

**PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATOLICA DEL PERU**

**FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA**



**PUCP**

**CARACTERIZACIÓN MINERALÓGICA DE MINERAL DE COBRE CON MENA  
PRINCIPAL DE CALCOPIRITA EN DOS MOLINOS DE LABORATORIO.**

**Trabajo de investigación para obtener el grado académico de BACHILLER EN  
CIENCIAS CON MENCIÓN EN INGENIERÍA MECÁNICA**

**AUTOR:**

Juan José Leyton Arce

**ASESOR:**

Julio César Cuisano Egúsquiza

Lima, julio del 2020

## Resumen

La adecuada selección del procedimiento y equipos para la extracción y procesamiento de un mineral es influyente en el impacto ambiental que este proceso ocasiona, afectando de manera directa e indirecta. La primera se refiere concretamente a los residuos del proceso, por ejemplo, relaves y polvos. La segunda es el impacto ambiental que generan el suministro de insumos como agua o energía eléctrica. Se sabe que, la adecuada caracterización de un material permite seleccionar y optimizar la extracción y el procesamiento de un mineral. Parámetros característicos como el índice de trabajo brindan una primera apreciación sobre el consumo de energía necesario para procesar el mineral. Asimismo, la curva de moliendabilidad permite inferir el comportamiento del mineral durante un proceso real de molienda, siendo este el proceso que implica el mayor consumo de energía en la planta. Es por esto que, el presente trabajo de investigación tiene como objetivo obtener el índice de trabajo y la curva de moliendabilidad para realizar la caracterización mineralógica de mineral de cobre con mena principal de calcopirita en dos molinos de laboratorio. Por ellos se implementaron procedimientos e instrumentos estandarizados de acuerdo a lo recomendado por la bibliografía especializada. Finalmente, como resultado se obtiene la curva de moliendabilidad ( característica de un mineral duro) y el índice de trabajo que varía entre los valores de 15,4 o 15,23 kW-h/tonelada métrica procesada.

## Contenido

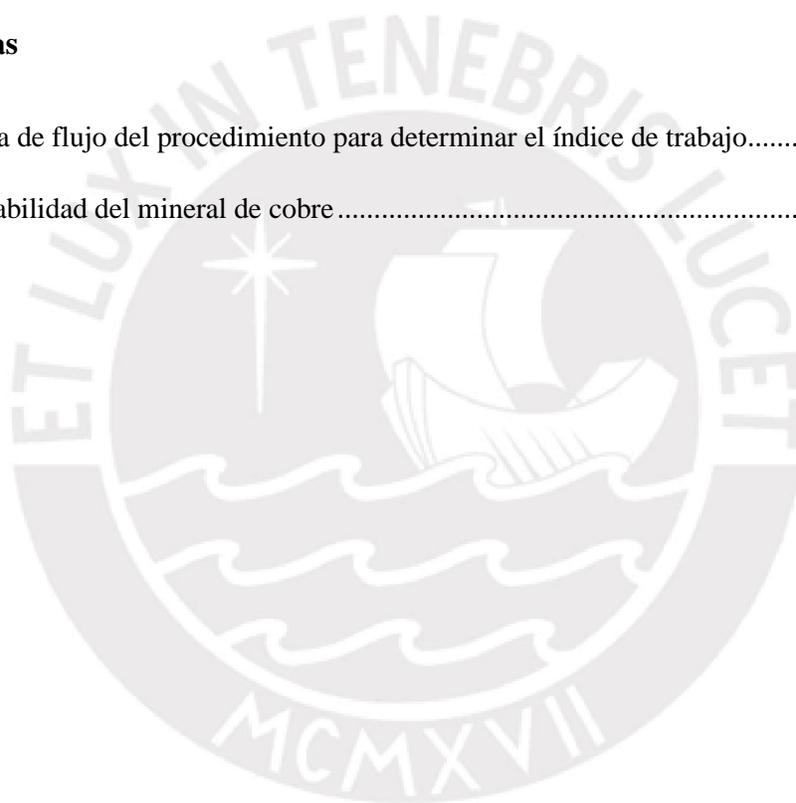
Resumen.....	i
Contenido.....	ii
Índice de Tablas .....	iii
Índice de Figuras.....	iii
<b>1. Introducción .....</b>	<b>1</b>
<b>1.1. Antecedentes .....</b>	<b>1</b>
<b>1.2. Definición del problema.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3. Propuesta solución .....</b>	<b>3</b>
<b>1.4. Justificación .....</b>	<b>3</b>
<b>1.5. Alcances .....</b>	<b>4</b>
<b>2. Hipótesis.....</b>	<b>4</b>
<b>3. Objetivos .....</b>	<b>4</b>
<b>3.1. Objetivo general.....</b>	<b>4</b>
<b>3.2. Objetivos específicos .....</b>	<b>4</b>
<b>4. Fundamentos teóricos.....</b>	<b>5</b>
<b>4.1. Índice de trabajo .....</b>	<b>5</b>
<b>5. Metodología .....</b>	<b>6</b>
<b>5.1. Determinación del tamaño de partícula mediante la Función Gaudin-Schumann.....</b>	<b>6</b>
<b>5.2. Caracterización mineralógica .....</b>	<b>7</b>
<b>6. Resultados.....</b>	<b>11</b>
<b>6.1. Índice de trabajo .....</b>	<b>11</b>
<b>6.2. Moliendabilidad .....</b>	<b>14</b>
<b>7. Conclusiones .....</b>	<b>16</b>
<b>8. Bibliografía .....</b>	<b>18</b>

