



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

EVALUACIÓN DE LA MOLIENDA EN UN MOLINO DE BOLAS DE
LABORATORIO A TRAVÉS DE LA MEDICIÓN DE LA INTENSIDAD DE SONIDO
CON UN SISTEMA ARDUINO

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A

FERNANDO PÉREZ ARVIZU

DIRECTOR DE TESIS

M. EN C. ANTONIO HUERTA CERDÁN

CIUDAD UNIVERSITARIA, CD. MX., 2022





Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO

PRESIDENTE: M. en C. Antonio Huerta Cerdán

VOCAL: Prof. Juan Manuel de la Rosa Canales

SECRETARIO: Manuel Mariano Herrero Terán

1er SUPLENTE: Samuel Kuperstein Aportela

2º SUPLENTE: Andrés Vela Avitua

**SITIO DONDE SE DESARROLLÓ EL TEMA: FACULTAD DE QUÍMICA,
EDIFICIO D, CIRCUITO DE LA INVESTIGACIÓN CIENTÍFICA, S/N, CIUDAD
UNIVERSITARIA, COYOACÁN, MÉXICO 04510 D.F.**

ASESOR DEL TEMA: M. en C. Antonio Huerta Cerdán

SUSTENTANTE: Fernando Pérez Arvizu

Agradecimientos

A mis Padres, Fernando Pérez Reyes y Georgina Arvizu Velázquez, por su amor, formación, confianza, por estar cada segundo de mi vida apoyándome, por ser cada uno un ejemplo a seguir para mí, por nunca dejarme sólo. Por todo esto y mucho más. ¡¡Los amo con todo mi ser!!

A mi hermano Rodrigo Pérez Arvizu, por ser motivación, inspiración y apoyo para superarme y lograr mis sueños, además de ser mi compañero de vida.

A mis abuelitos: Fernando Pérez, Carmen Reyes, Teresita de Jesús Velázquez, por la confianza de que yo llegaría a este momento, y porque a pesar de que ya no están en cuerpo presente, siempre vivirán en mi corazón y me aconsejarán con sólo recordar todos los momentos tan hermosos que me dieron.

A mi abuelito, Jorge Pagola Arvizu. Por enseñarme a ser fuerte y siempre estar con una sonrisa a pesar de cualquier circunstancia.

A mi prima, Lorena Angélica Hernández Arvizu. Por ser siempre consejera, por enseñarme con su ejemplo que somos capaces de lograr lo que queremos a pesar de todo. Te llevo en mi corazón, y en mi memoria siempre estarán las risas y las aventuras que vivimos juntos. Gracias por guiarme desde el cielo.

A mi madrina, Teresita de Jesús Arvizu Velázquez. Por ser una segunda madre para mí, por estar en todo momento apoyándome y confiando en mí, ya sea en las buenas y en las malas.

A todos mis tíos: Blanca Pérez Reyes, Jorge Arvizu Velázquez, Rubén Pérez Reyes, Arturo Almeida Ronquillo, Lorena Arvizu Velázquez, Carmen Morales, Javier Pérez Reyes, J. Antonio Arvizu Velázquez, Juan Pérez Reyes, Omar Arvizu Velázquez y Antonio Pérez Reyes. Por todo el cariño, apoyo y confianza.

A mis primos, Alan Almeida Arvizu, Antonio Pérez Morales, Arturo Almeida Arvizu, Lucía Origel Pérez, Anahí Almeida Arvizu, Vanesa Pérez Morales, Brenda F. Hernández Arvizu, Nohemi Origel Pérez, Berenice F. Hernández Arvizu, Patrik Pérez, Liam Pérez, Marifer Arvizu, Antonio Arvizu, Naomi Arvizu y Jorge Arvizu. Por tantos momentos felices, apoyo, confianza en mí y cariño.

A mi amigo, Oscar García Ruíz. Por brindarme tu amistad tanto tiempo, por cantar, gritar, y saltar en cada concierto que estuvimos juntos. Serás canción, acordes, guitarras y luz. Aunque estés en el cielo yo siempre te recordaré, mi gran amigo.

A mis amigos: Octavio Augusto Luna Medina, Ilse Díaz Pérez, Sesandary Catalán, Laura Valdez, Frida Ruiz, Carlos J. Ramírez Sasso, David A. Lemus Vargas, Yamilett García, Pamela Guillén, Sam Silva, Beto Silva, Mario Reséndiz, Alexis Venegas, Diana Jacobo, Alfonso Vázquez, Francisco Vázquez, Karen Mojica, Carlos J. Ramírez, Monica Oliveros, Gabriela Zaldivar, Eduardo Galindo, Arely Resendiz, Emanuel Castillo, Alfredo Fuentes, Vicky Del Valle, Irish Díaz, Alexandra De Anda, Sharon Saraí Sánchez, Xathziri Alquicira, Ángel Rodríguez y el resto de amigos que me acompañaron también en mi vida de estudiante de licenciatura. A ustedes sólo me queda decirles Gracias por tanto apoyo, son la familia que elegimos en el camino de la vida.

A mi asesor de tesis, el M. en C. Antonio Huerta Cerdán. Quién quiero y considero como parte de mi familia. Quién siempre me ha brindado su apoyo y buen consejo durante toda mi carrera universitaria. Gracias por siempre apoyarme y motivarme a superarme.

A Ibet Navarro Reyes, quien me formó como su alumno, me apoyó como socia en mis proyectos, los más importante: me brindó su amistad. Gracias por nunca dejarme sólo y apoyarme en todo. Tienes un espacio muy especial en mi corazón.

A todos mis profesores que estuvieron presente en mi vida de estudiante: Rita Regina Morales Valdepeña, Laura Hilda, Adriana Treviño, Ibet Navarro Reyes, Ignacio Alejandro Figueroa Vargas, Antonio Barrera, Reina García, Alexis Dulzaides, Plinio Sosa, Balbina, entre otros.

A Adriana Pacio, porque desde el primer día que me conoció confió en que llegaría hasta donde estoy y más, porque gracias a su excelente vocación, cariño y profesionalismo, siempre he podido salir adelante a pesar de cada conflicto mental que he tenido. ¡Te quiero mucho!

Por su puesto a mi jurado: M. en C. Antonio Huerta Cerdán, Mtro. Juan De la Rosa Canales, Mtro. Manuel Mariano Herrero Terán.

Por último, quiero agradecer a “Grupo México” junto con el M. en C. Antonio Huerta Cerdán y su esposa Zulema por darme la oportunidad de realizar práctica profesional en su planta de Santa Bárbara Chihuahua, además de recibirme como visitante en su planta de San Luis. También por también apoyarme otorgándome el mineral con el cual realicé la investigación de esta tesis.

Índice

Resumen	1
Hipótesis	3
Objetivos.....	4
Capitulo1. Introducción	5
Capitulo 2. Marco teórico	6
2.1 Molienda.....	6
2.2 Sonido	9
2.3 Sensor	9
2.4 Arduino	10
Capitulo 3. Metodología de trabajo.....	12
3.1 Sistema de Arduino: Selección de la placa Arduino, protoboard, sensor, y circuitos.....	14
3.2 Sistema Arduino: Diseño, configuración, y armado del sistema Arduino.	14
3.3 Sistema Arduino: Desarrollo del programa.	16
3.4 Sistema Arduino: Arranque del equipo y verificación de su funcionamiento.	19
3.5 Sistema de molienda: Caracterización del mineral CuFeS_2	20
3.6 Sistema de molienda: Caracterización Menagráfica.	20
3.7 Sistema de molienda: Índice de trabajo de mineral (W_i).	22
3.8 Sistema de molienda: Análisis granulométrico de llegada.....	23
3.9 Sistema de molienda: Tamaño de liberación.....	24
3.10 Sistema de molienda: Pruebas de determinación para tiempos de molienda.....	25
3.11 Experimentos con las pruebas de sonido	25
Capitulo 4. Resultados y análisis de resultados	28
4.1 Construcción y programación del sistema de medición de intensidad del sonido vía Arduino.....	28
4.2 Caracterización menagráfica del mineral de calcopirita de llegada.....	34
4.3 Análisis granulométrico del mineral de calcopirita de llegada.....	38
4.4 Determinación del Índice de trabajo del mineral de calcopirita (W_i).....	39
4.5 Determinación del tamaño de liberación	43
4.6 Pruebas Determinación del Tiempo óptimo de molienda al 80% Ac (-)	47
4.7 Pruebas de molienda a diferentes cargas de bolas.....	50
4.8 Pruebas de molienda a diferentes cargas de mineral	53
4.9 Pruebas de sonido	57

Capítulo 5. Conclusiones.....	64
Bibliografía	65

Resumen

Los molinos industriales tienen una ineficiencia en el consumo de energía debido principalmente al bajo aprovechamiento de energía invertida en la reducción de tamaño dada por la transformación en otros tipos de energía. Esto causa un costo excesivo de molienda en la industria.

