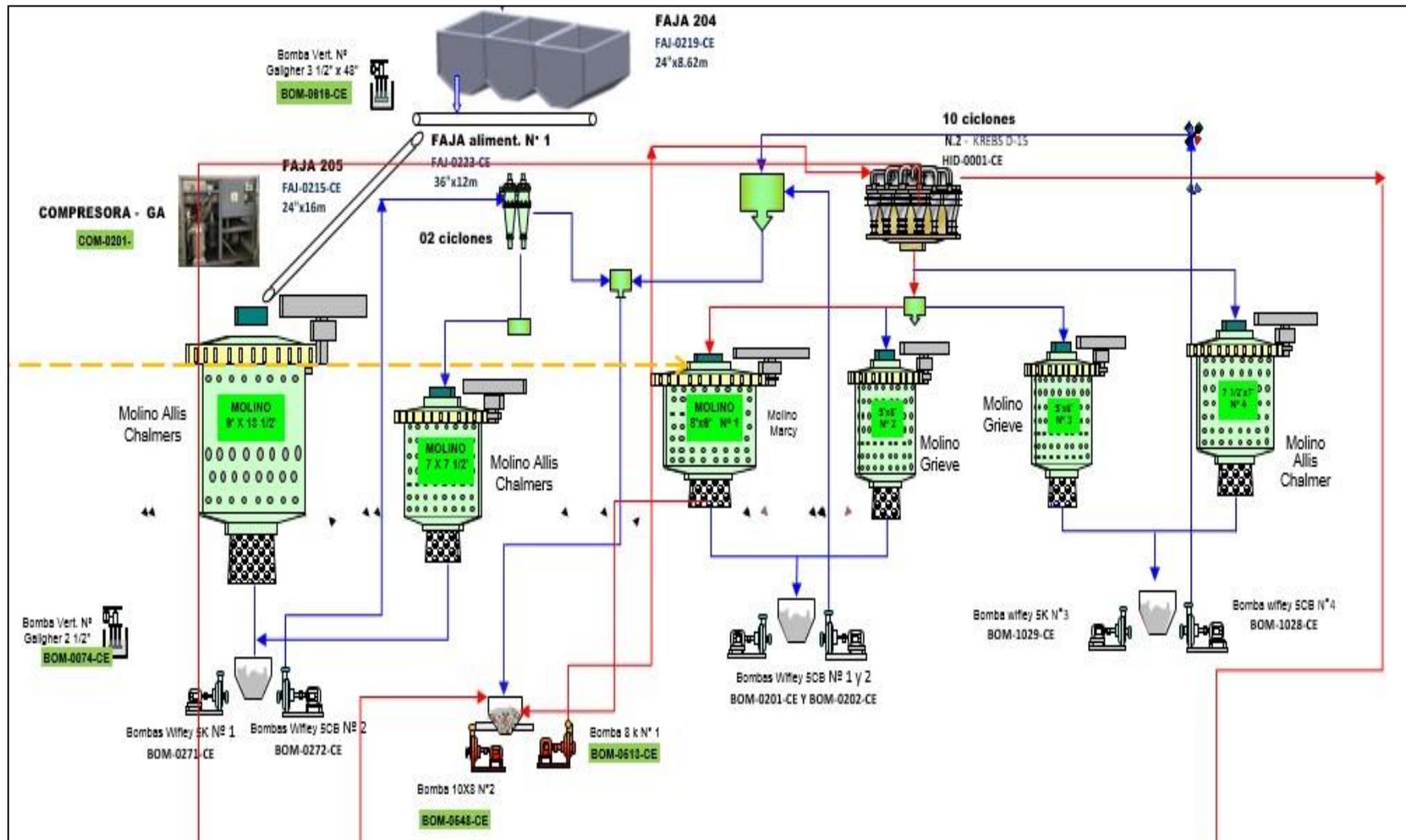
D. CIRCUITO DE ELIMINACIÓN DE AGUA

El producto obtenido en el circuito de flotación, concentrado de plomo – plata es enviado a un espesador DBS 30'x 10', donde se elimina la mayor cantidad de agua, el producto del underflow del espesador se envía por medio de una bomba

Denver a un filtro prensa Cidelco de 1200 mm por 1200 mm, logrando obtener un concentrado de plomo – plata con una humedad que varía entre 9 a 12 % de humedad.

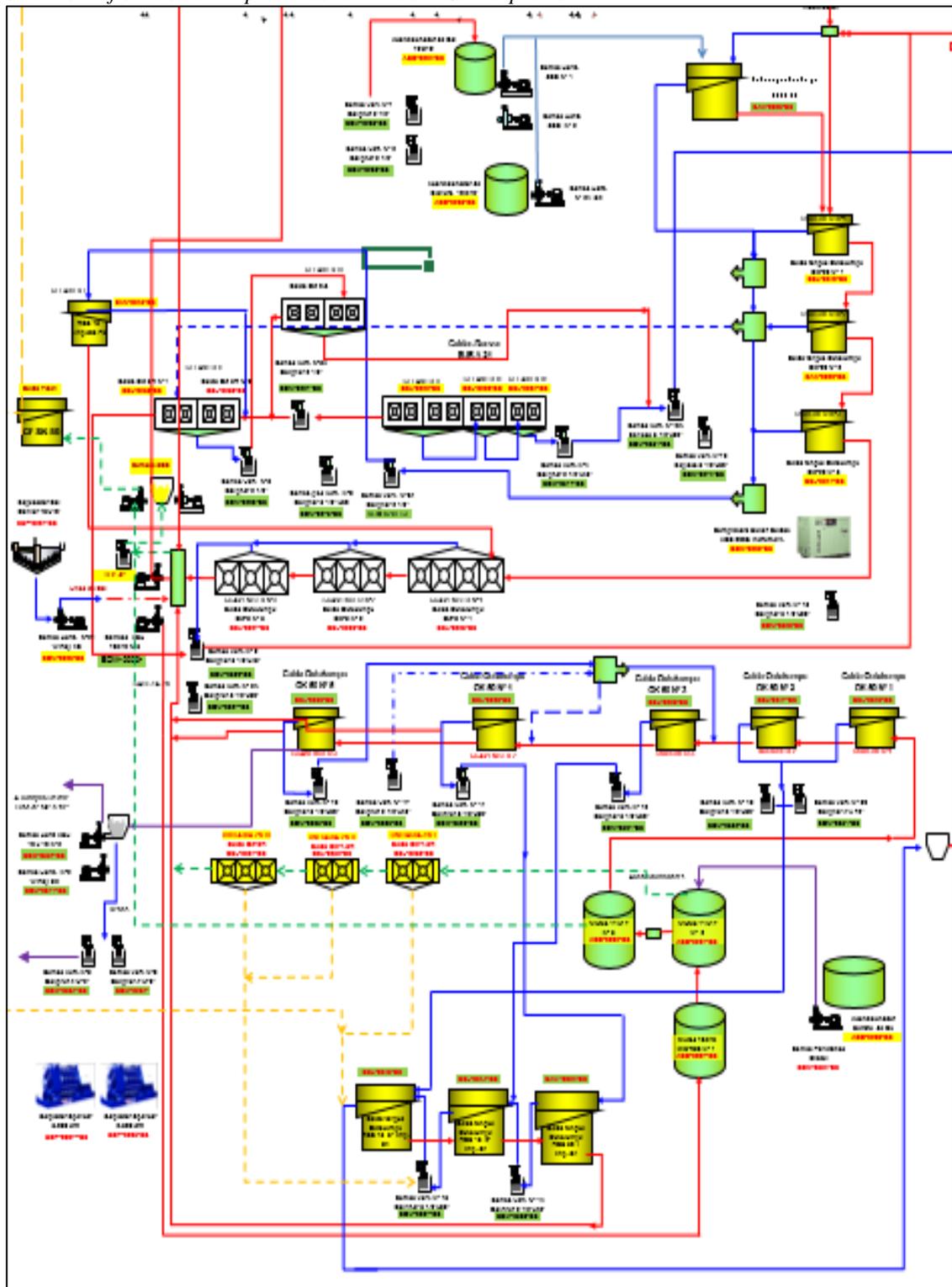
El producto obtenido en el circuito de flotación, concentrado de Zinc es enviado a 2 espesadores Outotec 50'x 10' N°1 y N°3, donde se elimina la mayor cantidad de agua, el producto del Underflow del espesador se envía por medio de una bomba Wifley 5CB a un filtro prensa Cidelco de 1500 mm por 1500 mm, logrando obtener un concentrado de cinc con una humedad que varía entre 9 a 12 % de humedad.