## Índice de Tablas

Tabla 1: Ejemplo de cálculo del procedimiento para determinar el índice de trabajo .....	11
Tabla 2: Resultados análisis granulométrico de cabeza inicial .....	12
Tabla 3: Resultados de valores requeridos por Gaudin-Schumann .....	13
Tabla 4: Valores de constantes para Gaudin-Schumann .....	13
Tabla 5: Resultados de tamaño partículas del 80% de pasantes de la cabeza inicial .....	13
Tabla 6: Resultados de índice de trabajo .....	14

## Índice de Figuras

Figura 1: Diagrama de flujo del procedimiento para determinar el índice de trabajo.....	10
Figura 2: Moliendabilidad del mineral de cobre .....	15



## 1. Introducción

### 1.1. Antecedentes

En el año 2017, los tres sectores que representaron el mayor consumo energético nacional fueron: transporte (45%), industria y minería (27%) y residencial, comercial y público (25%). Internamente, en el sector minería, el consumo energético de electricidad representó cerca del 69% del total (Ibarra, Heredia, Isla y Caro, 2017).

En el caso de la minería metálica, un parámetro que es utilizado como un indicador es el consumo específico. Este, es definido en función del consumo de un recurso para la obtención de una tonelada procesada; es decir, se puede medir el consumo específico de agua, electricidad o materia prima. La Dirección General de Eficiencia Energética (2017) menciona que, una aproximación del consumo específico de energía eléctrica en función de la capacidad de la planta es la siguiente:

- Planta pequeña - Producción de 50 a 100 toneladas – 2,5 a 3,5 *kW*/tonelada;
- Planta mediana - Producción de 600 a 5000 toneladas - 1,5 a 2,5 *kW*/tonelada;
- Planta grande - Producción mayor a 5000 toneladas - 1,2 a 1,8 *kW*/tonelada.

El estudio de factibilidad evalúa el proceso adecuado, tanto por el aspecto económico como por la eficiencia, para la explotación de un yacimiento. Este, tendrá como aspectos a considerar las propiedades físicas y químicas del mineral y de las rocas encajonantes (Perugachi, 2009).

Asimismo, el desconocimiento de las características de las menas<sup>1</sup> en las que se presenta el mineral conlleva a una gran problemática. Entre ellas se encuentra el desajuste en los equipos, los procesos y los parámetros de operación óptimos de la planta de extracción. Esto se ve reflejado en

---

<sup>1</sup> Mineral sin limpiar, tal como se extrae de la mina.

un bajo nivel de recuperación del mineral, elevada contaminación, deterioro prematuro de los equipos y altos niveles de consumo energético (Yáñez, García, Pedraza, & Laverde, 2005).

## **1.2. Definición del problema**

La contaminación del aire viene siendo responsable de una gran cantidad de muertes prematuras en el mundo. En el año 2013, según el *World Bank and Institute for Health Metrics and Evaluation* (2016), este tipo de contaminación fue el cuarto riesgo vital principal en todo el mundo y ocasionó 4,8 millones de fallecimientos prematuros. Asimismo, se tiene conocimiento que la contaminación atmosférica es especialmente grave en algunas regiones urbanas en crecimiento, pero esta también ha tomado importancia fuera de ellas. Esto es debido al uso de combustibles sólidos en zonas rurales y por el aporte de contaminación de actividades industriales como la minería.

En esta línea, el aumento en la tasa de mortandad prematura por la contaminación atmosférica se ve reflejada en un sobrecosto para los gobiernos. Según el Comité de Operación Económica del Sistema “COES” (2017), la generación de energía en el Perú posee una participación de termoeléctricas en un 40,61%. Siendo esta una fuente de gases contaminantes como el dióxido de carbono  $\text{CO}_2$  y óxido nitroso  $\text{N}_2\text{O}$ . Adicionalmente, el metano  $\text{CH}_4$  participa en menor proporción como un gas de efecto invernadero y es emitido durante la combustión, transporte o almacenamiento de combustibles gaseosos (Iberdrola, 2013).

Por otra parte, la generación eléctrica en las minas de gran capacidad suele darse por fuentes propias. Por ejemplo, en Perú, la empresa Minera Yanacocha generó 30,86 MW de una fuente térmica; esto sin contar que las empresas mineras cuentan con pequeños grupos electrógenos para

la generación de electricidad en menor capacidad o en caso de falta de suministro eléctrico (Ministerio de Energía y Minas, 2014).

### **1.3. Propuesta solución**

Una manera de reducir el consumo energético es modernizando los equipos que se utilizan en todos los procesos. Sin embargo, esto no es útil si es que estos son operados fuera de parámetros óptimos. En esta línea, existe el caso de una empresa en Asia que luego de su modernización, su consumo se elevó a niveles tales que la empresa eléctrica dejó de suministrarle energía eléctrica. Esto era ocasionado por que los equipos estaban trabajando fuera de parámetros óptimos (Ibarra et al., 2017).

De esta manera, para la reducción del consumo energético se debe conocer las características mineralógicas y metalúrgicas del mineral a explotar. Es decir, la obtención del índice de trabajo y la moliendabilidad del mineral permite obtener una referencia sobre el consumo energético para el procesamiento de mineral analizado y también sobre el comportamiento del mismo al momento de ser reducido.

### **1.4. Justificación**

La caracterización del material permite escoger de manera adecuada el proceso extractivo, procesamiento y transporte del mineral. Así mismo, la obtención de los puntos de operación de las instalaciones de extracción y procesamiento permite aumentar la vida útil de los equipos, disminuir el consumo energético, aumentar los porcentajes de aprovechamiento del procesado y disminuir los índices de contaminación de la planta (Kelly y Spottiswood,1990).