La molienda en molinos de bolas tiene consumos elevados hasta de 8 kWh/ton mineral ó más ^[1].

Derivado de lo anterior, podemos tener etapas de remolienda, en donde se elevan de manera adicional los costos de operación debidos a la reducción de tamaño de partícula.

Teniendo en cuenta dichas problemáticas, se decidió estudiar una de las energías manifestadas en el proceso de molienda a nivel laboratorio, la cual es la intensidad de sonido generada durante el proceso de molienda, en este caso aplicado a un mineral de calcopirita. El proceso de molienda produce sonido, el cual es energía que se libera con las fracturas de las partículas de minerales y también con las bolas de acero que impactan con las paredes del molino. Este sonido tiene diferentes intensidades de decibeles (dB) que ha sido la variable de estudio para determinar en qué momento tenemos la carga de mineral y de bolas para una molienda adecuada (80% Ac (-) en el tamaño de liberación).

Para poder realizar esta investigación se decidió por diseñar y construir un sistema de instrumentación por medio de las placas Arduino e incorporarlo a uno de los molinos de bolas del laboratorio de procesamiento de minerales del Departamento de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Química de la UNAM, para poder medir la intensidad de sonido durante su funcionamiento con mineral de calcopirita y así poder relacionarlo con una variable del proceso la cual fue el %Ac (-). Estos

experimentos se hicieron variando primero cargas de bolas en el molino y después carga de mineral, mientras se hacía la medición de intensidad de sonido.

En este trabajo se muestra la relación que existe entre la carga de bolas en molino a nivel laboratorio con la intensidad de sonido y la relación de la carga de mineral con la intensidad de sonido, dando como resultado un máximo en el %Ac (-) al variar la carga de bolas y un máximo al variar la carga de mineral. Teniendo también un valor de dB específico para cada máximo en la carga de bolas y en la carga de mineral.

Hipótesis

Si se miden y relacionan los productos de molienda caracterizados por su granulometría, con las variables de carga de bolas y carga de sólidos, a través de la medición de la intensidad de sonido generado por la acción de reducción de tamaño en un molino de bolas de acero a nivel laboratorio, se podrán tener mejores condiciones de control en la molienda de un mineral.

Objetivos

- a) Medir la intensidad de sonido a través del diseño y construcción de un sistema Arduino y sensor de sonido en el estudio de la molienda a nivel laboratorio.
- b) Generar la interacción de la comunicación serial entre el computador y el sistema Arduino, por medio de un programa que sea capaz de registrar la variable sonido.
- c) Obtener productos de molienda caracterizados por su granulometría, que relacionen la carga de bolas y la cantidad de mineral (calcopirita) molido con la medición de la intensidad de sonido.

Capítulo 1. Introducción

En los procesos de molienda, los molinos de bolas son los más empleados en nuestro país en el procesamiento de minerales. Los molinos de molienda son caracterizados desafortunadamente por su extremadamente baja eficiencia de energía ^[2]. Ha sido mencionado que, para generar nuevas superficies minerales, menos del 1% de electricidad es consumida para operar los molinos de bolas. El 99% restante se asume que sea disipada usualmente en ruido, calor, vibración. Sin embargo, tanto a nivel industrial como a nivel laboratorio, no se cuenta con elementos de medición en la energía que se pierde o transforma. ^[3]

La operación de molienda tratará la liberación de valores en menas que podrían presentarse como no tratables. También se advierte que pueden tener altos costos en el consumo de energía. Las energías específicas son mucho mayores que las encontradas en la molienda intermedia y puede alcanzar hasta 60 kwh/ston. La potencia total instalada en un circuito de molienda fina puede variar desde varios cientos de kW a varios MW. Por ejemplo, el molino instalado en *Isamill* tiene una potencia de 3 MW. Esta cantidad es pequeña en comparación con la potencia utilizada por un molino semiautógeno y un molino de bolas en un circuito de molienda primario. Un molino de bolas puede tener una potencia de hasta 15 MW, mientras que la potencia para un molino SAG puede llegar a 25 MW. Sin embargo, la energía utilizada para la molienda fina sigue siendo importante. La ingeniería de procesos de molienda fina está buscando más y mejores formas de reducir los costos de operación, a través de minimizar la energía requerida de molienda, así como empleando alguna energía transformada en el proceso mismo de molienda. ^[3]

Por ello resulta interesante emplear un tipo de energía transformada, producto de la acción de molienda, para tener información y seguimiento asociado al proceso de reducción de tamaño de partícula y a su vez, determinar condiciones adecuadas de molienda a través de la detección y medición de dicha energía. Por lo anterior, en este trabajo se hizo estudios de intensidad de sonido aplicados a pruebas de molienda en un mineral de calcopirita a través del diseño y construcción de un sistema Arduino con comunicación a un computador.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1 Molienda

La molienda forma parte de los procesos de conminución, los cuales son los procesos que tienen como fin, la reducción de tamaño de partículas. Debido a que la mayoría de los minerales se encuentran diseminados, es necesario liberarlos a fin de poder separarlos y concentrarlos.^[3]

Para el tratamiento y procesamiento de minerales, el principio es la trituración y molienda de los minerales. En las industrias que se dedican al procesado de minerales estos principios son de suma importancia para el tratamiento de sus materias primas, ya que de esto depende mucho la eficacia de los siguientes tratamientos en los minerales.

En el proceso de molienda se busca reducir los tamaños de partícula en los minerales a un tamaño aún menor que el que tienen los productos finales de trituración. Para lograr esto, durante mucho tiempo se han empleado una variedad de máquinas de molienda fina, sin embargo, la más común de estas es, el molino de bolas debido a su eficiencia en su operación.

En el procesamiento de minerales, se requiere una reducción de los tamaños de partícula de tal manera que los valores de los minerales puedan ser liberados. Para la alimentación de un molino de bolas industrial, el tamaño de partícula puede estar en un rango de una malla del número diez al número cien, o incluso más fino. ^[4]

La molienda tiene dos objetivos principales:

1. La adecuada liberación de los minerales de valor.
2. Incrementar las áreas de superficies de las partículas de mineral que tengan valor, para así mejorar la respuesta a algunos procesos fisicoquímicos y químicos, como pueden ser la flotación y la lixiviación.

La molienda es la etapa más importante en la conminución en el aspecto del costo en el procesamiento de minerales, esto se debe a que la molienda es la operación que más consume energía en la unidad minera, promediando 53% del consumo total (CEEC 2012).

Por tal motivo, es necesario operar las plantas de molienda con la mayor eficiencia posible en el aprovechamiento de la energía.

Una de las misiones en una planta de molienda, del ingeniero químico metalúrgico es, como primer paso conocer el nivel de eficiencia en que se encuentra la planta mediante mediciones y la determinación de indicadores adecuados y confiables.

Existen cuatro mecanismos de conminución:

1. Fragmentación por impacto.
2. Fragmentación por fricción.
3. Fragmentación por corte.
4. Fragmentación por compresión.

Se define a la eficiencia de la molienda, como la disminución en peso de cada fracción de tamaño en su paso por el molino.

Principales factores de eficiencia en molinos de bolas:

1. Carga de bola: La cantidad de carga de bola agregado al molino. Se considera como estándar, 35-40% del volumen del molino.
2. Porcentaje de sólidos en la alimentación: Máximo que proporcione la adecuada fluidez a la pulpa. Se considera como estándar, 60-80% de sólidos óptimo de operación.

Propiedades relacionadas con la calidad de la bola:

1. Buena resistencia a la abrasión.
2. Desgaste homogéneo. Mantener forma esférica.
3. Mínima diferencia de dureza superficial e interior.
4. Aceptable tenacidad. Menos bola rota.
5. Buena resistencia al ataque químico.

Entre mejor sean estas propiedades se obtendrá:

1. Mejor rendimiento de molienda, y por lo tanto, del proceso.
2. Menores tiempos de recarga de bola al molino.
3. Menores costos de operación en molienda.

Ley del desgaste: “El desgaste de la bola es proporcional a su área superficial”

El consumo será mayor con bola de menor tamaño.

Existen importantes parámetros que son usados durante la operación de un molino de bolas en el procesamiento de minerales:

- Velocidad crítica: Es la velocidad a la cual el molino de bolas debe girar, para lograr que las bolas en su interior se adhieran a este y logren llegar a la altura adecuada para poder desprenderse justo a la parte superior del molino para así poder caer sobre el mineral y lograr fracturarlo.
- Velocidad de trabajo. Es la velocidad en la cual el mineral, logra tener un movimiento y una posición adecuada para que las bolas del interior logren caer justo en ellas para reducir su tamaño.^[3]

2.2 Sonido

El sonido es un fenómeno que se produce al generar vibraciones de ondas mecánicas a través de algún medio elástico o fluido, siendo como principal el aire. El sonido no es capaz de generarse al vacío.