Figura 16



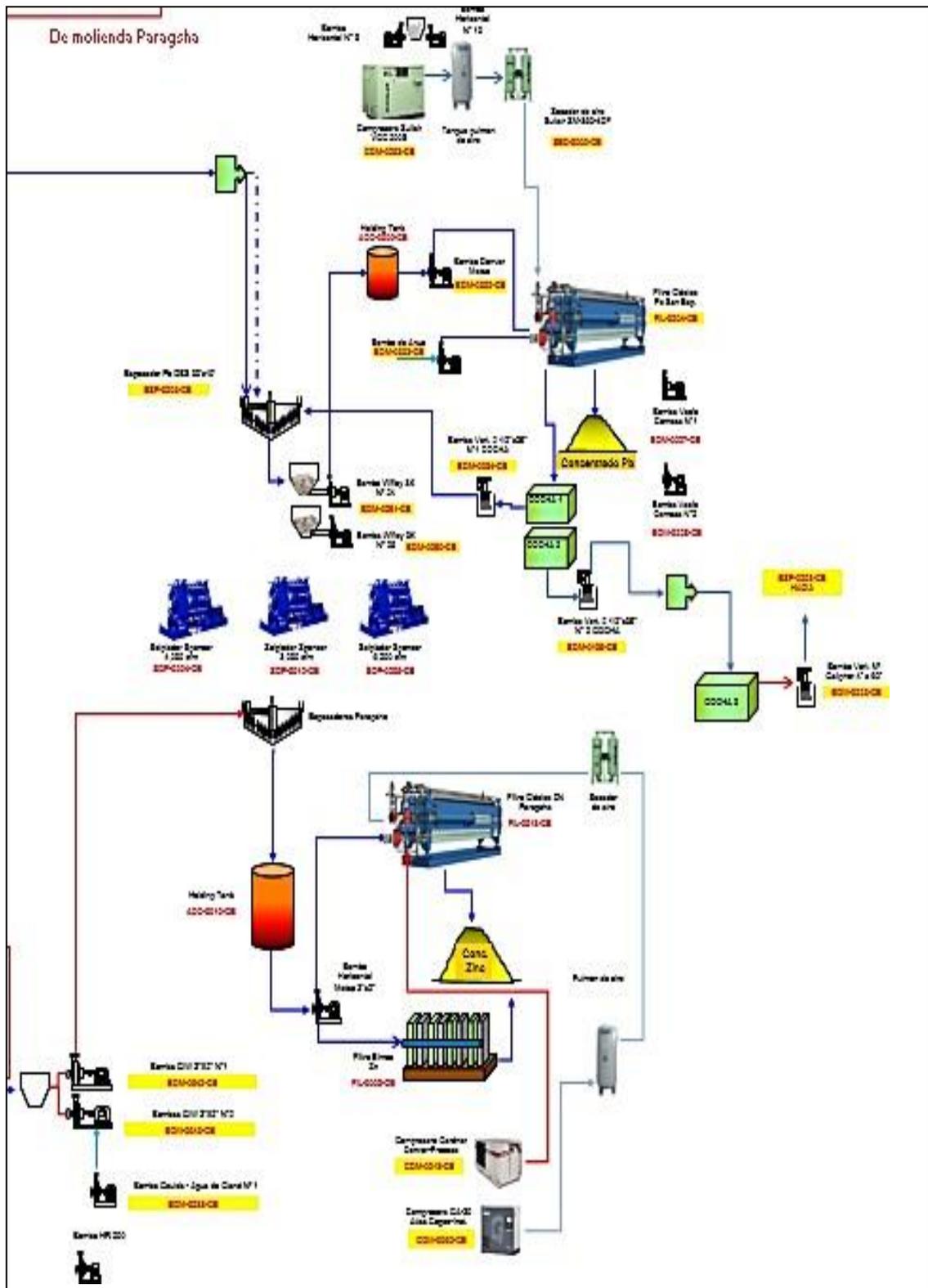
Nota. Ubicación de los molinos primarios y secundarios. Fuente: Tomado de archivos de Cerro S.A.C

Figura 17
Circuito de flotación de la planta concentradora San Expedito



Nota. Ubicación de las celdas de flotación. Fuente: Tomado de archivos de Cerro S.A.C

Figura 18
Circuito de eliminación de agua



Nota. Ubicación de equipos de eliminación de agua. Fuente: Tomado de archivos de Cerro S.A.C

3.1. Tipo de investigación

En función al objetivo planteado **la investigación es experimental aplicado**, debido a que da soluciones reales de un problema una investigación aplicada que tiene como propósitos prácticos inmediatos bien definidos, Gotuzo (2010).

De acuerdo al **tipo de diseño es explicativa y correlacional**, debido a que se realiza la verificación causal mediante la prueba de hipótesis mediante pruebas experimentales y manipulación de variables independientes, además, se busca realizar la correlación de carga circulante versus la función Rosin Rammler. Ñaupás & Mejía & Novoa & Villagómez (2014).

3.2. Nivel de investigación

De acuerdo a la naturaleza del estudio de la investigación, reúne por su nivel las características:

Descriptiva. Mediante este método se realizó la descripción de los fenómenos y comportamiento de las etapas que ocurren durante las operaciones de molienda clasificación.

Explicativa. Durante las pruebas experimentales se hará la respectiva explicación de la causa y el efecto de cada etapa de las pruebas.

3.3. Método de Investigación

Los métodos de investigación son las herramientas que los investigadores utilizan para obtener y analizar los datos. Estas incluyen el muestreo, los cuestionarios, las entrevistas, los estudios de casos, el método experimental, los ensayos y grupos de enfoque.

La elección del método de investigación es determinada por el problema a resolver y por los datos que se pueden obtener. Según Zita (2018)

Para obtener resultados confiables extraídos de la realidad, se establece la relación directa entre la variable, independiente y dependiente puesto que lo que se pretende es relacionar la carga circulante con D_{50} y aplicarlo al control del circuito mediante densidad de pulpa.

Se utilizó el método cuantitativo para realizar una comparación de datos obtenidos como densidad de pulpa. Carga circulante y la función Rosin Rammler, que sirvieron de base para el diseño de los cuestionarios, entrevistas de opinión especializada, con la información obtenida se realizó la prueba estadística de las hipótesis formuladas, a fin de plantear las conclusiones con sus respectivas recomendaciones en torno a la problemática en estudio.

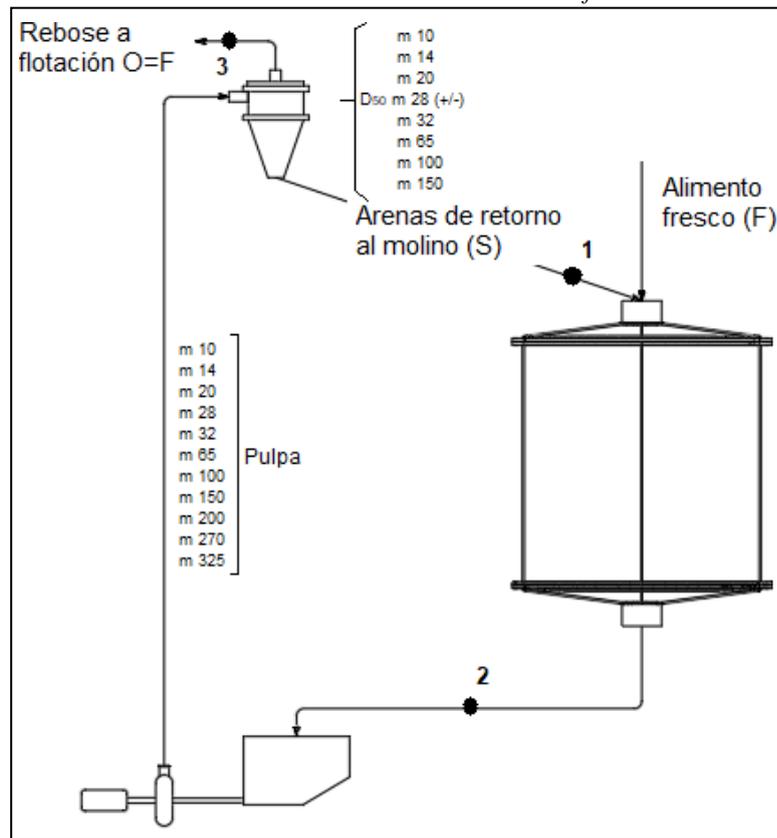
3.4. Diseño de Investigación

Como dice Sánchez-Reyes, el diseño es un valioso instrumento que orienta y guía al investigador, es un conjunto de pautas a seguir, en un estudio o experimento, de carácter flexible, no un recetario rígido. (Sánchez-Reyes, op.cit: 45).

Para la ejecución del estudio se planifico, la forma como se va tomar las muestras en el circuito de molienda clasificación, teniendo en cuenta las dificultades que se presenta al momento de muestrear, esto debido al lugar inaccesible de muestreo.

A continuación, se presenta gráficamente los puntos de muestreo para la aplicación de la función Rosin Rammler.

Figura 19
Puntos de muestreo en el circuito de molienda-clasificación



Se realizó el muestreo en el circuito de molienda clasificación cada hora durante las dos guardias del turno de mañana y del turno tarde durante una semana. Para la toma de muestra se utilizó tres cucharas con sus respectivos baldes para no contaminar las muestras.

Las muestras obtenidas se llevaron al laboratorio metalúrgico y posteriormente se adiciono floculante para asentar los finos de las muestras y eliminar el exceso de agua y posteriormente se sometió a un secado de muestras en unas bandejas grandes hasta un secado total.

Secadas las muestras se llevó a un análisis granulométrico con mallas de la serie Tyler. La muestra se sometió al análisis granulométrico de 0,5 kilos.