## **1.5. Alcances**

El siguiente trabajo de investigación, obtendrá las siguientes características de mineral de cobre con mena principal calcopirita: índice de trabajo, moliendabilidad para tiempos entre 5 y 30 minutos y análisis granulométrico.

Se realizarán los ensayos siguiendo los procedimientos estandarizados para la correcta obtención de los valores. Los resultados serán comparados con aquellos reportados en la bibliografía.

## **2. Hipótesis**

El índice de trabajo obtenido tendrá valores entre 4 y 30 kW-h/tonelada métrica procesada, de acuerdo a los valores esperados para mineral de cobre con mena principal de calcopirita. La tendencia de la curva de moliendabilidad tendrá concordancia con el valor del índice de trabajo, con respecto a la dureza del mineral y materiales encajonantes<sup>2</sup>.

## **3. Objetivos**

### **3.1. Objetivo general**

Caracterizar una muestra de mineral de cobre con mena principal de calcopirita en dos molinos de bolas.

### **3.2. Objetivos específicos**

- Obtener el índice de trabajo del mineral estudiado.
- Obtener la curva de moliendabilidad del mineral para tiempos desde 5 hasta 30 minutos.
- Comparar los resultados obtenidos con los reportados en la bibliografía.

---

<sup>2</sup> Materiales y minerales que encajonan o rodean al mineral analizado.

## 4. Fundamentos teóricos

### 4.1. Índice de trabajo

El índice de trabajo ( $Wi_t$ ) es un parámetro que define el consumo energético por tonelada métrica procesada de un mineral. Este se encuentra estandarizado para una velocidad de 70 RPM y fue definido por el investigador Fred C. Bond (Bond, 1961) .

El índice de trabajo se encuentra constituido por diferentes variables, como el tamaño del 80% de la muestra, tanto en la entrada como en la salida del ensayo definido por Bond. Esto es gracias a los varios postulados que presentó el investigador Bond (1961). Por ejemplo: la energía que es invertida en reducir el tamaño de una partícula, es cedida al producto de la operación; o el consumo energético para la reducción de partículas es proporcional a las grietas generadas y esta, a su vez, a la raíz cuadrada de la nueva superficie generada.

De este modo, la energía específica requerida es inversamente proporcional a la diferencia de raíces cuadradas del diámetro de la partícula de ingreso y salida. La relación final de los parámetros mencionados se encuentra expresada a través de la ecuación 1 (Bond, 1961):

$$Wi_t = \frac{(1.1) * (44.5)}{P_i^{0.23} * Gbp^{0.82} * \left( \frac{10}{\sqrt{X_{QT}}} - \frac{10}{\sqrt{X_{GT}}} \right)} \frac{kW - h}{\text{tonelada métrica}} \quad (Ec. 1)$$

donde:

- $Wi_t$ : Work índice del mineral;
- $P_i$ : Tamaño en micrómetros de la maya de separación;
- $Gbp$ : Moliendabilidad o los gramos menores al tamaño  $P_i$  que se generan en una revolución del molino;
- $X_{GT}$ : Tamaño del 80% del procesado al momento del ingreso;
- $X_{QT}$ : Tamaño del 80% del procesado (Bond, 1961).

La ecuación (1) es empírica y las variables de las que depende pueden ser entendidas con el ensayo postulado por Bond (1961). Este consiste en realizar la molienda de una cantidad de mineral (pueden ser 700 ml) en un estado inicial. La cantidad de veces que se debe repetir el procedimiento depende de cuantas veces sea necesario para llegar al tamaño deseado  $X_{QT}$  en un porcentaje del 80% del procesado.

## 5. Metodología

### 5.1. Determinación del tamaño de partícula mediante la Función Gaudin-Schumann

Esta función tiene como principio obtener una ecuación lineal mediante la función logaritmo de la distribución de partículas. Las ecuaciones 2, 3, 4 y 5 mostradas a continuación, definen la distribución de tamaños de partícula en función del mayor diámetro en la muestra (Nadal, Boix, & Crespo, 2015).

$$F(x) = \left[ \frac{x}{k} \right]^m \quad (Ec. 2)$$

$$k = \sqrt[m]{\frac{100}{10^b}} \quad (Ec. 3)$$

$$m = \frac{N(\sum x'y') - (\sum x')(\sum y')}{N(\sum x'^2) - (\sum x')^2} \quad (Ec. 4)$$

$$b = cte = \frac{(\sum x'^2)(\sum y') - (\sum x')(\sum x'y')}{N(\sum x'^2) - (\sum x')^2} \quad (Ec. 5)$$

donde:

- $F(x)$ : Función de la distribución del tamaño de partículas;
- $x$ : Tamaño en micrómetros de la partícula;
- $y$ : Porcentaje acumulado de partículas pasantes;

- $k$ : Constante definida en la ecuación 3;
- $m$ : Parámetro característico de la distribución de las partículas definido en la ecuación 4;
- $b$ : Constante definida en la ecuación 5;
- $x'$ : Logaritmo en base 10 del tamaño de malla;
- $y'$ : Logaritmo en base 10 del porcentaje acumulado de pasantes (Nadal et al.,2015).

## 5.2. Caracterización mineralógica

Para definir las características principales del mineral es necesario realizar el análisis granulométrico, determinar el valor del índice de trabajo y desarrollar la curva de moliendabilidad.