Estas vibraciones son producidas por ondas mecánicas que involucran energía y se pueden generar principalmente por la transferencia de energía mecánica, generando en parte vibraciones en el aire las cuales producen el sonido que muchos seres vivos somos capaces de percibir, como por ejemplo los humanos que lo percibimos cuando estas vibraciones del aire llegan hasta nuestro oído y hace vibrar nuestro tímpano.

En muchos casos se requiere medir la intensidad de sonido, como en las calles de las ciudades para saber la cantidad de contaminación auditiva. Y para realizar estas mediciones de intensidad de sonido se ocupa como unidad el decibel (dB), el cual también ocuparemos para este trabajo [5].

2.3 Sensor

Un sensor es cualquier dispositivo capaz de ser sensible a algún fenómeno del ambiente que lo rodea, y es capaz de manifestar esta sensibilidad con algún otro fenómeno perceptible. En otras palabras, es un dispositivo capaz de transformar una energía en otra [6].

Los sensores tienen un gran campo de aplicación, principalmente en la instrumentación. En la vida diaria están muy presentes como por ejemplo en el caso de un termopar, el cual es capaz de percibir la temperatura por medio de dos metales diferentes y al ocurrir un aumento de esta, el termopar es capaz de generar una diferencia de potencial que nosotros podemos registrar por medio de equipos de cómputo.

La energía final o de salida que emita un sensor depende de este y su uso. Como, por ejemplo, puede ser una intensidad de brillo, una diferencia de potencial, un movimiento mecánico, etc. [6]

2.4 Arduino

Arduino es una plataforma electrónica que tiene código abierto en C++ con un hardware y software sencillo de operar [7].

Esta plataforma cuenta con un catálogo de placas, las cuales están formadas por un microcontrolador adaptado a la placa. Un microcontrolador tiene como características que es un dispositivo con memoria interna, es programable, y tiene al menos entradas y salidas de tipo digitales. Estas placas tienen como diferencias entre ellas, el tamaño, el tipo de entrada para alimentación, la forma, el número de entradas y de salidas. Con estas características el usuario decide que placa utilizar de acuerdo con sus necesidades [8].

Las ventajas de Arduino frente de otros microcontroladores es que, tiene una gran compatibilidad con sistemas operativos como Linux, Windows, y macOS.

Son placas muy accesibles económicamente al público, su placa pre-ensamblada no supera los \$USA 50 [9].

Arduino cuenta con una variedad de placas con las cuales se pueden realizar distintos proyectos. En la figura 1, se muestra una imagen donde se puede observar un esquema de la placa Arduino UNO, la cual es una de las mas comunes.

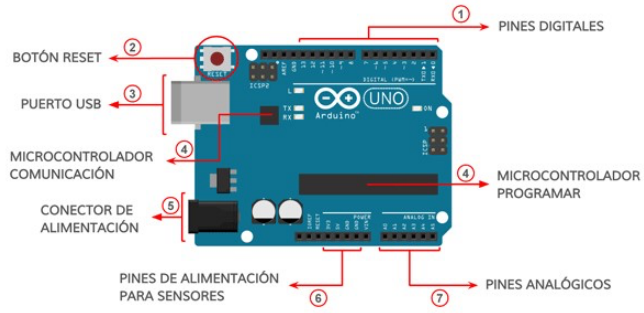


Figura No 1. Esquema de los componentes fundamentales de Arduino UNO, empleado en este proyecto.

Capítulo 3. Metodología de trabajo

Para realizar esta investigación se diseñó un equipo de medición de intensidad de sonido acoplado a un sistema Arduino, el cual se adaptó al molino de bolas del laboratorio para así aplicar las pruebas experimentales a un mineral de calcopirita, el cual fue caracterizado por diferentes técnicas. Todos estos métodos se describen en este capítulo y se representan con un diagrama de flujo en la Figura No 2.

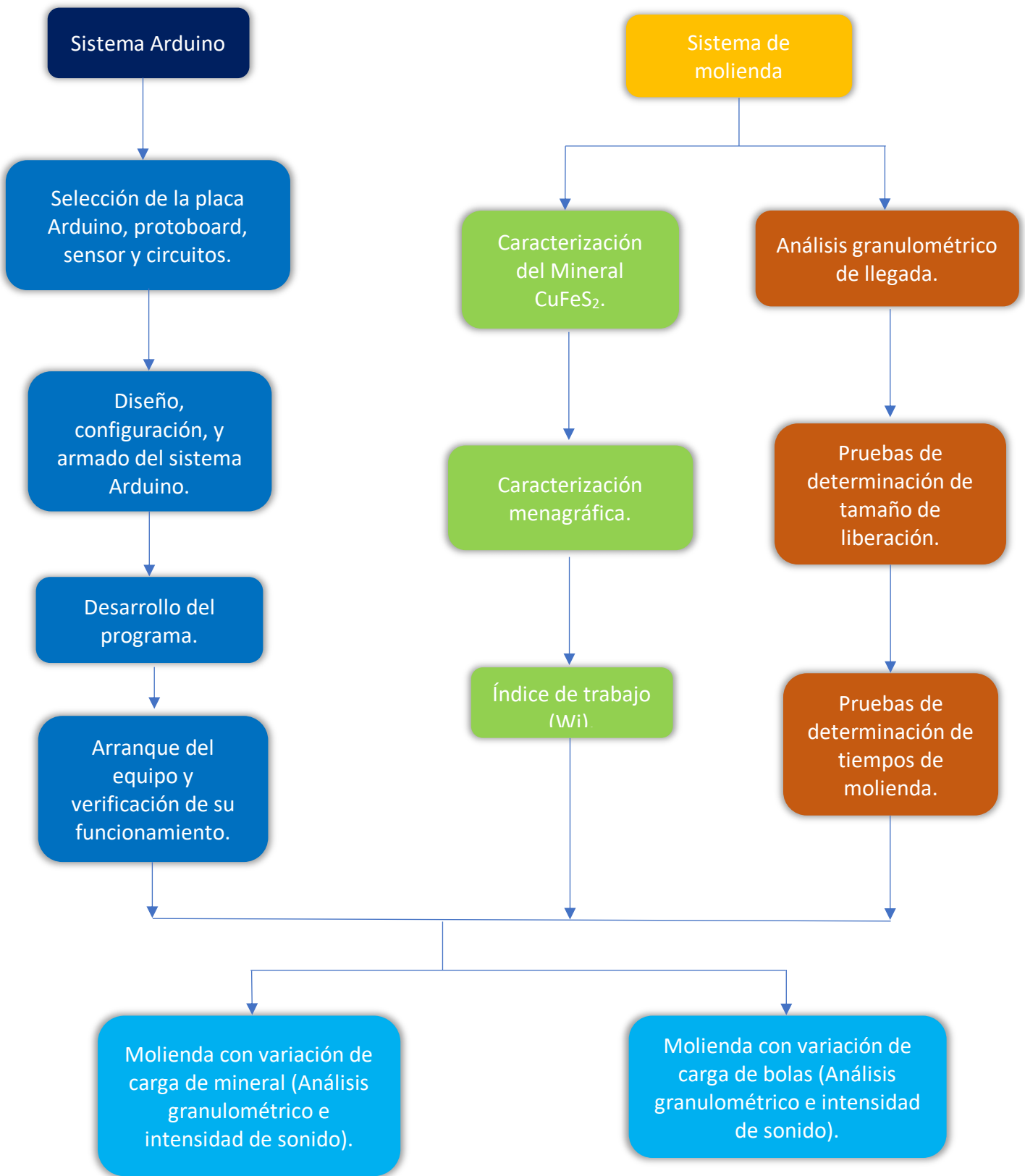


Figura No. 2 Diagrama de flujo de la metodología experimental realizada.

3.1 Sistema de Arduino: Selección de la placa Arduino, protoboard, sensor, y circuitos.

Para el uso de la placa Arduino, se seleccionó la Arduino UNO, ya que es la más adecuada para proyectos de sensores que requieren el registro de un variable. Una placa de mayor tamaño tendría un exceso de entradas y salidas para nuestro uso, además de aumentar su costo. Por otra parte, una placa con menor tamaño reduciría la memoria interna de la placa, afectando la posibilidad de tener más conexiones directas a la misma.

Después de seleccionar la placa, se procedió a la selección del sensor para leer y registrar la intensidad de sonido en este trabajo. El sensor seleccionado fue el micrófono sensor de alta sensibilidad (Módulo Ky-038), ya que está diseñado especialmente para las placas de Arduino y no requiere ajustes de conexión para su compatibilidad con las placas de Arduino UNO.