3.5. Población y muestra

Población

La población está constituida por el tonelaje/hora de mineral que ingresa a la planta concentradora San Expedito específicamente al circuito de molienda clasificación.

$$\text{Población} = 83,3 \text{ T/h}$$

Muestra

La muestra lo constituye la cantidad de pulpa muestreado utilizada en las pruebas metalúrgicas.

El muestreo se realizó cada hora en los puntos especificados en la gráfica 15. La cantidad de muestra obtenida en cada muestreo se determinó por el método aplicado de Pierre Gy.

Determinación de la cantidad de muestra representativa (Teoría de Pierre Gy)

Ecuación básica:

$$M = \frac{C \cdot d^3}{s^2}$$

M = Peso mínimo de muestra requerido (gr)

C = Constante de muestreo (g/cm^3)

d = Tamaño de partícula más grande dentro de la muestra (cm)

s = Medida del error estadístico y normalmente es 0.01

Constante de Muestreo (C)

$$C = f \cdot g \cdot l \cdot m$$

f = Factor de forma el cual es tomado como 0,5, excepto para minerales de oro

que es 0,2

g = Factor de distribución de tamaño de partícula, $g=0,25$

l = Factor de liberación

m = Factor mineralógico (g/cm^3)

Factor de liberación

$$l = \sqrt{\frac{L}{d}}$$

L = Tamaño de liberación del mineral de interés (cm)

d = Tamaño de partícula más grande dentro de la muestra (cm)

Factor Mineralógico (m)

$$m = \frac{1 - a}{a} [(1 - a) \cdot r + a \cdot t]$$

a = Es la fracción del mineral de interés

r = Densidad del mineral de interés

t = Densidad de la ganga

La cantidad de muestra que se obtiene por muestreo en cada punto específico

será de:

$$M = 184,5g$$

3.6. Técnicas e instrumento de recolección de datos

Técnica de recolección de datos

Muestreo. Mediante esta técnica se obtuvo una fracción pequeña, lo más representativa posible de un total de mineral del circuito de molienda

clasificación.

Cuarteo. Con esta técnica se realizó la reducción de muestra hasta obtener la muestra adecuada para el análisis granulométrico.

Análisis granulométrico. Con esta técnica se determina el porcentaje en peso retenido en cada malla, que es aplicado al alimento, rebose y arenas.

Densímetro. Es un equipo que nos da la medida en porcentaje de sólidos a partir de la densidad de pulpa que también se utilizó en el alimento, rebose y arenas del clasificador.

Instrumentos de recolección de datos

Observación. Mediante esta técnica se toma apuntes de los fenómenos físicos de ocurrencia del análisis granulométrico y medida de densidades.

Entrevista. Se realizó a los profesionales que laboran en la empresa y operadores con una amplia experiencia en operaciones de plantas de concentración.

Análisis documental. Se realiza análisis de datos de fuentes primarias obtenidos de laboratorio metalúrgico de la empresa minera.

Observación. Mediante esta técnica se toma apuntes de los fenómenos de ocurrencia en las pruebas experimentales.

Análisis documental. Se realizó análisis de datos de fuentes primarias y fuentes secundarias obtenidos de laboratorio metalúrgico de la empresa minera.

3.7. Selección, validación y confiabilidad de los instrumentos de investigación

Las tablas para la toma de datos y operación se validaron mediante el juicio técnico de los ingenieros que laboran en la planta concentradora de San Expedito de la Empresa Minera Cerro S.A.C., teniendo en cuenta la experiencia de cada uno de ellos.

3.8. Técnicas de procesamiento y análisis de datos

Para el procesamiento y análisis de datos se utilizó la hoja de cálculo Excel, que a continuación se describe.

Se realizó cálculos metalúrgicos del porcentaje acumulativo positivo para determinar la carga circulante.

Determinación del D_{50} mediante el coeficiente de partición del rebose y de las arenas de retorno.

Haciendo uso de la función Rosin Rammler determinamos el D_{50} de las arenas de retorno al molino.

Con todos los datos obtenidos se realizó los cálculos para determinar el D_{50} y la aplicación de la función Rosin Rammler a la descarga del clasificador y posteriormente relacionándolo con las densidades de pulpa.

3.9. Tratamiento estadístico

El tratamiento estadístico se realizó utilizando el paquete estadístico del SPSS para la prueba de hipótesis del estudio.

3.10. Orientación ética filosófica y epistémica

Esta investigación está orientado al grupo de interés de la empresa mejorando los beneficios económicos y la óptima operación en el circuito de molienda clasificación de la planta concentradora.

Los datos obtenidos en el estudio se realizaron teniendo en cuenta los valores éticos del investigador en la que se da fe de los ensayos obtenidos.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

El objetivo de la tesis es aplicar la función Rosin Rammler al circuito de molienda clasificación de la planta concentradora San Expedito, para, realizar un estricto control del circuito en función a su D_{50} de la descarga del molino y realizar una buena recuperación de sus contenidos metálicos.

Una molienda inadecuada lo que va producir es una deficiente liberación de partículas del mineral valioso y consecuentemente no se realizara una buena recuperación. De igual manera una sobre molienda también va generar una mala recuperación, por tal motivo nuestra preocupación es el control del circuito de molienda clasificación para la recuperación del metal valioso.

Controlando los parámetros de carga circulante y D_{50} se resolverán los problemas de recuperación, leyes comerciales del concentrado y control estricto de los costos operativos. Como se sabe una carga circulante mayor generará un mayor consumo de reactivos, una sobre molienda generando la mayor cantidad de lamas y esto a la vez una baja recuperación del metal valioso.

A continuación, se realizó una breve descripción de la secuencia de muestreos en los puntos establecidos del circuito de molienda clasificación que a continuación se detalla.

4.1. Descripción del trabajo de campo

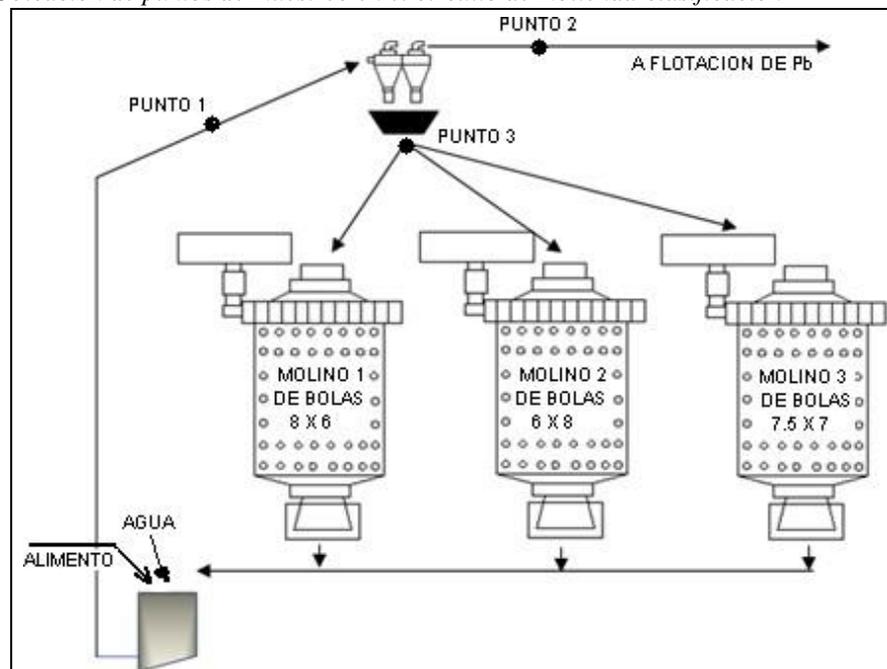
En primer lugar, se tuvo que hacer una evaluación del circuito de molienda clasificación, para la toma de muestra y preparar los muestreadores adecuado para realizar un buen muestreo de los puntos determinados.

Por muestreo se tomó aproximadamente 184 g de muestra en un balde, haciendo un total de 2,208 kg en cada turno de 12 horas.

4.1.1. Puntos de muestreo del circuito molienda-clasificación

Figura 20

Ubicación de puntos de muestreo en el circuito de molienda-clasificación



Nota. Los puntos 1, 2 y 3 son punto de muestreo

El muestreo se realizó en la caja de bomba N° 2, que es el alimento a los hidrociclones, rebose del clasificador y la descarga del hidrociclón.

Estas muestras se secan y posteriormente se somete a un análisis

granulométrico tanto del alimento, rebose y descarga del hidrociclón.

4.1.2. Caracterización físico químico del mineral

La gravedad específica del mineral se determinó por el método de la fiola en el laboratorio metalúrgico de la empresa minera que nos arrojó 3,2.

El ensayo químico reportado por laboratorio metalúrgico de la empresa minera es la siguiente:

El ensayo químico del mineral de cabeza

Ensayo de Químico compuesto				
%Cu	%Pb	%Zn	Ag oz/TM	%Fe
0,04	1,77	3,37	3,70	18,75

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados

A continuación, se presenta el análisis granulométrico por mallas de las muestras de la descarga del molino, rebose y arenas de retorno.