### • Análisis granulométrico

Permite estimar el porcentaje de partículas según su tamaño. La muestra tiene que estar correctamente cuarteada<sup>3</sup>, de tal manera que esta muestra se pueda tomar como representativa del mineral. El procedimiento consiste en pasar una muestra de mineral a través de mallas de distintos tamaños. Esto permitirá obtener la distribución de tamaños de grano que existe en la muestra.

### • Moliendabilidad

Para la determinación de la moliendabilidad de un mineral se debe contar con muestras homogéneas, esto permitirá garantizar que la muestra se característica del mineral. En este caso, se usaron muestras de un kilogramo del mineral, las cuales fueron previamente cuarteadas para obtener una muestra aleatoria y representativa de la muestra.

---

<sup>3</sup> Proceso mediante el cual se divide la muestra en dos partes homogéneas.

Cada una de las muestras debe ser molida en las mismas condiciones y solo debe cambiarse un parámetro a lo largo del ensayo, el tiempo de molienda. Esto permitirá, al final, observar las diferentes granulometrías que presenta el mineral luego de ser molido una cantidad de tiempo.

Para el proceso de molienda se debe ingresar la muestra de en una proporción de 2:1, en masa con agua. Es decir, por cada kilogramo de mineral 500g de agua. Luego , se realiza la molienda durante los siguientes tiempos: 5, 10, 15, 25 y 30 minutos (Quiroz, 1986).

Luego de moler el mineral, la muestra es tamizada a través de una malla 200 y el mineral no pasante es secado en un horno hasta que no exista ningún porcentaje de agua. Se realiza el análisis granulométrico de la muestra seca y se realiza la curva de moliendabilidad del mineral. Los siguientes tamaños de mallas consideradas para el análisis granulométrico son las siguientes: # 16, 18, 25, 35, 45, 60, 80, 120, 170 y 200 (Quiroz, 1986).

#### • **Obtención del índice de trabajo**

Inicialmente, se debe contar con una muestra que, en su totalidad, su tamaño sea menor a malla #6 o inclusive podría ser malla 10. La muestra debe ser homogénea, esto significa que, debe ser cuarteada o dividida de manera aleatoria, asegurando que cada subdivisión de la muestra inicial tenga aproximadamente la misma distribución de tamaños de partícula (Bond, 1961).

A continuación, de la muestra homogénea se medirá 700 centímetros cúbicos en una probeta de 1000 centímetros cúbicos. Esta porción de la muestra representa la cabeza<sup>4</sup> inicial. Sobre ella se realiza un análisis granulométrico, lo que permite determinar el porcentaje de cada tamaño de

---

<sup>4</sup> Principio de la muestra seleccionada.

partícula en la muestra. El procedimiento se realizado en un molino de Bond estandarizado, con las siguientes características constructivas y de operación (Bond, 1961):

- Velocidad de giro de 70 RPM;
- Tapa de 4 pulgadas x 8 pulgadas de tamaño , esta debe continuar con la geometría interior del molino de tal manera que al ser sellado se complete un cilindro continuo;
- Molino de diámetro interior de 12 pulgadas y longitud de 12 pulgadas con vértices interiores redondeados;
- Carga de 285 bolas de acero cuyos diámetros se encuentran distribuidos de la siguiente manera: 43 de diámetro 1,45 pulgadas; 67 de diámetro 1,17 pulgadas; 10 de diámetro 1 pulgadas; 71 de diámetro 0,75 pulgadas y 64 de diámetro 0,61 pulgadas.

El primer ciclo será de 100 revoluciones, este nos definirá la cantidad de vueltas del siguiente ciclo. Estas dependerán de la cantidad en peso de finos<sup>5</sup> del ciclo previo. El procedimiento para definir el número de vueltas siguientes se explica a continuación (Bond, 1961) :

1. El peso de finos esperados debe ser el peso inicial del cabeza dividido entre 3.5;
2. Luego del primer ciclo de 100 revoluciones, se pesa las partículas no pasantes por la malla de menor tamaño;
3. Se determina la cantidad de cabeza que debe reponerse a la muestra de tal manera que se mantenga constante el peso inicial. Debe ser la diferencia del peso inicial con las partículas no pasantes luego del primer ciclo. Esto es denominado finos totales;
4. A continuación, se calcula la cantidad de finos a generados. Esto se calcula restando los finos totales con los finos iniciales, los cuales son el porcentaje de finos por el peso de la muestra;

---

<sup>5</sup> Pasantes de la malla de menor tamaño.

5. Una vez calculado los finos generados, se determina el factor de molienda, esto es la cantidad de finos generado por cada revolución. Entonces, numéricamente es la división de finos generados entre las revoluciones del ciclo;

6. Después, se calcula los finos a generar. Es la cantidad de finos a generar de la cabeza adicionada. Como esta ya cuenta con un porcentaje de finos, deben ser restado a los finos esperados;

7. Finalmente se divide el factor de molienda con la cantidad en peso de finos a generar y esto definirá la nueva cantidad de revoluciones.

El procedimiento anteriormente descrito también se muestra a través de un un diagrama de flujo y un ejemplo de cálculo.