Además de esto se incorporó una Display Lcd 16x2 con un módulo de conversión I2c, con el fin de mostrar los datos en la computadora y tener un registro visual en el *display* al mismo tiempo, y de esta manera observar el correcto funcionamiento de registro del sistema Arduino mientras se realizan ajustes al sistema de molienda.

Se tuvo la selección de una *protoboard* de 400 puntos, con el objeto de contar con suficientes puntos de conexión de una forma cómoda. Para la realización de estas conexiones fueron seleccionados *jumpers* macho-hembra y macho-macho.

3.2 Sistema Arduino: Diseño, configuración, y armado del sistema Arduino.

Después de realizar la selección de dispositivos se llevó a cabo el diseño y armado. Para mostrar mejor su armado, mostramos el diagrama de conexión del sistema Arduino.

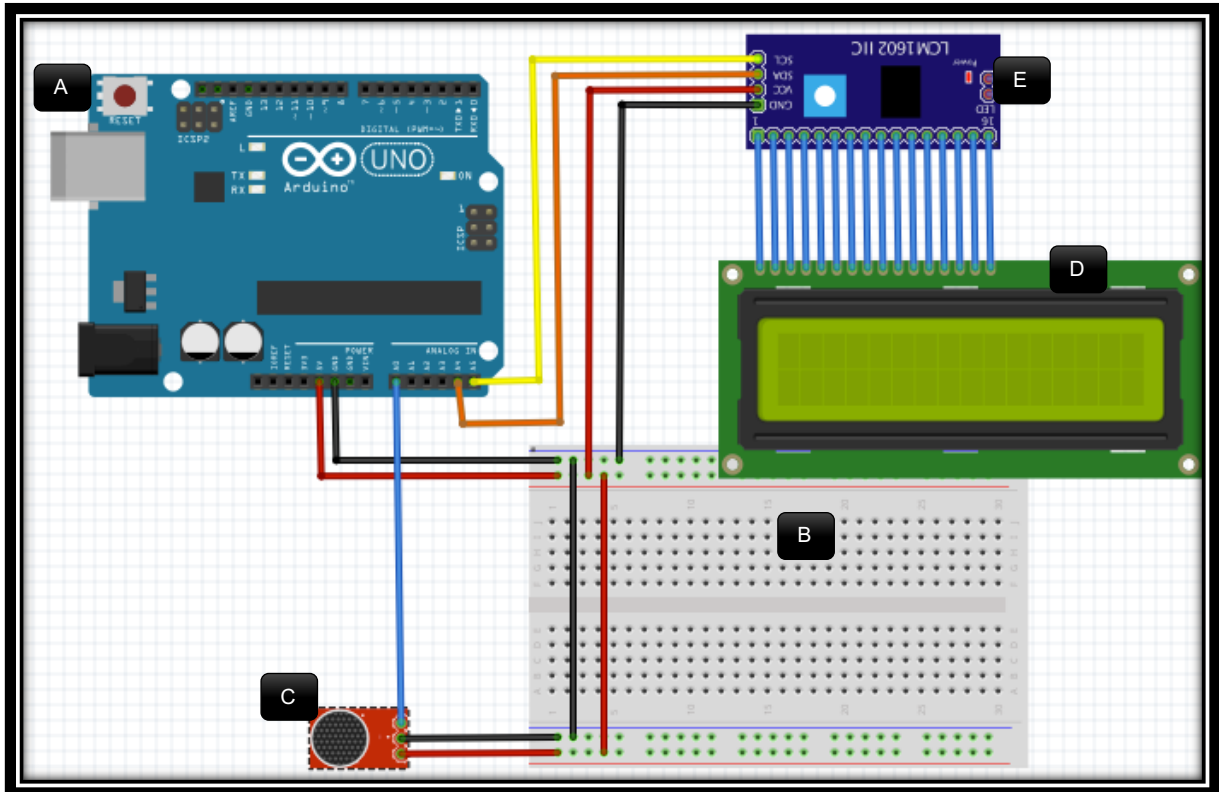


Figura No. 3 Configuración del sistema Arduino con el sistema de detección de sonido.

Como podemos observar en la Figura No. 3 el diseño del sistema Arduino constó de los siguientes componentes:

- A) Placa Arduino.
- B) *Protoboard*.
- C) Micrófono sensor de alta sensibilidad.
- D) *Display* LCD 16x2.
- E) Módulo de conversión I2c.

El diseño mostrado en la Figura No. 3 constó de llevar a cabo la conexión de la placa Arduino UNO a la *protoboard* para alimentarla con cinco volts (carga positiva) a través de una fuente de poder o bien, de la salida de un ordenador, marcado con un *jumper* de color rojo de acuerdo con el código de color de carga. Para realizar la conexión con tierra se empleó un *jumper* de color negro. De estos dos puntos se

conectaron otros dos *jumpers* con los mismos códigos de color para alimentar el otro extremo de la placa *protoboard*, y de esta forma tener todas las líneas de conexión designadas para carga positiva y para tierra en la misma.

Una vez realizadas dichas conexiones, fueron alimentados a partir de la *protoboard* dos dispositivos; el micrófono sensor de alta sensibilidad y el módulo de conversión I2c, con carga positiva y tierra, también se puede observar en la figura No. 3 el correcto uso de códigos de color.

Después de tener diseñada la alimentación eléctrica, se colocó un *jumper* de color azul que conecta de la placa Arduino UNO al micrófono sensor de alta sensibilidad como se ve en la Figura No. 3. Esto con el fin de enviar la señal analógica del sensor a la placa Arduino UNO, motivo por el cual se realizó la conexión en uno de los pines con entrada analógica.

De la misma manera el módulo de conversión I2c se conectó a la placa Arduino UNO para que esta pudiese enviar las señales de información al módulo. Estas conexiones se hicieron con los jumper amarillo y naranja, como se muestra en la misma figura No. 3.

Por último, se llevó a cabo la conexión del módulo de conversión I2c al *display* Lcd 16x2, el cual fue diseñado por el fabricante para este tipo de registros, de ahí que su conexión es directa como se muestra en la Figura No. 3.

3.3 Sistema Arduino: Desarrollo del programa.

Como todo microcontrolador, las tarjetas Arduino deben ser programadas para que realicen las funciones que el usuario y el programador deseen. Por tal motivo se realizó un análisis del diseño del sistema de medición y su armado final, para así poder desarrollar un código del lenguaje (C++) Arduino que permitiese interactuar de manera correcta con la placa, el sensor y el ordenador. El diagrama de flujo para la programación muestra los pasos que requiere hacer el programa para que el dispositivo funcione de manera correcta, esta se muestra en la figura No. 4.

Inicia declarando la variable “MIC” que es el registro del micrófono sensor y la variable “VALOR”, en la cual se van a registrar todos los valores que registre el sensor micrófono.

Después se da inicio al monitor serial y al *display* LCD, a través de la instrucción *void setup*, la cual sólo leerá el Arduino cada vez que se inicie el dispositivo.

Por último, en la *void loop*, se colocó todo lo que queremos que la placa Arduino lea de forma cíclica. Ahí se localizó el programa principal, que consta de leer los valores que registra el sensor micrófono para guardarlos en la variable “VALOR”, también se colocó la instrucción de imprimir (*print*) los valores en el monitor serial y en el *display* LCD.

Una vez que el equipo empezó a realizar las funciones deseadas, entre los componentes (Hardware) y la programación (Software), se pudo confirmar la comunicación y condiciones de medición de intensidad de sonido.