Tabla 1
Análisis Granulométrico de molino, rebose y descarga del hidrociclón

Malla	Abertura μ	Des. Mol % Peso	Rebose % Peso	Descarga % Peso
14	1179	0,02	0,08	0,03
20	850	0,16	0,08	0,43
30	650	0,75	0,24	1,54
50	297	7,71	1,17	11,85
70	210	11,60	3,61	12,73
100	150	13,77	6,83	15,21
140	112	11,60	9,17	18,61
200	75	9,90	12,76	10,93
270	53	7,95	11,83	7,60
325	44	6,03	9,95	5,03
400	38	5,42	7,49	4,33
-400	--	25,09	36,79	11,71

Nota. Pesos obtenidos por mallas

De la tabla 1 podemos deducir, que las partículas de molienda, rebose y arenas de retorno se encuentran en mayor % en peso a partir de la malla 50 y en la malla - 400 tenemos demasiado finos en la descarga del molino de 25,09% y en las arenas de retorno de 11,71%.

a) Cálculo de la carga circulante por mallas

Tabla 2

Determinación de la carga circulante del circuito molienda- clasificación

Malla	Abert. μ	Alimento		Rebose		Descarga		Carga circulante
		% Peso	%Ac (+)	% Peso	%Ac (+)	% Peso	%Ac (+)	
14	1179	0,02	0,02	0,08	0,08	0,03	0,03	-6,000
20	850	0,16	0,18	0,08	0,16	0,43	0,46	0,071
30	650	0,75	0,93	0,24	0,40	1,54	2,00	0,495
50	297	7,71	8,64	1,17	1,57	11,85	13,85	1,357
70	210	11,60	20,24	3,61	5,18	12,73	26,58	2,375
100	150	13,77	34,01	6,83	12,01	15,21	41,79	2,828
140	112	11,60	45,61	9,17	21,18	18,61	60,40	1,652
200	75	9,90	55,51	12,76	33,94	10,93	71,33	1,363
270	53	7,95	63,46	11,83	45,77	7,60	78,93	1,144
325	44	6,03	69,49	9,95	55,72	5,03	83,96	0,952
400	38	5,42	74,91	7,49	63,21	4,33	88,29	0,874
-400		25,09	100,00	36,79	100,00	11,71	100,00	
Total		100,00		100,00		100,00	PROM.	1,568

Nota. Procesamiento de acumulados positivos de alimento, rebose y descarga

Con la relación $Dd = Ss + Oo$ y los % Ac(+) para cada malla de la tabla 1, se calculó la carga circulante, desechando de la malla 14 y 20 por encontrarse fuera de los rangos aproximados de 1 y 2.

$$\text{Carga circulante promedio} = 1,568$$

b) Cálculo del tamaño crítico D50

En primer lugar, hay que tener en cuenta la capacidad de tratamiento de la planta concentradora en 24 horas.

$$\text{Capacidad de planta} = 2\,000 \text{ TMD (peso de rebose "O")}$$

$$\text{Peso arenas retorno} = 2\,000 \times 1,568 = 3\,136,24 \text{ TMD}$$

Se elabora el siguiente cuadro

Tabla 3
Tonelajes por intervalo de mallas y coeficiente de partición

Malla	Ap. Prom. micrones	W(OF) TMD	W(UF) TMD	CP (OF)	CP(UF)
-14 +20	1014,5	1,60	13,49	0,11	0,89
-20 +30	750,0	4,80	48,30	0,09	0,91
-30 +50	473,5	23,40	371,64	0,06	0,94
-50 +70	253,5	72,20	399,24	0,15	0,85
-70 +100	180,0	136,60	477,02	0,22	0,78
-100 +140	131,0	183,40	583,65	0,24	0,76
-140 +200	93,5	255,20	342,79	0,43	0,57
-200 +270	64,0	236,60	238,35	0,50	0,50
-270 +325	48,5	199,00	157,75	0,56	0,44
-325 +400	41,0	149,80	135,80	0,52	0,48

Nota. Cp(OF) y Cp(UF) son coeficientes de partición

Dónde:

$W(OF)$ = Tonelaje de rebose del clasificador en determinada fracción de mallas.

$W(UF)$ = Tonelaje de arenas de retorno del clasificador en la misma fracción de mallas.

$Cp(OF)$ = Coeficiente de partición del rebose, representa la fracción de rebose en peso respecto del peso total de una misma malla.

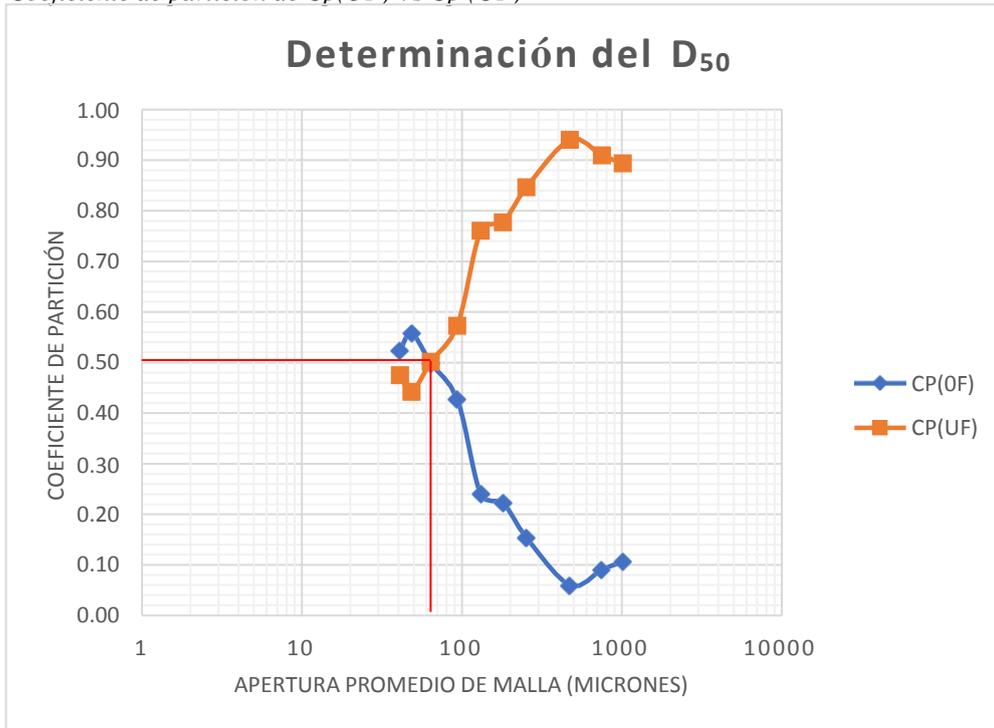
$$Cp(OF) = W(OF) / (W(OF) + W(UF))$$

$Cp(UF)$ = Coeficiente de partición de las arenas, representa la fracción de arenas respecto del peso total en una misma fracción de malla.

$$Cp(UF) = W(UF) / (W(OF) + W(UF))$$

$$Cp(OF) + Cp(UF) = 1$$

Figura 21
Coefficiente de partición de Cp(OF) Vs Cp (UF)



Nota. La intersección de curvas determina el D₅₀
 Del gráfico se determina que el D₅₀ es 64,76 micrones

D₅₀ = 64,76 micrones

c) Determinando la función Rosin-Rammler a la descarga de molino.

Se ajustar por regresión lineal la ecuación de la recta de la forma:

$$\ln. \ln(100/W) = b \ln D + B \dots\dots\dots 13$$

$$Y = b x + B \dots\dots\dots (14)$$

De acuerdo a los valores del análisis granulométrico (cuadro N° 1): y en la finalidad de aplicar las relaciones de ajuste 13 y 14 para estimar la pendiente de recta y el intercepto-y se confecciona la siguiente tabla 4.

Tabla 4*Ajustes de datos para mínimos cuadrados*

Malla	Apert. D	% Ac(+) (W)	Ln D (X)	Ln.Ln(100/W) (Y)	XY	X ²
14	1179	0,02	7,0724219	2,14208685	15,1497419	50,0191515
20	850	0,18	6,74523635	1,84371424	12,4362883	45,4982134
30	650	0,93	6,47697236	1,54281528	9,9927719	41,9511710
50	297	8,64	5,69373214	0,89558488	5,09922041	32,4185857
70	210	20,24	5,34710753	0,46844575	2,50482982	28,5915589
100	150	34,01	5,01063529	0,07558564	0,37873207	25,1064661
140	112	45,61	4,71849887	-0,24201654	-1,14195476	22,2642316
200	75	55,51	4,31748811	-0,52999655	-2,2882538	18,6407036
270	53	63,46	3,97029191	-0,78798459	-3,12852886	15,7632179
325	44	69,49	3,78418963	-1,01063622	-3,82443912	14,3200912
400	38	74,91	3,63758616	-1,24173423	-4,51691526	13,2320331
-400			56,7741603	3,1558645	30.6614927	307,805424

Nota. Elaborado por Carlos ESTEBAN HUAYANAY

Aplicando ajuste de mínimos cuadrados para determinar la pendiente

$$A = \frac{N X'Y' - X'Y'}{NX'^2 - (X')^2} \dots \dots \dots (15)$$

$$B = \frac{X'^2 Y' - X'.X'Y'}{NX'^2 - (X')^2} \dots \dots \dots (16)$$

Dónde:

N = frecuencia de datos (X', Y')

X' = función de apertura en micrones

Y' = función del % Ac (+ o -)

Remplazando los valores obtenidos en formula se obtiene:

$$A = \frac{11(30,66) - 56,77(3,155)}{11(307,805) - 56,77^2} = 0,970 \dots \dots \dots (17)$$

$$B = \frac{307,805(3,155) - 56,77(30,66)}{11(307,805) - 56,77^2} = -4,742 \dots \dots \dots (18)$$

Los valores de A y B remplazamos en la ecuación lineal de Rosin Rammler.

$$\ln. \ln (100/W) = 0,970 \ln D - 4,721 \dots \dots \dots (19)$$

Realizando el cálculo se determina que $W = 60,10 \%$ (Ac +) que es el porcentaje de alimento al clasificador que conforman las arenas de retorno.