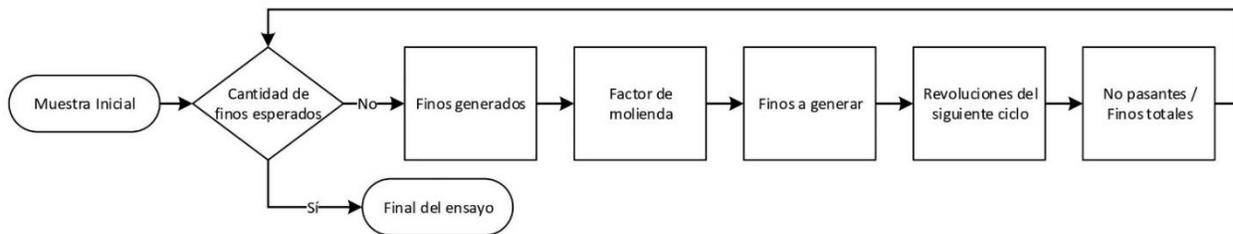


Figura 1: Diagrama de flujo del procedimiento para determinar el índice de trabajo

Tabla 1: Ejemplo de cálculo del procedimiento para determinar el índice de trabajo

Muestra inicial:	2,100 kg
Porcentaje de finos inicial:	10%
Finos esperados:	$2,100 \div 3,5 = 0,6 \text{ kg}$
No pasantes :	1,785 kg
Finos totales:	$2,1 - 1,785 = 0,315 \text{ kg}$
Cabeza a reponer:	0,315 kg
Finos generados:	$0,315 - 2100 \times (10 \div 100) = 0,105 \text{ kg}$
Factor de molienda:	$105 \div 100 = 1,05 \frac{\text{g}}{\text{rev}}$
Finos a generar:	$0,6 - 0,315 \times (10 \div 100) = 0,5685 \text{ kg}$
Revoluciones:	$568,5 \div 1,05 = 541,4 \text{ rev} = 541 \text{ rev}$

Una vez realizados los ciclos, se culmina cuando los tres últimos resultados sean similares con un margen de error de  $\pm 20 \text{ g}$ . Finalmente, se calcula el índice de trabajo mediante la ecuación 1 (Bond, 1961).

## 6. Resultados

### 6.1. Índice de trabajo

Se realizó la molienda en el molino de Bond ubicado en la sección de Ingeniería de Minas de la Pontificia Universidad Católica del Perú. Se cumplió con el procedimiento mencionado en la metodología. En la tabla 2 se muestra los resultados obtenidos en el análisis granulométrico de la cabeza inicial del mineral.

Tabla 2: Resultados análisis granulométrico de cabeza inicial

Número de malla	Malla (Micrones)	Peso (g)	Peso (%)	Porcentaje retenido	Porcentaje pasante
malla 10	2000	3,43	1,39	1,39	98,61
malla 14	1400	43,11	17,43	18,82	81,18
malla 16	1180	21,95	8,88	27,70	72,30
malla 18	1000	21,5	8,69	36,39	63,61
malla 25	710	33,2	13,43	49,82	50,18
malla 35	500	25,8	10,43	60,25	39,75
malla 45	355	18,8	7,60	67,85	32,15
malla 60	250	13,2	5,34	73,19	26,81
malla 80	180	11,8	4,77	77,96	22,04
malla 120	125	10,7	4,33	82,29	17,71
malla 170	90	9	3,64	85,93	14,07
malla 200	75	4,8	1,94	87,87	12,13
malla -200	50	30	12,13	100	0
Total		247,29	100		

En este ensayo fueron utilizadas los tamices con tamaño de malla mencionados en la tabla. Los valores más importantes y los que eran necesarios para el ensayo para determinar el índice de trabajo fueron el tamaño de malla para el 80% del pasante y el porcentaje de sólidos de la cabeza que tengan un tamaño menor a la malla 200.

Para la determinación del tamaño de malla para el 80% de pasante de la cabeza inicial se usaron dos métodos: la función Gaudin-Schuhmann, definida en la ecuación 2 y por interpolación lineal.

En la tabla 3 se observa los resultados requeridos por la función Gaudin-Schuhmann para obtener el tamaño de malla.

Tabla 3: Resultados de valores requeridos por Gaudin-Schumann

Número de malla	Abertura Micras	Peso (g)	Porcentaje peso	Porcentaje retenido	Porcentaje pasante	log X	Log Y	$x' \cdot y'$	$x'^2$
malla 10	2000	3,43	1,39	1,39	98,61	3,30	1,99	6,58	10,90
malla 14	1400	43,11	17,43	18,82	81,18	3,15	1,91	6,01	9,90
malla 16	1180	21,95	8,88	27,70	72,30	3,07	1,86	5,71	9,44
malla 18	1000	21,5	8,69	36,39	63,61	3,00	1,80	5,41	9,00
malla 25	710	33,2	13,43	49,82	50,18	2,85	1,70	4,85	8,13
malla 35	500	25,8	10,43	60,25	39,75	2,70	1,60	4,32	7,28
malla 45	355	18,8	7,60	67,85	32,15	2,55	1,51	3,84	6,50
malla 60	250	13,2	5,34	73,19	26,81	2,40	1,43	3,42	5,75
malla 80	180	11,8	4,77	77,96	22,04	2,26	1,34	3,03	5,09
malla 120	125	10,7	4,33	82,29	17,71	2,10	1,25	2,62	4,40
malla 170	90	9	3,64	85,93	14,07	1,95	1,15	2,24	3,82
malla 200	75	4,8	1,94	87,87	12,13	1,88	1,08	2,03	3,52
malla-200		30	12,13	100,00	0,00	31,2	18,6	50,0	83,7
		247,29		749,23	350,76				

Remplazando los valores en las ecuaciones 3, 4 y 5 definidas previamente se obtienen los valores de k, m y b.

Tabla 4: Valores de constantes para Gaudin-Schumann

<i>k</i>	2253,1
<i>m</i>	0,590
<i>b</i>	0,0207

Finalmente, se reemplaza los valores obtenidos en la ecuación 2 y se obtiene los resultados del tamaño de malla.