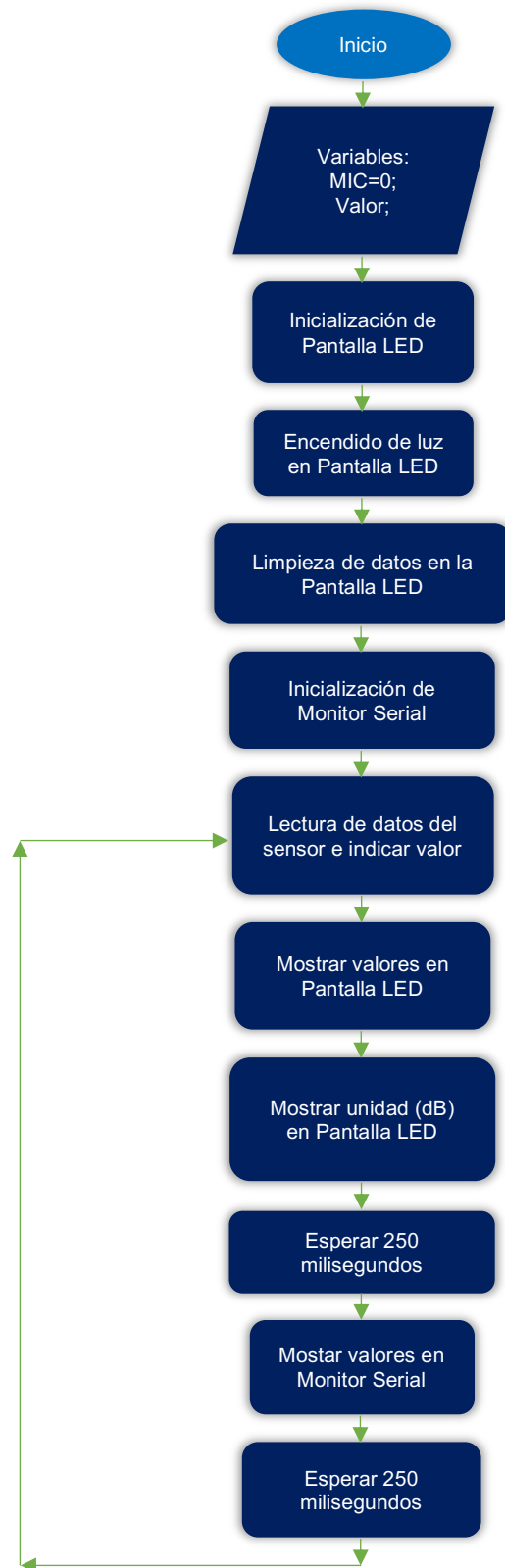


Figura No. 4 Diagrama de flujo de la programación (código) para la captura y registro de la intensidad de sonido.

3.4 Sistema Arduino: Arranque del equipo y verificación de su funcionamiento.

Para la incorporación del sistema Arduino al molino de bolas, se puso un soporte a un metro del molino de bolas, donde se colocó la computadora y el sistema Arduino. Posteriormente el micrófono sensor de alta sensibilidad se posicionó a 10 cm del centro de la parte transversal del molino de bolas.

Así se adaptó el sistema de sonido armado al sistema de molienda en seco nivel laboratorio, de tal forma que pueda medir la intensidad del sonido en (dB), esto se puede observar en la Figura No. 5



Figura No. 5 Sistema de medición de intensidad Arduino adaptado al sistema de molienda.

Para dar inicio a las mediciones y registro, se hizo funcionar el sistema de medición de intensidad de sonido Arduino, en ausencia de ruido externo, y cerca del molino de bolas del laboratorio. El sistema de medición Arduino, únicamente se enciende al conectarlo con un adaptador USB-Arduino. Posteriormente se hizo funcionar el molino para saber si el equipo detectaba la intensidad de sonido y si variaba con el registrado en ausencia de éste. Una vez realizada la confirmación de registro de la

intensidad de sonido, se llevaron a cabo registros realizando variaciones de carga de bolas al interior del molino, con aumentos de carga de 500 gramos, con el objeto de determinar el rango mínimo detectable de intensidad de sonido y el cambio de intensidad de sonido con el sistema de medición Arduino creado, de manera confiable.

3.5 Sistema de molienda: Caracterización del mineral CuFeS_2 .

Se realizaron diferentes pruebas de caracterización del mineral de calcopirita con el objeto de tener conocimiento de las propiedades del mineral en estudio.

El mineral de calcopirita provino de la empresa Grupo México, planta Buenavista del Cobre, Cananea Sonora.

Las pruebas de caracterización fueron las siguientes:

1. Sistema de molienda: Caracterización Menagráfica.
2. Sistema de molienda: Índice de trabajo de mineral (W_i).
3. Sistema de molienda: Análisis granulométrico de llegada.
4. Sistema de molienda: Tamaño de liberación
5. Sistema de molienda: Pruebas de determinación para tiempos de molienda.
6. Experimentos con las pruebas de sonido

3.6 Sistema de molienda: Caracterización Menagráfica.

Las partículas provenientes del área de trituración de la planta Buenavista del cobre, presentaron una granulometría de llegada de tamaño de $\frac{1}{2}$ pulgada, envasadas en cubetas de 20 kg. A partir de éstas se realizaron coneos hasta obtener muestras representativas de 10 gramos. De estas muestras se prepararon 4 partículas para su lavado y enjuague con el objeto de tener superficies limpias para su posterior montaje en resina.

Posteriormente estas partículas se montaron en moldes cilíndricos de 1 pulgada de diámetro, con resina de colada en frío. Una vez solidificada la resina con las

partículas minerales (probetas), se procedió al desbaste de la superficie en contacto con el mineral. Las lijas empleadas para tal efecto fueron: 120, 240, 320, 400, y 600. Por último, se llevó a cabo el pulido de las probetas empleando como medio abrasivo, alúmina con tamaño de 1.0 micrómetro.

Una vez preparadas las probetas menagráficas, se procedió a su observación a través de un microscopio menagráfico de luz reflejada marca...bajo las condiciones mencionadas en la Tabla No. 1

Tabla No. 1 Condiciones de estudio menagráfico en las muestras de calcopirita

Campo Claro	Con Polarizador	Sin Polarizador	Nicoles Paralelos	Nicoles Cruzados
Campo Oscuro	Con Polarizador	Sin Polarizador	Nicoles Paralelos	Nicoles Cruzados

Las condiciones de estudio para las muestras fueron las siguientes:

- ✓ Sin polarizador, campo claro, nicoles cruzados 10x.
- ✓ Sin polarizador, campo obscuro, nicoles cruzados 10x.
- ✓ Sin polarizador, campo claro, nicoles paralelos 10x.
- ✓ Sin polarizador, campo obscuro, nicoles paralelos 10x.
- ✓ Con polarizador, campo claro, nicoles cruzados 10x.
- ✓ Con polarizador, campo obscuro, nicoles cruzados 10x.
- ✓ Con polarizador, campo claro, nicoles paralelos 10x.
- ✓ Con polarizador, campo obscuro, nicoles paralelos 10x.

A través de la Tabla No. 1 Se muestran las condiciones experimentadas tanto en campo claro como en campo oscuro, cruzando nicoles y en paralelo, así como con el uso de polarizador y ausencia de éste, que fueron realizadas sobre el mineral de calcopirita en el microscopio menagráfico.

3.7 Sistema de molienda: Índice de trabajo de mineral (Wi).

Con el objeto de tener conocimiento de la dureza del mineral en términos de energía se procedió a determinar el Wi (*Work index*), así como el consumo de energía del mineral en estudio.

El procedimiento para la determinación de la dureza consistió en: a) obtención de muestras representativas de mineral para la alimentación a la etapa de trituración, a partir del método de coneo y cuarteo, b) realización del análisis granulométrico en las 2 muestras de alimentación antes mencionadas c) conminución del mineral con los correspondientes registros de amperajes con carga y en vacío desarrollado por el motor, voltaje de línea, así como el tiempo de residencia del mineral dentro del equipo, ver Figura No.9. Finalmente se llevaron a cabo los cálculos de kw consumidos, flujo másico del sólido, determinación de F (alimentación) y P (descarga) al 80% Acumulado (-). A partir de estos valores fueron determinados, el consumo de energía y la dureza del mineral en términos de energía. En el Anexo A se muestran las ecuaciones utilizadas para la determinación de la dureza del mineral en kW-h/ston.

La medición del amperaje fue realizada en dos condiciones, una en vacío, es decir en ausencia de mineral y la segunda condición, cuando la trituradora estaba siendo alimentada con el mineral, ambas determinaciones se realizaron directamente sobre uno de los cables del motor y el voltaje de línea en uno de los contactos de alimentación al motor. Las mediciones de amperaje y voltaje se llevaron a cabo con un multímetro de gancho marca Hukki, así como se muestra en la Figura No. 6

Una vez obtenidos los kw consumidos en la trituradora a través del producto voltaje por diferencia de los amperajes obtenidos y considerando el número de fases del motor, se procedió a determinar el flujo másico del mineral procesado, considerando los gramos alimentados a la trituradora y su tiempo de residencia en el equipo (ston/h). El cociente de la potencia desarrollada entre el flujo másico obtenido permitió determinar el consumo de energía W en kW-h/ston. Finalmente, la dureza

del mineral fue determinada a través de la ecuación No. 4 de Fred C. Bond en el anexo A, sustituyendo los valores de consumo de energía W obtenida y los valores de tamaño de partícula en micrómetros al 80% Ac (-) en la alimentación y descarga de la trituradora.



Figura No 6. Medición de Amperaje sobre el motor de la trituradora, en la determinación del índice del trabajo (W_i) del mineral de calcopirita.