Luego:

$100 - W = 39,90 \%$ (Ac -) que es el porcentaje en peso del alimento que conforma el rebose del clasificador.

Estimando la carga circulante sería:

$$Carga\ circulante = \frac{60,10}{39,90} = 1,5062$$

4.2.1. Demostración relación entre carga circulante – D_{50} – densidades de pulpa del circuito.

En el circuito de molienda – clasificación de la planta concentradora San Expedito se tiene las siguientes densidades promedio.

$$W_o = 1300 \text{ g/l (rebose)}$$

$$W_s = 2156 \text{ g/l (arenas)}$$

$$W_d = 1600 \text{ g/l (descarga molino)}$$

Si $G_e = 3,2 \text{ g/cc}$ y aplicando sucesivamente constante de sólidos, %S en pulpa y dilución de pulpa se puede lograr las diluciones respectivas de cada producto.

$$D_o = 2,1929: 1 \text{ (rebose } 31,319\% \text{ sólidos)}$$

$$D_s = 0,3711: 1 \text{ (arenas } 72,93\% \text{ sólidos)}$$

$D_d = 1,08116: 1$ (descarga 48,05% sólidos)

Aplicando luego la relación de carga circulante:

$$Carga\ circulante = \frac{D_o - D_d}{D_d - D_s}$$

$$Carga\ circulante = \frac{2,1929 - 1,08116}{1,08116 - 0,3711}$$

$$Carga\ circulante = 1,5656$$

La carga circulante obtenida es similar a la obtenida por análisis granulométrico y por Rosin Rammler y con esto se demuestra la ligazón entre carga circulante – D_{50} y las densidades de pulpa del circuito de molienda clasificación.

4.2.2. Control de densidades de pulpa versus Rosin Rammler

Se realizó el control del rebose del nido de hidrociclones, mediante mediciones de densidades de pulpa y seguidamente se determinó la carga circulante para compararlo con la función Rosin Rammler.

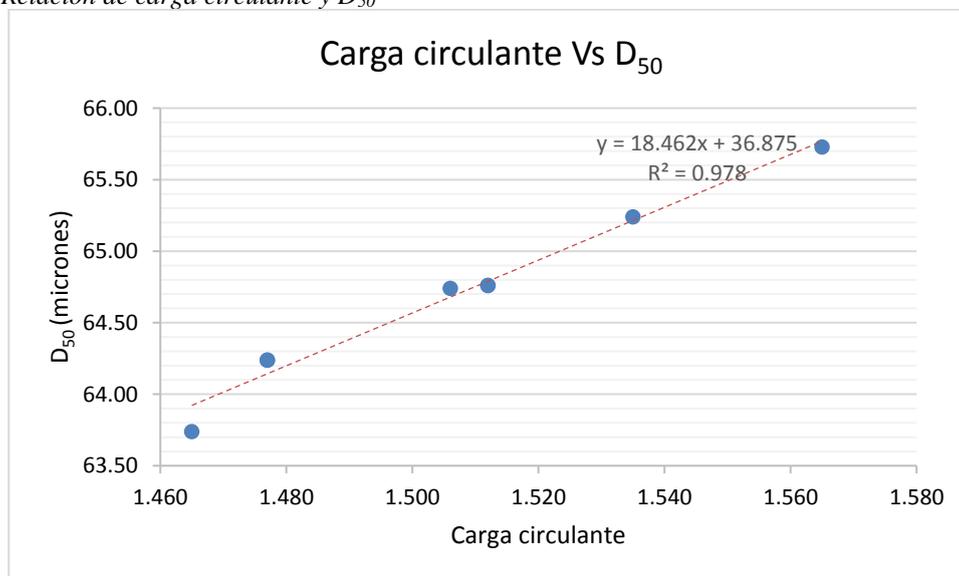
A continuación, se presenta ocho mediciones de las densidades de pulpa realizadas al circuito de molienda-clasificación como se observa en la tabla 5.

Tabla 5*Relación de Rosin Rammler vs densidades y relación con carga circulante*

N°	D _{pulpa} (g/L)	G.e	D ₅₀ (Micras)	$\text{LnLn}\left(\frac{100}{W}\right)$ = 0.970LnD - 4,721	100-W	CC
1	1300	3,2	64,74	60,10	39,90	1,506
2	1290	3,2	64,24	59,64	40,36	1,477
3	1320	3,2	65,73	61,02	38,98	1,565
4	1300	3,2	64,76	59,81	40,79	1,512
5	1310	3,2	65,24	60,56	39,44	1,535
6	1280	3,2	63,74	59,18	40,82	1,465
7	1310	3,2	64,76	59,81	40,79	1,512
8	1290	3,2	64,24	59,63	40,37	1,477

Nota. Elaborado por Carlos ESTEBAN HUAYANAY

En la siguiente figura podemos observar, la relación que hay entre la caga circulante y el D₅₀ que se ajusta a un modelo lineal, que tiene una correlación de 97,8 %, y podemos afirmar que la carga circulante va relacionada con el tamaño de distribución de partícula D₅₀.

Figura 22*Relación de carga circulante y D₅₀*

Nota. Dispersión de los puntos experimentales con relación a la recta normal

4.2.3. Efecto del control de las arenas de retorno en la recuperación en la flotación

Para ver el efecto del control de las arenas de retorno en la recuperación del Pb y Zn en la flotación, se realizó el control en 60,10% de las arenas de retorno en función de la carga circulante determinado en 1,5062.

Para el control de la carga circulante de forma homogénea se aplicó el método de dilución de pulpa, mediante el control por densidades de pulpa que se mantuvo en 1300 gr/l. Esta prueba se realizó por tres días en la primera Guardia realizando un control estricto por el personal de planta que labora en el circuito de molienda clasificación.

A continuación, presentamos el balance metalúrgico con sus respectivas recuperaciones de las tres guardias.

Datos:

Control: Carga circulante 1,5062 Densidad en rebose: 1,300 g/l G.e: 3,2

% sólidos: 31,3%

D₅₀: 64,76 micras

% peso de las arenas 60,10

% peso del Rebose 39,90

Tabla N° 6*Balance Metalúrgico de las Recuperaciones el Primera Guardia (7:00 am – 3:00 pm)*

Productos	Peso	% peso	Leyes					% Recuperación					Radio Conc.
			%Cu	% Pb	%Zn	Ag oz/TM	% Fe	%Cu	% Pb	%Zn	% Ag	% Fe	
Cabeza	1000,00	100,00	0,06	2,75	5,23	3,41	26,86	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
Conc. Plomo	48,96	4,90	0,52	46,47	2,74	33,18	6,89	53,71	82,73	2,56	53,71	1,24	20,43
Conc. Zinc	103,00	10,30	0,07	0,66	43,38	4,12	10,14	14,02	2,47	85,44	14,02	3,84	9,71
Relave	848,04	84,80	0,04	0,48	0,74	1,15	30,42	32,27	14,80	12,00	32,27	94,92	
Cab. Calc.	1000,00	100,00	0,07	2,75	5,23	3,42	27,18	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Nota. ESTEBAN HUAYANAY, Carlos Erik

En la Tabla 6 podemos visualizar que la recuperación del Pb es 82,73%, mientras que la recuperación del Zn es 85,44%, teniendo unconcentrado de Pb de 46,47% y Zn de 47,71% respectivamente. La carga circulante se mantuvo en 1,506, con un D₅₀ de 64,76 micrones.