Tabla 5: Resultados de tamaño partículas del 80% de pasantes de la

Porcentaje de pasante	Tamaño de partícula Interpolación lineal	Tamaño de partícula Gaudin-Schumann
80	1396,2	1543,89

Asimismo, se realizó 9 repeticiones del ensayo de bond para asegurar que los resultados sean estables y cumplan los valores de incertidumbre mencionados previamente. Los resultados se muestran en el anexo 1.

Los resultados obtenidos permitieron calcular el índice de trabajo del mineral aplicando la ecuación 1. El tamaño del pasante del 80% de la muestra final será 50 micrómetros debido a que Bond recomienda usar este tamaño cuando se utiliza un tamiz con malla 200 como base del análisis granulométrico. En la tabla 5 se muestran los valores de Work índice obtenidos con los dos métodos de obtención del tamaño del 80% del pasante de la cabeza inicial.

Tabla 6: Resultados de índice de trabajo

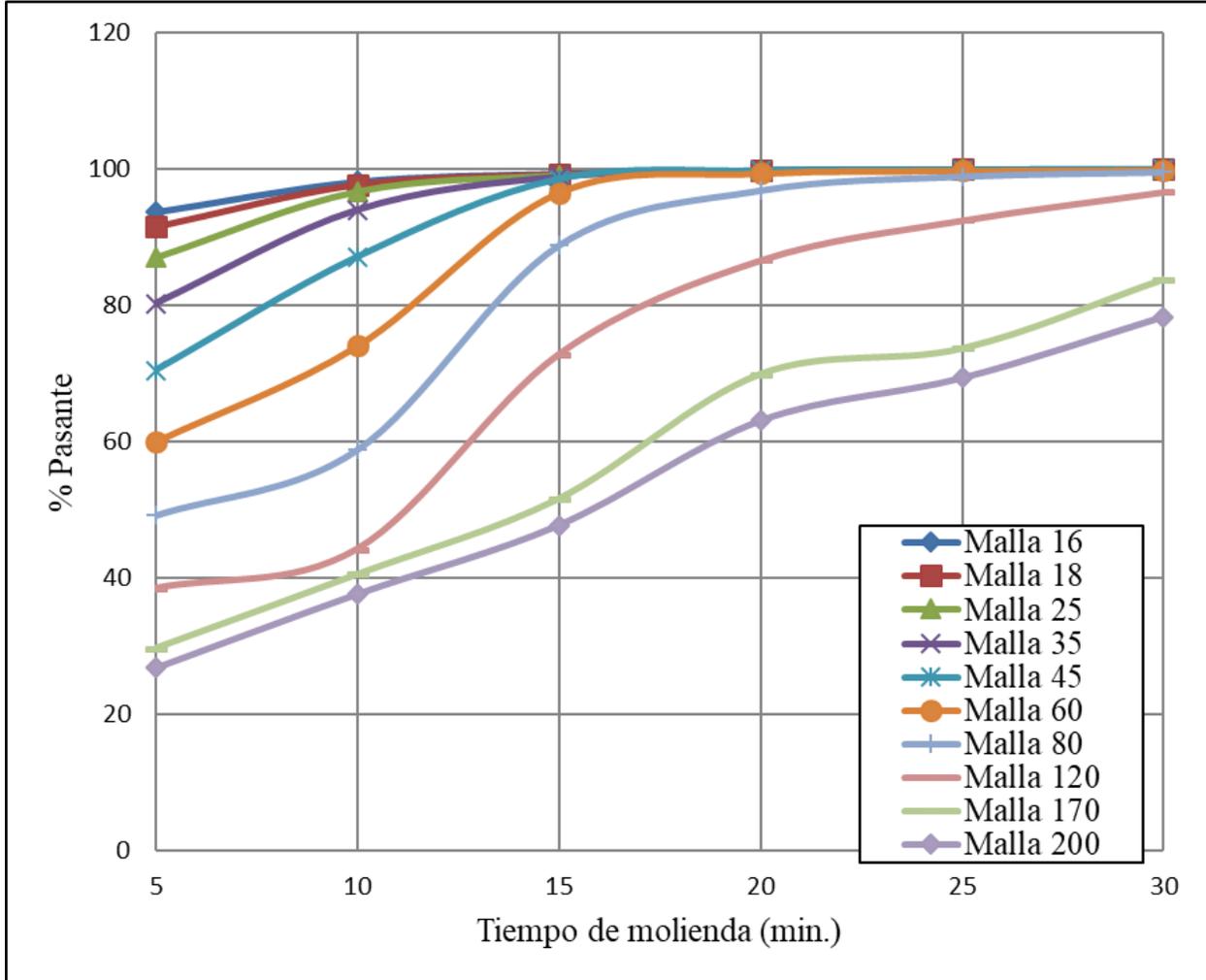
Variables	Descripción	Unidades	Interpolación lineal	Función Gaudin-Schumann
			Valores	Valores
Pi	tamaño del tamiz de prueba	mm	0,075	0,075
Gbp	tasa de moliendabilidad	g/rev	1,033	1,033
P80	80 % de tamaño de paso del producto del circuito	mm	0,050	0,050
F80	80 % del tamaño de paso de la nueva alimentación	mm	1,39652	1,54389
Wi	Work Índice	kWh/t	15,40	15,23

## 6.2. Moliendabilidad

Lo ensayos de moliendabilidad, realizados en el Laboratorio de mineralurgia ubicado en la sección de Ingeniería de Minas de la Pontificia Universidad Católica del Perú, fueron desarrollados para tiempos entre 5 y 30 minutos con intervalos de 5 minutos.