3.8 Sistema de molienda: Análisis granulométrico de llegada.

A partir de las muestras obtenidas por el método de cono y cuarteo y se realizó el análisis granulométrico sobre 2 muestras de mineral para determinar el espectro de tamaños representativos de la alimentación a la etapa de molienda.

El cono y cuarteo se llevó a cabo alimentando al cono 20 kg de mineral obteniendo 4 secciones con aproximadamente 5 kg cada una. Posteriormente se seleccionaron dos secciones opuestas del producto muestreado y se volvieron a alimentar al cono en una cantidad aproximada de 10 kg, repitiendo esta operación hasta obtener muestras representativas de 100 g para el tamizado, dicha cantidad fue la alimentada a cada proceso de clasificación. La selección de tamices fue realizada considerando el primer tamiz con una retención del mineral con menos del 10% en peso y las cribas subsecuentes con una progresión de raíz cuadrada de dos. El

mineral fue colocado en un ro-tap con tiempos de residencia de 10 minutos, como se muestra en la Figura No. 7

Después de haber clasificado el mineral en el equipo ro-tap, éste se retiró de cada una de las cribas y fue pesado en una balanza con el correspondiente registro de los pesos del mineral para poder realizar el respectivo tratamiento de datos, así como la representación gráfica del %Ac (-) vs tamaño de partícula.



Figura No. 7 Ro-Tap empleado para la realización del análisis granulométrico.

3.9 Sistema de molienda: Tamaño de liberación

Con el objeto de conocer las condiciones base para la realización de las pruebas de molienda, fue necesario determinar el tamaño de liberación y tiempo óptimo de molienda. Para ello se llevó cabo una molienda con un tiempo de residencia de 5 minutos, el producto fue congado y clasificado como se ha descrito anteriormente con el equipo Ro-tap. A cada fracción de mineral obtenido se le determinó el porcentaje de liberación vía microscopio óptico estereográfico, hasta obtener el 100% en una de las cribas. Al mismo tiempo se terminó el % Ac(-) en el tamaño de liberación. La cuantificación se realizó colocando una muestra del mineral recolectado con espátula sobre una superficie cuadrículada de 1 cm² de área, se contaron las partículas con valor, liberadas y no liberadas, llevando a cabo el cociente de ellas y obteniendo su valor porcentual, para de esta menar obtener el

por ciento de liberación, este procedimiento se realizó para cada criba analizada.

3.10 Sistema de molienda: Pruebas de determinación para tiempos de molienda.

Con el objeto de determinar el tiempo óptimo de molienda se llevaron a cabo moliendas con cargas de 500 g hasta obtener el 80% Ac (-) en el tamaño de liberación anteriormente mencionado.

Para ello se determinó la carga de bolas base a introducir en el molino, a través de la ecuación No. 5 mostrada en el Anexo B.

Una vez determinada la carga de bolas, se pesó e introdujo esta carga en el molino junto con 500 g. de mineral y se procedía al encendido del equipo de molienda con un tiempo de operación de 5 minutos, seguido de la descarga de mineral con la correspondiente reducción de tamaño de muestra a través del partidor Jones, para posteriormente llevar a cabo la determinación del análisis granulométrico descrito anteriormente. Dicho todos estos pasos se repitieron de manera cíclica hasta lograr obtener en el producto de molienda el 80% Ac (-) en el tamaño de partícula.

3.11 Experimentos con las pruebas de sonido

Se realizaron 10 pruebas de molienda y a cada prueba de molienda se le aplicó una medición de sonido para medir los decibeles (dB). Con el fin de relacionar los dB a una Carga de bolas (C_b), teniendo una Carga de mineral (C_m) constante y también relacionar los decibeles (dB) a una Carga de mineral (C_m), teniendo una Carga de bolas (C_b) constante.

Para realizar lo anterior primero se agregó la carga de bolas determinada anteriormente.

Ya teniendo este dato, se realizaron 5 experimentos con carga de mineral constante de 500 g. Uno de los 5 experimentos se realizó con la carga de bolas ideal calculada anteriormente, y para los otros 4 experimentos se vario la carga de bolas. Teniendo dos experimentos con menor carga de bolas y dos experimentos con mayor carga de bolas, con una variación entre cada experimento de 0.5 kg en la carga de bolas,

las condiciones de lo mencionado anteriormente se muestran en la tabla No. 2

Este parámetro de variación de 0.5 kg entre cada experimento se considero así, ya que al momento de que se termino de diseñar y construir el dispositivo de medición, se notó que el menor intervalo de variación detectable por este equipo fue con la variación de 0.5 kg.

Después se realizaron otros 5 experimentos, pero ahora dejando contante la carga de bolas a 8 kg, ya que esa es la carga ideal, y se vario la carga de mineral con un rango de 50 g tomando en cuenta una carga estándar de 500 g. De igual forma que en la variación en la carga de bolas, en la variación de carga de mineral, se realizaron dos experimentos con menor carga de mineral y dos con mayor carga de mineral a partir de la carga estándar. Teniendo un número total de experimentos de 10, así como se muestra en la tabla 2. Y en la Figura No. 8 podemos observar el registro de datos para estos experimentos.

Tabla No 2. Condiciones experimentales de molienda.

Número de experimento.	Carga de bolas (kg).	Carga de mineral (g).
1	7	500
2	7.5	500
3	8	500
4	8.5	500
5	9	500
6	8	400
7	8	450
8	8	500
9	8	550
10	8	600



Figura No. 8 Medición y registro del sonido en el sistema Arduino-computadora al molino de bolas.

Capítulo 4. Resultados y análisis de resultados

4.1 Construcción y programación del sistema de medición de intensidad del sonido vía Arduino

Como se mencionó en el capítulo de la metodología de trabajo, existen muchos tipos de placa Arduino. Por tal motivo fue necesario seleccionar la placa que más se adapte a nuestras necesidades.

Para el equipo de medición de intensidad de sonido, se requería un tamaño intermedio dentro de los tamaños existentes de placas Arduino, ya que esto significaba una cantidad de entradas y salidas estándar, para así poder incluir varias conexiones en la placa a los dispositivos con el que interactuaría este.

Ya teniendo claras las necesidades que requeríamos mencionadas anteriormente para el equipo de medición de intensidad de sonido, se decidió por seleccionar la placa de Arduino UNO.

Ahora, ya teniendo la placa Arduino UNO, se continuó por seleccionar el resto de los dispositivos que interactuarían con dicha placa para formar el equipo de medición de intensidad de sonido.

Estos dispositivos fueron:

Un micrófono, con su respectiva placa: el cual sería el sensor encargado de recibir las ondas de sonido para así transformar la energía sonora en impulsos eléctricos. El cual se facilita su calibración gracias a la placa a la que viene incorporada en el mercado.

Una *protoboard*: Esta sería la encargada de aumentar y facilitar las conexiones de los dispositivos entre ellos.

Resistencia: Esta es necesaria para la incorporación del *Led*, ya que sin esta el *Led* tiene alto riesgo de quemarse.

Jumpers: Estos son los que nos ayudarán a transportar los impulsos eléctricos, y así permitir la conexión entre dispositivos.

Ordenador: Para este se ocupó una computadora. La cual fue requerida además de para copilar el código de programación, se ocupó para que el equipo de medición de intensidad de sonido Arduino enviara los datos recibidos y se pudieran observar de forma cuantitativa.

Estos dispositivos mencionados anteriormente, los podemos observar por separado en las Figuras No. 9, 10, y 11

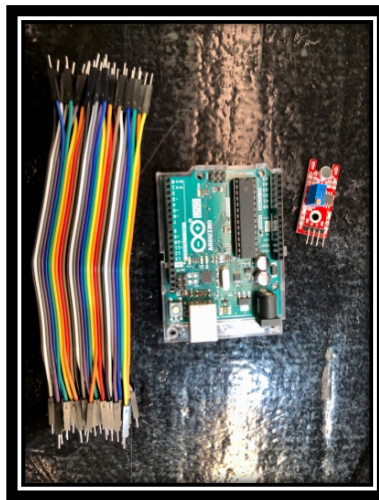


Figura No. 9 Placa Arduino UNO, *jumpers* y micrófono seleccionado para construir el sistema de medición de sonido.