Datos:

Control: Carga circulante 1,512 Densidad en rebose: 1300 g/l G.e: 3,2

D₅₀: 64,76 micras

% peso de las arenas 59,81

% peso del Rebose 40,79

Tabla N° 7

Balance metalúrgico de las Recuperaciones de la Primera Guardia (7:00 am – 3:00 pm)

Productos	Peso	% peso	Leyes					% Recuperación					Radio Conc.
			%Cu	% Pb	%Zn	Ag oz/TM	% Fe	%Cu	% Pb	%Zn	% Ag	% Fe	
Cabeza	1000,00	100,00	0,06	2,75	5,23	3,41	26,86	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
Conc. Plomo	53,10	5,31	0,61	45,13	2,93	42,89	11,30	39,67	87,15	2,98	66,51	2,26	18,83
Conc. Zinc	96,20	9,62	0,07	0,49	47,71	2,54	9,67	8,25	1,71	87,75	7,13	3,50	10,40
Relave	850,70	85,07	0,05	0,36	0,57	1,06	29,46	52,09	11,14	9,27	26,36	94,25	
Cab. Calc.	1000,00	100,00	0,08	2,75	5,23	3,42	26,59	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Nota. ESTEBAN HUAYANAY, Carlos Eric

En la Tabla 7 observamos que la recuperación del Pb es 87,15%, mientras que la recuperación del Zn es 87,75%, teniendo un concentrado de Pb de 45,13% y Zn de 47,71% respectivamente. El control de la carga circulante es 1,56, con un D₅₀ 64,90 micrones

Datos:

Control: Carga circulante 1,512

Densidad en rebose: 1310 g/l

G.e: 3,2

D₅₀: 64,76 micras

% peso de las arenas 59,81

% peso del Rebose 40,79

Tabla 8*Balance metalúrgico de las Recuperaciones de la Primera Guardia (7:00 – 3:00 pm)*

Productos	Peso	% peso	Leyes					% Recuperación					Radio Conc.
			%Cu	% Pb	%Zn	Ag oz/TM	% Fe	%Cu	% Pb	%Zn	% Ag	% Fe	
Cabeza	1000,00	100,00	0,04	1,77	3,37	3,70	18,75	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	
Conc. Plomo	53,10	3,43	0,43	38,19	3,07	44,82	22,75	38,92	74,07	3,13	50,39	4,02	29,13
Conc. Zinc	96,20	5,61	0,04	0,56	42,17	7,20	16,42	5,91	1,77	70,15	13,22	4,74	17,84
Relave	850,70	90,96	0,02	0,47	0,99	1,22	19,49	55,16	24,15	26,72	36,39	91,24	
Cab. Calc.	1000,00	100,00	0,04	1,77	3,37	3,02	27,18	100,00	100,00	100,00	100,00	100,00	

Nota. Elaborado por ESTEBAN HUAYANAY, Carlos Eric

En la Tabla 8 podemos ver que la recuperación del Pb es 74,07%, mientras que la recuperación del Zn es 70.15, teniendo un concentrado dePb de 38,19% y Zn de 42,17% respectivamente. Como podemos apreciar la ley de cabeza baja el tercer día de la guardia, y se dedujo que el mineral que estaba ingresando al tratamiento es de otra zona por lo tanto la ley de cabeza vario de 2,75 % Pb a 1,77 % Pb. En cuanto al concentrado de Zn también la ley de cabeza baja de 5,23% Zn a 3,37% Zn. El control de la carga circulante se mantuvo en 1,508, y su D₅₀ 64,85.

4.3. Prueba de hipótesis

La hipótesis estadística se somete a prueba para determinar si se acepta o se rechaza la hipótesis nula. A continuación, presentamos la hipótesis estadística.

4.3.1. Hipótesis de Investigación

Hipótesis Nula (H_0)

La aplicación de la función Rosin Rammler no controla el circuito de molienda/clasificación de la planta concentradora San Expedito.

Hipótesis alterna (H_a)

La aplicación de la función Rosin Rammler controla el circuito de molienda/clasificación de la planta concentradora San Expedito.

4.3.2. Hipótesis estadística

$H_0: r_{XY} \neq 0$

No existe correlación entre la función Rosin Rammler (X) y la carga circulante del circuito de molienda/clasificación (Y) de la planta concentradora San Expedito.

$H_a: r_{XY} = 0$

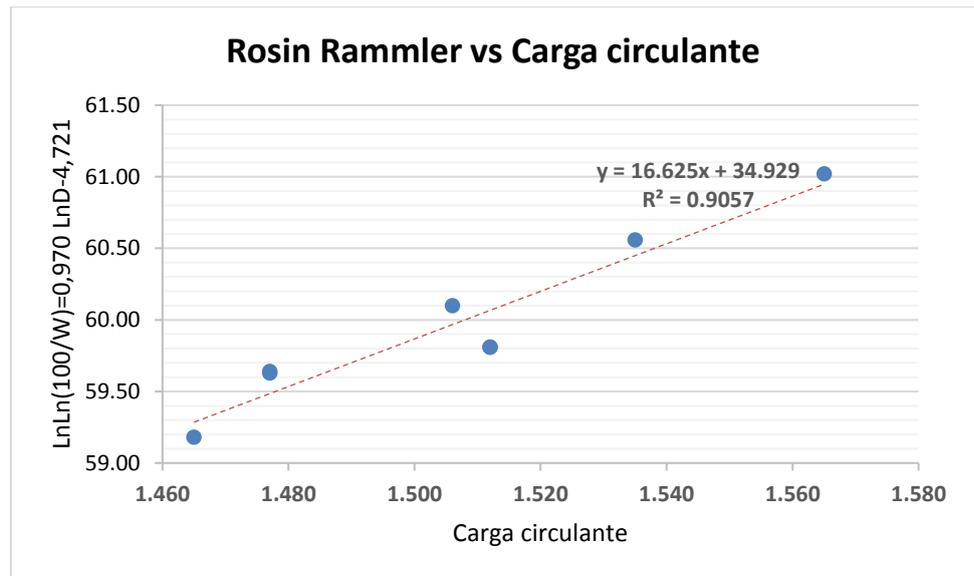
No existe correlación entre la función Rosin Rammler (X) y la carga circulante del circuito de molienda/clasificación (Y) de la planta concentradora San Expedito.

Prueba de hipótesis

Se demuestra la hipótesis estadística planteado con los valores obtenidos de la carga circulante de las pruebas experimentales medidos de la tabla.

Figura 23

Correlación de Rosin Rammler y carga circulante



Nivel de significancia

$\alpha = 0,01$

Elección del Estadístico de prueba

Correlaciones			
		Carga_Circ	Rosin_Rammler
Carga_Circ	Correlación de	1	0,952**
	Pearson		
	Sig. (bilateral)		0,000
	N	8	8
Rosin_Rammler	Correlación de	0,952**	1
	Pearson		
	Sig. (bilateral)	0,000	
	N	8	8

** . La correlación es significativa al nivel 0,01 (bilateral).

Regla de decisión

(Si $P > \alpha$ se acepta la H_0) (Si $P < \alpha$ se rechaza la H_0) $P=0,000 < \alpha = 0,01$

Decisión

Se acepta la hipótesis alterna

Conclusión

Existe suficiente evidencia para afirmar que si existe correlación entre la

función Rosin Rammler (X) y la carga circulante del circuito de molienda clasificación de la planta concentradora San Expedito, con un nivel de significancia del 1%.

4.4. Discusión de resultados

El objetivo general de la investigación es aplicar la función Rosin Rammler para el control del circuito molienda clasificación de la planta concentradora San Expedito.

Aplicando la relación de variables se observó que la carga circulante, si tiene correlación con la función Rosin Rammler, esto se comprueba por el valor obtenido de correlación de Pearson que tiene un valor de P-value 0,000 que es menor a 0,01 ($P=0,000 < \alpha=0,01$), por lo que se acepta la hipótesis alterna y se rechaza la hipótesis nula. En conclusión, el porcentaje en peso de la descarga del clasificador determinado con la función Rosin Rammler, tiene relación directa con la carga circulante del circuito de molienda clasificación.

Según estudios de análisis realizados por diferentes investigadores entre ellos, Edward Oblad, Austin y Concha, Gutiérrez y Sepúlveda, las causas que originan el control ineficiente son varias, pero una de ellas el principal es, la molienda- clasificación de minerales es un proceso bastante complejo.

Según Basurto (2011), El modelo matemático que tienen mayor ajuste y se acercan más a lo real, para el análisis de distribución granulométrica de partículas mineralizadas es la de Rosin – Rammler.

Según Sepúlveda, La representación de la distribución granulométrica de los minerales, la técnica que se emplea en la mayoría de las plantas concentradoras es primero realizar el análisis granulométrico de una muestra de un conjunto de

minerales.

Según Manzaneda (2004), El tamaño D_{50} determina el tamaño de partición de las partículas, los que son iguales al D_{50} tendrán la posibilidad de ir a la arena del clasificador. Al respecto el D_{50} determinado en el estudio se determina gráficamente que es 69.5 micras.

Según Rosin P, un conjunto de datos experimentales de abertura de malla y su respectivo % acumulado fino, se ajustarán a una distribución de Rosin – Rammler y el modelo matemático es la que gobierna la distribución granulométrica del mineral alimento al clasificador. Al respecto se comprueba que la ecuación de la función Rosin Rammler si tiene relación con la carga circulante

El control estricto de la carga circulante determinado por la función Rosin - Rammler nos permitir recuperar y mantener un control estricto de la molienda y por ende influye en la buena recuperación del contenido metálico tanto del plomo como del cinc.

CONCLUSIONES

1. La carga circulante del circuito de molienda clasificación aplicando el método de análisis granulométrico por mallas se determinó en 1,568.
2. El tamaño de corte D_{50} entre el rebose y arenas de retorno al molino es de 65,9 micrones
3. La función Rosin Rammler calculado para nuestro circuito de molienda clasificación aplicando la ecuación.

$$\ln. \ln (100/W) = 0.970 \ln D - 4,721$$

Determinamos el porcentaje de retorno de las arenas que es $W=60,10\%$ y el porcentaje del rebose es $39,9\%$.