El procedimiento fue mencionado previamente y la gráfica de moliendabilidad se muestra en la figura que se encuentra a continuación. Para observar a más detalle los resultados de los ensayos revisar el Anexo 2.

Figura 2: Moliendabilidad del mineral de cobre



## 7. Conclusiones

Como se ha mostrado, el valor del índice de trabajo o Work Index obtenido se encuentra dentro del rango proyectado, entre 4 y 30 kW-h/tonelada métrica procesada. El valor obtenido de 15,4 o 15,23 kW-h/tonelada métrica procesada, es característico de un material duro; siendo una referencia el cuarzo, que tiene un índice de trabajo aproximado de 12,7 kW-h/tonelada métrica procesada. Asimismo, la utilización de dos mallas adicionales de mayor tamaño, para la determinación de la distribución de tamaños de la cabeza inicial del mineral, nos permite comparar dos resultados. Si bien estos son cercanos, nos permiten ser más acertados en la obtención del tamaño de malla, para el cual se tiene un 80% pasante inicial. Por otra parte, la interpolación lineal nos entrega el resultado más exacto. Esto es consecuencia de que no se tiene que proyectar una curva de distribución como lo plantea Gaudin-Schumann.

Del mismo modo, el requerimiento del ensayo de Bond plantea que el ensayo se debe realizar hasta que el valor de la tasa de moliendabilidad sea estable durante tres ciclos consecutivos. Para este trabajo de investigación en particular, se realizaron nueve ensayos, a pesar que el resultado se volvió estable desde el tercer ciclo en adelante. Es decir, se pudo finalizar la experimentación luego de desarrollar el sexto ensayo.

Por otra parte, la curva de moliendabilidad es representativa de un mineral con mena dura, esto se constata con la obtención de un porcentaje de pasante de la malla 200 del 80% luego de realizar la molienda durante 30 minutos. Este resultado coincide con el valor obtenido del índice de trabajo, siendo este característico de un material duro. Asimismo, la distribución de las granulometrías a lo largo del tiempo nos permite ver que el pasante de malla 200 aumenta de manera lineal con un incremento de 10% aproximadamente por cada 5 minutos de molienda. Finalmente, la distribución de tamaños de mallas seleccionada es adecuada para realizar el análisis

granulométrico y la posterior curva de moliendabilidad de este mineral con mena principal calcopirita. Esto se observa ya que se obtiene una distribución clara de los tamaños de grano para tiempos de hasta 15 minutos. Luego de este tiempo son las mallas de tamaño 80, 120, 170 y 200 las que nos muestran la distribución de tamaños.



## Bibliografía

Blanco, E. A. (2014). *BLOQUE II – CAPÍTULO 8. MOLIENDA*. Cantabria: Universidad de Cantabria.

Bond, F. C. (1961). *Crushing and grinding calculations*. Chemical Engineering.

COES. (2017). *Estadísticas anuales: producción de electricidad*. Lima: COES.

Dirección general de Eficiencia Energética. (2017). *Guía de Orientación del Uso Eficiente de la Energía y de Diagnóstico Energético: Minería Metálica*. Lima: Ministerio de Energía y Minas.

Hijosa E, J., & Seminario, J. (2010). *Informe Final Taller de Diseño Mecánico: Diseño de Molino de Bolas*. Santiago de Chile: Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas de la Universidad de Chile- Departamento de Ingeniería Mecánica.

Ibarra, G., Heredia, M., Isla, L., & Caro, J. L. (2017). *Balance Nacional de Energía 2017*. Lima: Ministerio de Energía y Minas-Dirección General de Eficiencia Energética: Área de Planeamiento Energético.

Iberdrola. (2013). *Efectos ambientales de la producción Y distribución de energía eléctrica : acciones para su control y corrección*. . Madrid: Iberdrola.

Kelly, E. G. y Spottiswood, D. J. (1990). *Introducción al Procesamiento de Minerales*. Mexico DF: LIMUSA.

Ministerio de Energía y Minas. (2014). *Generación de energía eléctrica*. Lima: Ministerio de Energía y Minas.

Perugachi, P. (2009). *Manual de Minería*. Lima: Estudios mineros del Peru SAC.

Quiroz, I. (1986). *Ingeniería metalúrgica : operaciones unitarias en procesamiento de minerales*. Lima.

World Bank and Institute for Health Metrics and Evaluation. (2016). *The Cost of Air Pollution: Strengthening the Economic Case for Action*. Washington DC: World Bank.

Yáñez Traslaviña, J., García Páez, I., Pedraza Rosas, J. y Laverde Cataño, D. (2005). *Caracterización De Los Minerales Auríferos De La Zona Minera De San Pedro Frío (Bolívar-Colombia), Para La Selección De Los Procesos De Extracción*. Medellín: Dyna.