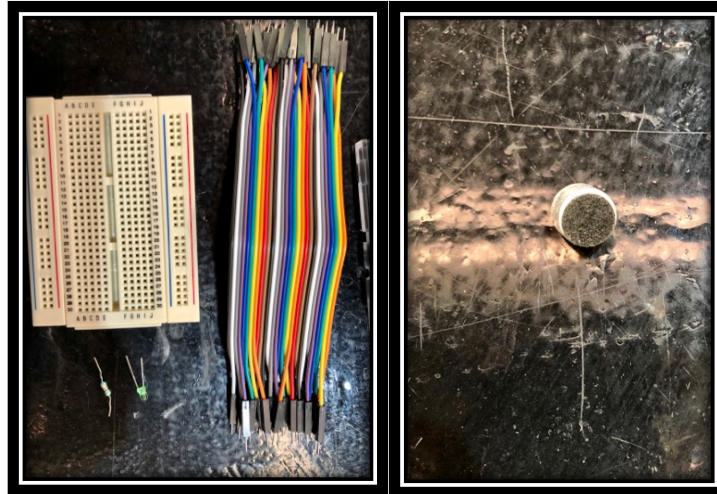


Figura No. 10 *Protoboard, Jumpers*, y micrófono seleccionados

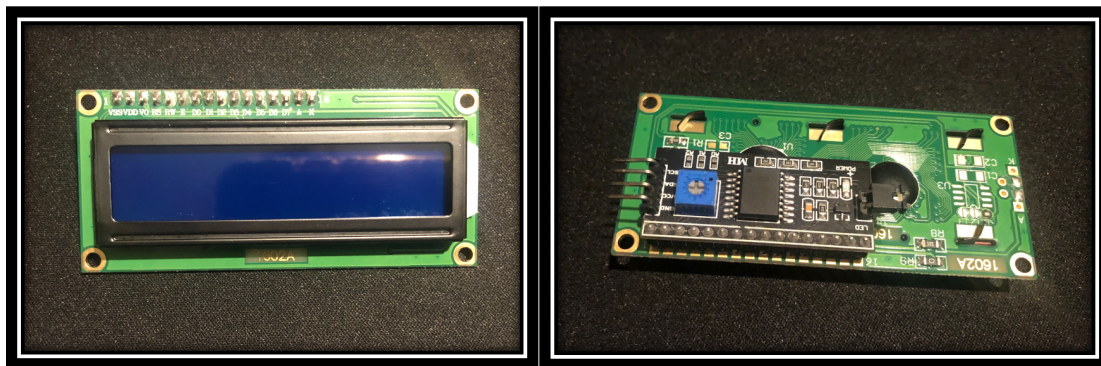


Figura No.11 Módulo I2C adaptado a la Pantalla LCD.

La etapa siguiente consistió en crear un código de programación a través de C++, el cual es el lenguaje adecuado para programar este tipo de placas Arduino.

Para este código de programación, se crearon dos variables. Una de esta fue la señal que recibiría el micrófono y la otra fue la energía transformada de micrófono a un valor cuantitativo. Después se programó un monitor serial además de un *display* LCD, el cual es la vía de comunicación entre la placa Arduino UNO y el ordenador con el objeto de enviar información de los datos recibidos y que éstos puedan ser representados y visibles.

Como último paso de la programación se colocó la indicación de que la energía transformada por el micrófono fuera almacenada en la memoria de la placa Arduino UNO y se enviara al monitor serial, para ser observado en el ordenador, todo ello también programado para realizarse en forma cíclica, en un intervalo de 0.25 segundos para poder registrar correctamente la lectura de los valores. El código de programación se muestra en la Figura No. 12, y en la No. 13 se observa la parte del sistema de medición Arduino incorporado al sistema de molienda, donde registran los decibeles (dB) emitidos por el molino de bolas.



```
Arduino_sensor_de_sonido_con_datos Arduino 1.8.10
Arduino_sensor_de_sonido_con_datos §
1 //Sensor de sonido con datos en pantalla LCD
2
3 #include <LiquidCrystal_I2C.h>
4 LiquidCrystal_I2C lcd(0x27,16,2); //parámetro (0x27 ó 0x3F, ancho, altura)
5
6 int MIC=0;
7 int VALOR;
8
9 void setup() {
10  lcd.init();
11  lcd.backlight();
12  lcd.clear();
13  Serial.begin(9600);
14 }
15
16 void loop() {
17  VALOR=analogRead(MIC);
18  lcd.setCursor(0,0);
19  lcd.print(VALOR);
20  lcd.print("dB");
21  delay(250);
22  Serial.println(VALOR);
23  delay(250);
24 }
25
Compilado
```

Figura No 12. Código de programación desarrollado para el sistema Arduino-sensores-computadora, para la medición y registro de la intensidad de sonido.

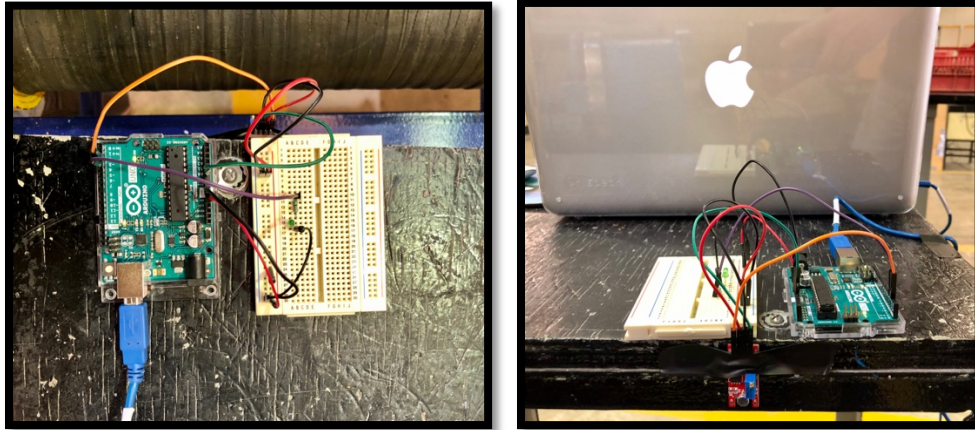


Figura No 13. Sistema Arduino-sensores-computadora construido para la medición de sonido emitido por el molino.

Una vez armado el sistema de medición de intensidad de sonido Arduino, se encendió y se llevó a cabo la verificación del adecuado funcionamiento del sistema de medición, a través de una prueba de calibración con 3 diferentes cargas de bolas dentro del molino, en ausencia de mineral, obteniendo sus correspondientes registros de intensidad de sonido. Las cargas de bolas fueron de 5, 6 y 7 kg. El registro de la intensidad de sonido obtenido fue de 2 dB en aumento por cada kg de bolas adicionado al molino.

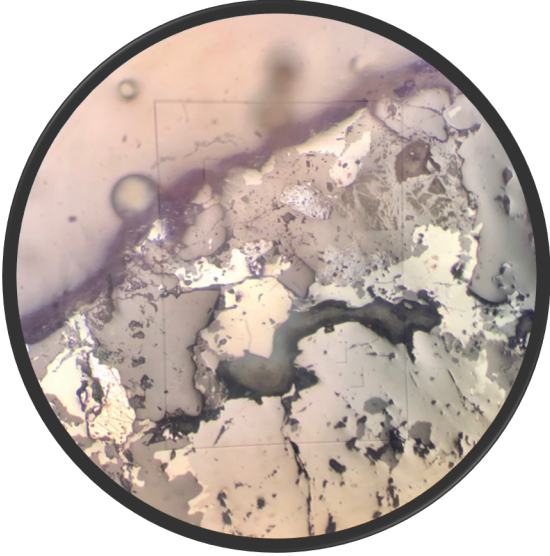

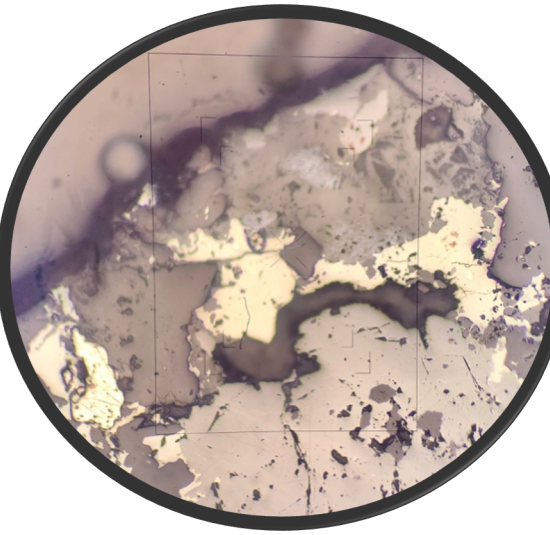

Con el objeto de determinar un aumento en la sensibilidad del registro de intensidad de sonido con respecto a la carga de bolas, se procedió a realizar variaciones de carga de 0.5 kg, desde 6 hasta 7 kg lográndose registrar valores de 1 dB por cada 0.5 kg de bola de acero colocado dentro del molino.