La carga circulante determinado con la función Rosin Rammler (1,5062) es prácticamente similar a lo determinado por el método de análisis granulométrico (1,568) y por el método de dilución de pulpa (1,5656), que fácilmente se podría controlar mediante densidades de pulpa en el rebose del clasificador.

RECOMENDACIONES

1. Si desean replicar las pruebas, realizar un buen muestreo en los puntos ubicados del circuito, para determinar la función Rosin Rammler que gobierna la descarga del molino.
2. Aplicando la relación de carga circulante de abajo, el operador puede estimar consolo tomar densidades la carga circulante del circuito.

$$CC = \frac{(D_c - 1)(D_d - D_o)}{(D_o - 1)(D_c - D_d)}$$

3. Realizar una tabulación de Carga circulante – D₅₀ que permita al operador comprender el significado de esta relación y cómo influirá en la operación su control.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

- B. A. Wills. (1994). *“Tecnología de procesamiento de minerales”* Editorial limusa.
México D.F.
- Basurto contreras, C. (2011). “Tesis Modelo “Cebaco” aplicado al control de procesos en el circuito de molienda-clasificación en una planta concentradora de minerales mediante el software LabWIEV”.
- Gutiérrez, L. & Sepulveda, J.E. (1986) “Dimensionamiento y optimización de plantas concentradoras mediante técnicas de modelación matemática”, CIMM, Chile.
- Hernández Sampieri, R., Fernández Collado, C., Baptista Lucio, P. (2003) *“Metodología de la Investigación”*. Editorial Mexicana
- Manual de bombas horizontales Warman (2001)
- Manzaneda Cabala, J. (1994). *“Procesamiento de Minerales Metalurgia Aplicada”*. Ediciones UNI. Lima-Perú.
- Porras Castillo, D., (1987) *“Procesamiento de Minerales”*. Editorial. UNDAC. Pasco.
- Pino Gotuzzo Raúl (2010). *“Manual de Investigación Científica”* Primera Edición. Instituto de Investigaciones Católica Tesis y Asesores. Lima-Perú.
- Quiroz Núñez, Iván. (1987) *“Ingeniería Metalúrgica Operaciones Unitarias en Procesamiento de Minerales”* Editora; UNI – Lima Perú
- Tapia Quezada, J. (2004). “Caracterización de partículas y suspensiones”, Universidad “Arturo Prat”, Iquique – Chile.
- Vargas, G. (2010). *Evaluación del circuito de molienda clasificación*, Tesina.
<https://www.dspace.espol.edu.ec/bitstream/123456789/16331/1/Evaluacion%20de%20un%20Circuito%20de%20Molienda%20y%20Clasificacion.pdf> Industrias
- (2015) <https://www.coursehero.com/file/44032731/moliendapdf/>

ANEXOS

ANEXO 1
Cálculo del Tamaño de Muestra

Muestra de zinc

Ley de cabeza 5,23 ZnS

S = 0,01

Liberación 187,5 μ (61% malla -200)

r = 3,5 (Ge Zn)

t = 2,65 (Ge SiO₂)

d = 1179 μ

f = 0,5

g = 0,25

l = 0,433

$$l = \sqrt{\frac{L}{d}}$$

$$l = \sqrt{\frac{187,5}{1000}} = 0,433$$

PM_{Zn} = 65,3

PM_S = 32

PM_{ZnS} = 97,3

100 % ZnS ----- 67,1%Zn

%a ----- 5,23 % Zn

% a = 7,79 % ZnS = 0,0779 de ZnS

a = 7.79 % ZnS = 0,0779 de ZnS

$$m = \frac{1 - a}{a} [(1 - a).r + a x t]$$

$$m = \frac{1 - 0.0779}{0.0779} [(1 - 0.0779)3.5 + 0.0779 x 2.65] = 40,64 \text{ g/cm}^3$$

d = 1179 μ = 0,1179 cm

$$C = f . g . l . m$$

$$C = 0,5 x 0,25 x 0,433 x 40,64 = 2,19 \text{ g/cm}^3$$

$$M = \frac{C . d^3}{S^2}$$

$$M = \frac{2,19 \times 0,1179^3}{0,01^2} = 36,0 \text{ g.}$$

Muestra con plomo

Ley de cabeza 2,75 PbS

S = 0,01

Liberación 123,58 μ (68.53% malla -200)

r = 7,5 (ge Pb)

t = 2,65 (ge SiO₂)

d = 1179 μ

f = 0,5

g = 0,25

l = 0,3238

$$l = \sqrt{\frac{L}{d}}$$

$$l = \sqrt{\frac{123.58}{1179}} = 0,3238$$

PM_{Pb} = 207,2

PM_S = 32

PMPbS = 239,2

100 % PbS ----- 86,62 % Pb

%a ----- 2,75 % Pb

% a = 3,174 % PbS = 0,03174 de PbS

a = 3,174 % PbS = 0.03174 de PbS

$$m = \frac{1 - a}{a} [(1 - a).r + a \times t]$$

$$m = \frac{1 - 0,03174}{0,03174} [(1 - 0,03174)7,5 + 0,03174 \times 2,65] = 224,1 \text{ g/cm}^3$$

d = 1179 μ = 0,1179 cm

$$C = f \cdot g \cdot l \cdot m$$

$$C = 0.5 \times 0.25 \times 0.3515 \times 224.1 = 9.846 \text{ g/cm}^3$$

$$M = \frac{C \cdot d^3}{S^2}$$

$$M = \frac{9,846 \times 0,1179^3}{0,01^2} = 148,48 \text{ g.}$$

CÁLCULOS DE TONELAJES

1. Cálculo del tonelaje de rebose y arenas de retorno

Ejemplo para el rebose

Malla -14 +20

$$W(\text{OF}) = 0,08/100 \times 2000 = 1,6 \text{ TM}$$

Malla -20 + 30

$$W(\text{OF}) = 0,24/100 \times 2000 = 4,8 \text{ TM}$$

Malla -30 +50

$$W(\text{OF}) = 1,17/100 \times 2000 = 23,40 \text{ TM}$$

Ejemplo de las arenas de retorno

Malla -14 +20

$$W(\text{OF}) = 0,43/100 \times 3136,24 = 13,49 \text{ TM}$$

Malla -20 + 30

$$W(\text{OF}) = 1,54/100 \times 3136,24 = 48,30 \text{ TM}$$

Malla -30 +50

$$W(\text{OF}) = 11,85/100 \times 3136,24 = 371,64 \text{ TM}$$

ANEXO 2
Cálculo de la Función Rosin Rammler

$$\text{Ln. Ln}(100/W) = b \text{ Ln } D + B \dots\dots\dots (13)$$

Como:

$$D_{50} = 64,76 \text{ micrones}$$

De los valores mínimos tenemos:

$$A = 0,970$$

$$B = -4,742$$

Remplazando estos valores en la Ecuación de Rosin Rammler

$$\text{Ln. Ln } (100/W) = 0,970 \text{ Ln } 64,76 - 4,721$$

$$\text{Ln. Ln } (100/W) = 0,970 \times 4,1706 - 4,721$$

$$\text{Ln. Ln } (100/W) = 4,04556 - 4,721$$

$$\text{Ln. Ln } (100/W) = -0,6754 \dots\dots\dots(14)$$

$$1,568 \log (3,136 - 1,568 \times \log W) = b \text{ Ln } D + B$$

$$\log (3,136 - 1,568 \log W) = \frac{b \text{ Ln } D + B}{1,568}$$

$$10^{\frac{b \text{ Ln } D + B}{1,568}} = 3,136 - 1,568 \log W$$

$$\frac{10^{\frac{b \text{ Ln } D + B}{1,568}} - 3,136}{1,568} = \log W$$

$$\frac{3,136 - 10^{\frac{b \text{ Ln } D + B}{1,568}}}{1,568} = \log W$$

Debemos considerar

$$\text{Ln} X = 1,568 \log X$$

$$\log X = 0,432104 \text{ Ln} X$$

Remplazando en ecuación 14

$$\text{Ln. Ln } (100/W) = -0,6754$$

$$\text{Ln } (1,568 \log \left(\frac{100}{W} \right)) = -0,67754$$

$$\text{Ln } (1,568 (\log 100 - \log W) = -0,67754$$

$$\text{Ln } (1,568 (2 - \log W) = -0,67754$$

$$1,568 \log(3,136 - 1,568 \log W) = -0,67754$$

$$\log(3,136 - 1,568 \log W) = \frac{-0,67754}{1,568}$$

$$\log(3,136 - 1,568 \log W) = -0,432104$$

Tener en cuenta:

$$\log_{10}^{100} = X$$

$$10^X = 100$$

Entonces:

$$10^{-0,432104} = (3,136 - 1,568 \log W)$$

$$0,36974 = 3,136 - 1,568 \log W$$

$$0,36974 - 3,136 = -1,568 \log W$$

$$2,76626 = 1,568 \log W$$

$$\log W = \frac{2,76626}{1,568} = 1,7787$$

$$\log W = 1,7787$$

$$10^{1,7787} = \log W$$

$$W = 60,089$$

ANEXO 3

Aplicación de la función Rosin Rammler para el control del circuito de molienda - clasificación de la planta concentradora San Expedito – Pasco