## Anexos

### Anexo 1: Resultados de ensayo de Bond

Período	Nueva alimentación (g)	Producto en la alimentación (%)	Producto en la alimentación (g)	Número de revoluciones (rev)	Tras revoluciones					
					Rebose (g)	Producto (g)	Producto neto generado (g)	Producto neto generado por revolución (g/rev)	Producto a generar (g)	Carga circulante (%)
1	1823,2	12,13	221,18	100	1487,7	335,5	114,32	1,14	480,21	443,43
2	335,5	12,13	40,7	420	1396,4	426,8	386,1	0,92	469,14	327,18
3	426,8	12,13	51,78	510	1253	570,2	518,42	1,02	451,74	219,75
4	570,2	12,13	69,17	445	1293,1	530,1	460,93	1,04	456,61	243,94
5	530,1	12,13	64,31	441	1311,5	511,7	447,39	1,02	458,84	256,3
6	511,7	12,13	62,08	452	1292,9	530,3	468,22	1,04	456,58	243,81
7	530,3	12,13	64,33	441	1305,4	517,8	453,47	1,03	458,1	252,11
8	517,8	12,13	62,82	445	1300,3	522,9	460,08	1,03	457,48	248,67
9	522,9	12,13	63,44	443	1298,7	524,5	461,06	1,04	457,28	247,61



## Anexo 2: Resultados de ensayo de moliendabilidad

### Tiempo 5

Nombre Malla	Abertura Micras	Peso muestra gr,	% Peso	% Peso Retenido	% Peso Pasante
Malla 16	1180	62,8	6,28	6,28	93,72
Malla 18	1000	21,8	2,18	8,46	91,54
Malla 25	710	44,8	4,48	12,94	87,06
Malla 35	500	68,3	6,83	19,77	80,23
Malla 45	355	97,7	9,77	29,54	70,46
Malla 60	250	104,5	10,45	39,99	60,01
Malla 80	180	108,2	10,82	50,81	49,19
Malla 120	125	107,4	10,74	61,55	38,45
Malla 170	90	87,6	8,76	70,31	29,69
Malla 200	75	29	2,9	73,21	26,79
- Malla 200		267,9	26,79	100	0
		156,1	100		

### Tiempo 10

Nombre Malla	Abertura Micras	Peso muestra gr,	% Peso	% Peso Retenido	% Peso Pasante
Malla 16	1180	18	1,8	1,8	98,2
Malla 18	1000	4,3	0,43	2,23	97,77
Malla 25	710	10,2	1,02	3,25	96,75
Malla 35	500	27,1	2,71	5,96	94,04
Malla 45	355	69,4	6,94	12,9	87,1
Malla 60	250	130,3	13,03	25,93	74,07
Malla 80	180	152,6	15,26	41,19	58,81
Malla 120	125	146	14,6	55,79	44,21
Malla 170	90	36,7	3,67	59,46	40,54
Malla 200	75	29	2,9	62,36	37,64
- Malla 200		376,4	37,64	100	0
			100		

### Tiempo 15

Nombre Malla	Abertura Micras	Peso muestra gr,	% Peso	% Peso Retenido	% Peso Pasante
Malla 16	1180	6,2	0,62	0,62	99,38
Malla 18	1000	1	0,1	0,72	99,28
Malla 25	710	1,6	0,16	0,88	99,12
Malla 35	500	1,6	0,16	1,04	98,96
Malla 45	355	4,1	0,41	1,45	98,55
Malla 60	250	19,6	1,96	3,41	96,59
Malla 80	180	77,8	7,78	11,19	88,81
Malla 120	125	159,6	15,96	27,15	72,85
Malla 170	90	212,1	21,21	48,36	51,64
Malla 200	75	38,9	3,89	52,25	47,75
- Malla 200		477,5	47,75	100	0
			100		

Tiempo 20

Nombre Malla	Abertura Micras	Peso muestra gr,	% Peso	% Peso Retenido	% Peso Pasante
Malla 16	1180	1,3	0,13	0,13	99,87
Malla 18	1000	0,2	0,02	0,15	99,85
Malla 25	710	0,2	0,02	0,17	99,83
Malla 35	500	0,2	0,02	0,19	99,81
Malla 45	355	0,5	0,05	0,24	99,76
Malla 60	250	3,5	0,35	0,59	99,41
Malla 80	180	25,2	2,52	3,11	96,89
Malla 120	125	102,5	10,25	13,36	86,64
Malla 170	90	167,2	16,72	30,08	69,92
Malla 200	75	68,3	6,83	36,91	63,09
- Malla 200		630,9	63,09	100	0
			100		

Tiempo 25

Nombre Malla	Abertura Micras	Peso muestra gr,	% Peso	% Peso Retenido	% Peso Pasante
Malla 16	1180	0,3	0,03	0,03	99,97
Malla 18	1000	0,1	0,01	0,04	99,96
Malla 25	710	0,1	0,01	0,05	99,95
Malla 35	500	0,1	0,01	0,06	99,94
Malla 45	355	0,2	0,02	0,08	99,92
Malla 60	250	1,1	0,11	0,19	99,81
Malla 80	180	8,7	0,87	1,06	98,94
Malla 120	125	64,5	6,45	7,51	92,49
Malla 170	90	188,1	18,81	26,32	73,68
Malla 200	75	43,4	4,34	30,66	69,34
- Malla 200		693,4	69,34	100	0
			100		

Tiempo 30

Nombre Malla	Abertura Micras	Peso muestra gr,	% Peso	% Peso Retenido	% Peso Pasante
Malla 16	1180	0	0	0	100
Malla 18	1000	0,1	0,01	0,01	99,99
Malla 25	710	0,1	0,01	0,02	99,98
Malla 35	500	0,1	0,01	0,03	99,97
Malla 45	355	0,1	0,01	0,04	99,96
Malla 60	250	0,6	0,06	0,1	99,9
Malla 80	180	3,2	0,32	0,42	99,58
Malla 120	125	29	2,9	3,32	96,68
Malla 170	90	128,6	12,86	16,18	83,82
Malla 200	75	54,9	5,49	21,67	78,33
- Malla 200		783,3	78,33	100	0
			100		