PROBLEMA	OBJETIVO	HIPOTESIS	VARIABLES	METODOLOGIA	FUENTE
<p>Problema general ¿¿Es factible aplicar la función Rosin Rammler para el control del circuito molienda clasificación de la planta concentradora San Expedito?</p>	<p>Objetivo general Aplicar la función Rosin Rammler para el control del circuito molienda clasificación de la planta concentradora San Expedito</p>	<p>Hipótesis general Con la aplicación de la función Rosin Rammler se controla el circuito de molienda clasificación de la planta concentradora San Expedito.</p>	<p>V. Independiente: Aplicación de la función Rosin Rammler</p> <ul style="list-style-type: none"> • Análisis granulométrico (Alimento, descarga, rebose) • Tamaño de corte D50 • % peso alimento • % peso descarga 	<p>Método de investigación Se aplica el método científico fundamentado: selección de problema, se formula la hipótesis.</p> <p>Tipo de Investigación: El tipo de investigación es experimental aplicado</p> <p>Diseño de investigación: El método empleado es de carácter causa – efecto; metodología que permite establecer la relación existente entre la aplicación de la variable independiente en el proceso y el resultado obtenido.</p>	Pruebas experimentales
<p>Problema específico</p> <ul style="list-style-type: none"> • ¿Cuál es la carga circulante del circuito molienda clasificación por análisis granulométrico? • ¿Cuál es el tamaño de corte D50 mediante coeficientes de partición del rebose y arenas de retorno? • ¿Cuál es la función Rosin Rammler de la descarga del molino aplicando el tamaño de corte D50? 	<p>Objetivo específico</p> <ul style="list-style-type: none"> • Determinar la carga circulante del circuito molienda clasificación mediante análisis granulométrico • Establecer el tamaño de corte D50 mediante coeficientes de partición del rebose y arenas de retorno. • Determinar la función Rosin Rammler de la descarga del molino aplicando el tamaño de corte D50. 	<p>Hipótesis específico</p> <ul style="list-style-type: none"> • Conociendo el análisis granulométrico en el circuito de molienda se determinará la carga circulante. • Estimando el tamaño de corte se determinará los coeficientes de partición del rebose y arenas de retorno. • Aplicando el tamaño de corte D50 se determinará la función Rosin Rammler de la descarga del molino. 	<p>V. Dependiente: Control del circuito de molienda - clasificación de la planta concentradora San Expedito</p> <ul style="list-style-type: none"> • Relación: Carga circulante - D50 - Densidad de pulpa. 	<p>Población Tonelaje por hora que ingresa a la planta</p> <p>Muestra N= 184.5 g</p>	

ANEXO 5
Procedimiento de Validación y Confiabilidad
FICHA DE VALIDACION DE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

I. DATOS GENERALES:

1.1. Apellidos y Nombres del experto: VIVAS RODRIGUEZ, Silvia Amparo

1.2. Grado Académico: Ingeniera Metalurgista

1.3. Cargo o Institución donde labora: TECIN MINERA SAC CIP N°: 174272

1.4. Título de la Investigación: Aplicación de la función Rosin Rammler para el control del circuito de molienda - clasificación de la planta concentradora San Expedito – Pasco

1.5. Autor del Instrumento: Carlos Erik ESTEBAN HUAYANAY

1.6. Nombre del instrumento: Función Rosin Rammler (RR)

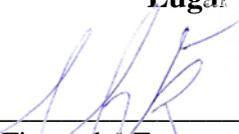
II. ASPECTOS DE VALIDACIÓN:

INDICADORES	CRITERIOS	DEFICIENTE 0 – 20%	REGULAR 21 – 40%	BUENA 41 – 60%	MUY BUENA 61 – 80%	EXCELENTE 81- 100%
CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje apropiado y formulas exactas					X
OBJETIVIDAD	Cumple con su fin de determinar la función RR					X
ACTUALIDAD	Usa instrumentos y métodos actuales					X
ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica				X	
SUFICIENCIA	Comprende los aspectos de cantidad y calidad				X	
INTENCIONALIDAD	Es adecuado para poder determinar los aspectos del estudio					X
CONSISTENCIA	Basado en aspectos teóricos científicos					X
COHERENCIA	Lleva relación los indicadores, dimensiones y variables					X
METODOLOGIA	La estrategia responde al propósito de la investigación					X
OPORTUNIDAD	Genera nuevas pautas en la investigación y construcción de teorías				X	

III. PROMEDIO DE VALIDACIÓN: 94%

IV. OPINION DE APLICACIÓN: El instrumento cumple con el propósito de la Investigación

Lugar y fecha: Lima 29, agosto del 2022


Firma del Experto
DNI:44557924

PROCEDIMIENTO DE VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD

FICHA DE VALIDACION DE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

V. DATOS GENERALES:

5.1. Apellidos y Nombres del experto: SANCHEZ LINO, Juan

5.2. Grado Académico: Ingeniero Metalurgista **CIP N°:** 107803

5.3. Cargo o Institución donde labora: Residente de Planta UM Santander

5.4. Título de la Investigación: Aplicación de la función Rosin Rammler para el control del circuito de molienda - clasificación de la planta concentradora San Expedito – Pasco

5.5. Autor del Instrumento: Carlos Erik ESTEBAN HUAYANAY

5.6. Nombre del instrumento: Función Rosin Rammler (RR)

VI. ASPECTOS DE VALIDACIÓN:

INDICADORES	CRITERIOS	DEFICIENTE 0 – 20%	REGULAR 21 – 40%	BUENA 41 – 60%	MUY BUENA 61 – 80%	EXCELENTE 81- 100%
CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje apropiado y formulas exactas					X
OBJETIVIDAD	Cumple con su fin de determinar la función RR					X
ACTUALIDAD	Usa instrumentos y métodos actuales					X
ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica				X	
SUFICIENCIA	Comprende los aspectos de cantidad y calidad					X
INTENCIONALIDAD	Es adecuado para poder determinar los aspectos del estudio					X
CONSISTENCIA	Basado en aspectos teóricos científicos					X
COHERENCIA	Lleva relación los indicadores, dimensiones y variables					X
METODOLOGIA	La estrategia responde al propósito de la investigación				X	
OPORTUNIDAD	Genera nuevas pautas en la investigación y construcción de teorías					X

VII. PROMEDIO DE VALIDACIÓN: 96%

VIII. OPINION DE APLICACIÓN: El instrumento es adecuado para realizar el calculo de la Función Rosin Rammler.

Lugar y fecha: Santander 03, septiembre del 2022



Firma del Experto

DNI: 10080823

PROCEDIMIENTO DE VALIDACIÓN Y CONFIABILIDAD

FICHA DE VALIDACION DE INSTRUMENTOS DE INVESTIGACIÓN

IX. DATOS GENERALES:

9.1. Apellidos y Nombres del experto: COZ ZANABRIA, Cesar Augusto

9.2. Grado Académico: Ingeniera Metalurgista **CIP N°:** 172022

9.3. Cargo o Institución donde labora: Jefe de guardia Planta UM Santander

9.4. Título de la Investigación: Aplicación de la función Rosin Rammler para el control del circuito de molienda - clasificación de la planta concentradora San Expedito – Pasco

9.5. Autor del Instrumento: Carlos Erik ESTEBAN HUAYANAY

9.6. Nombre del instrumento: Función Rosin Rammler (RR)

X. ASPECTOS DE VALIDACIÓN:

INDICADORES	CRITERIOS	DEFICIENTE 0 – 20%	REGULAR 21 – 40%	BUENA 41 – 60%	MUY BUENA 61 – 80%	EXCELENTE 81- 100%
CLARIDAD	Esta formulado con lenguaje apropiado y formulas exactas					X
OBJETIVIDAD	Cumple con su fin de determinar la función RR					X
ACTUALIDAD	Usa instrumentos y métodos actuales					X
ORGANIZACIÓN	Existe una organización lógica				X	
SUFICIENCIA	Comprende los aspectos de cantidad y calidad					X
INTENCIONALIDAD	Es adecuado para poder determinar los aspectos del estudio					X
CONSISTENCIA	Basado en aspectos teóricos científicos					X
COHERENCIA	Lleva relación los indicadores, dimensiones y variables					X
METODOLOGIA	La estrategia responde al propósito de la investigación					X
OPORTUNIDAD	Genera nuevas pautas en la investigación y construcción de teorías					X

XI. PROMEDIO DE VALIDACIÓN: 98%

XII. OPINION DE APLICACIÓN: El instrumento es idóneo para el cálculo de la función Rosin Rammler para el control de molienda – clasificación.

Lugar y fecha: Lima 03, septiembre del 2022

Firma del Experto
DNI: 44852088

ANEXO 6
Fotografías



Fotografía 1. Molino primario rod mill



Fotografía 2. Molino de barras y molino de bolas



Fotografía 3. Nido de ciclones



Fotografía 4. Muestreo overflow



Fotografía 5. Muestreo underflow



Fotografía 6. Control de la densidad de pulpa



Fotografía 7. Análisis de malla #200



Fotografía 8. Área de flotación Pb-Zn