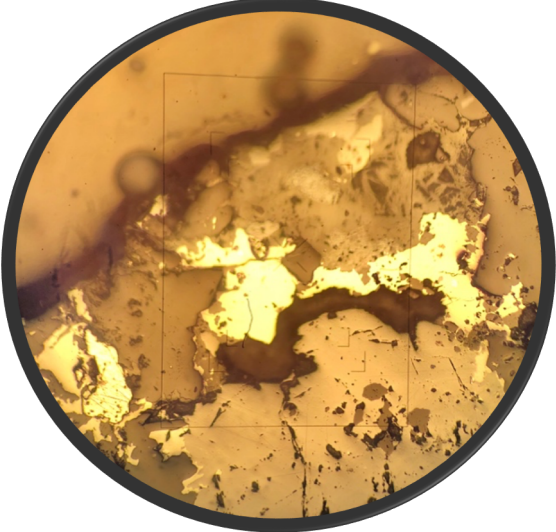

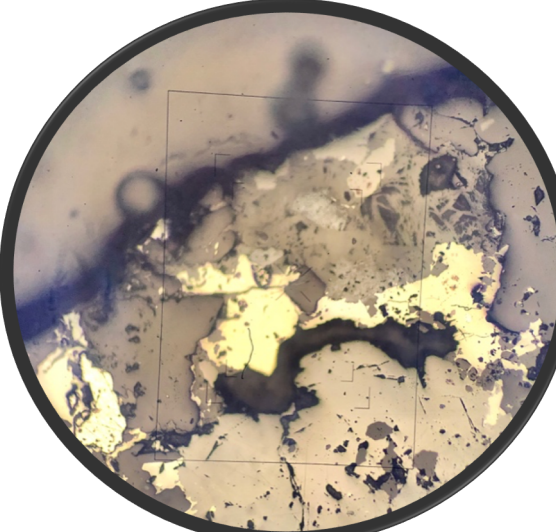
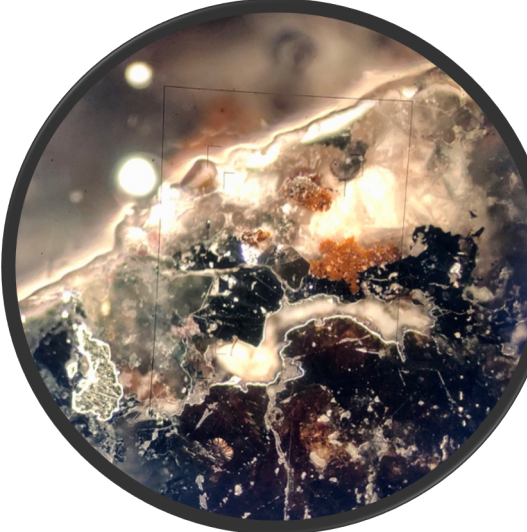
Ya teniendo la sensibilidad de sistema de medición de intensidad de sonido con Arduino para la carga de bolas, se procedió a verificar la sensibilidad, pero ahora con la carga de mineral.

Para esto se decidió que, si el equipo era capaz de registrar la intensidad de sonido con variación de 50 g en la carga de mineral, sería suficiente para las pruebas experimentales requeridas para esta tesis. Por tal motivo se experimentó moler con únicamente 500 g de mineral y 7 kg de carga de bolas (condiciones base de experimentación de pruebas de molienda) y después con 550 g de mineral con la misma carga de bolas. El resultado de esta prueba arrojó un aumento de intensidad de 1 dB por cada 0.05 kg/ mineral.

Las pruebas realizadas con el equipo de medición de intensidad de sonido Arduino construido, se consideraron exitosas y muy útiles para las pruebas experimentales necesarias para esta tesis. Esto quiere decir que todo lo que se realizó para construir el equipo de medición de intensidad de Arduino se realizó de manera correcta.

4.2 Caracterización menagráfica del mineral de calcopirita de llegada

	
<p>Figura No 14. Mineral de calcopirita sin polarizador, campo claro, nicoles cruzados 10x.</p>	<p>Figura No 18. Mineral de calcopirita sin polarizador, campo oscuro, nicoles cruzados 10x.</p>
	
<p>Figura No 15. Mineral de calcopirita campo claro, nicoles paralelos 10x.</p>	<p>Figura No 19. Mineral de calcopirita sin polarizador, campo oscuro, nicoles paralelos 10x.</p>

	
<p>Figura No 16. Mineral de calcopirita con polarizador, campo claro, nicoles cruzados 10x.</p>	<p>Figura No 20. Mineral de calcopirita con polarizador, campo oscuro, nicoles cruzados 10x.</p>
	
<p>Figura No 17. Mineral de calcopirita con polarizador, campo claro, nicoles paralelos 10x.</p>	<p>Figura No 21. Mineral de calcopirita con polarizador, campo oscuro, nicoles paralelos 10x.</p>

A partir del análisis menagráfico sobre el mineral de calcopirita se pudo observar de las figuras 14 a 17 en campo claro, la presencia de 4 fases minerales.

En la figura 17 se aprecia en la zona de las seis, una primera fase de textura equigranular anhedral, con un color gris claro.

En la zona de las 3, observamos una zona gris más oscura que en la anterior, teniendo una segunda fase de textura equigranular, anhedral.

En la zona de las 8 se muestra un tono brillante amarillo con rayas y puntos negros, esta es la tercera fase de textura equigranular con límites granulares irregulares.

En la zona intermedia del las 9 y las 3, se tiene una cuarta fase, pero de textura equigranular con límites granulares rectilíneos, esta fase se observa de color amarillo con lustre metálico, sin rayas, mostrando ser una fase y material más duro.

En la zona que se encuentra entre las 12 con el centro, tenemos una zona con color plateado mate con superficie rugosa y una misma zona, pero aún más pequeña justo arriba del centro por encima de una de las zonas amarillas brillantes, esta sería la quinta fase la cual tiene textura equigranular con límites granulares irregulares sin interpretación.

Por último, existe una sexta fase de textura equigranular con límites granulares irregulares sin interpretación, la cual está situada entre la zona de las 12 y 9, la cual es una fase gris con tono intermedio entre gris claro y gris oscuro.

En las figuras 18 a las 21 tenemos una visualización muy diferente a las figuras mencionadas anteriormente, lo cual es de gran ayuda ya que nos permite identificar las fases de otra forma a través del campo oscuro.

En la figura 19, podemos observar la primera fase en la zona de las 6 que en este caso tiene un tono café oscuro acaramelado, siendo característico de la presencia de esfalerita.

La segunda fase que se encuentra en la zona de las 3, la podemos notar de tono transparente con fondo oscuro, a su lado izquierdo percibimos un tono transparente, pero de fondo muy claro, perteneciente a la presencia de cuarzo con feldespatos.

La tercera fase que está en la zona de las 8 ahora se puede apreciar mejor, ya que tiene un lustre metálico más brillante pero muy rayado y de relieve no uniforme, característico de pirita.

La cuarta fase que está en el centro se parece mucho a la primera fase, tiene un tono oscuro, pero sin fondo acaramelado y lo notamos de textura muy liza equigranular de calcopirita.

Por último, la quinta fase, se puede apreciar una mezcla de rojo con gris en esta zona, la cual se encuentra parcialmente en el centro y en el cruce del centro y las 12, esta fase es correspondiente a la molibdenita.

A través del análisis de caracterización menagráfica se observaron 5 fases, siendo principalmente de interés 2; calcopirita y esfalerita las cuales mostraron una textura del tipo equigranular con lo cual se predice que el mineral será fácilmente liberable.

4.3 Análisis granulométrico del mineral de calcopirita de llegada

Tabla No 3. Datos experimentales para análisis granulométrico del material de llegada.

Tamaño (in) y No. de Malla	Tamaño (μm)	Masa (g)	%Retenido	%Acumulado (+)	%Acumulado (-)
½"	12700	0	0.00	0.00	100.00
¼"	6300	41.6	42.98	42.98	57.02
4	4699	8.4	8.68	51.65	48.35
6	3327	13.1	13.53	65.19	34.81
8	2379	5.1	5.27	70.45	29.55
10	1678	6.5	6.71	77.17	22.83
14	1300	3.7	3.82	80.99	19.01
16	1191	0.6	0.62	81.61	18.39
20	840	2.6	2.69	84.30	15.70
30	595	2.7	2.79	87.09	12.91
35	500	0.6	0.62	87.71	12.29
40	380	0.9	0.93	88.64	11.36
50	300	1	1.03	89.67	10.33
60	250	0.1	0.10	89.77	10.23
70	212	0.9	0.93	90.70	9.30
100	149	0.9	0.93	91.63	8.37
140	104	0.8	0.83	92.46	7.54
200	75	1.1	1.14	93.60	6.40
325	44	1.7	1.76	95.35	4.65
400	38	3.2	3.31	98.66	1.34
Pan	-38	1.3	1.34	100.00	0.00
Total		96.8	100		

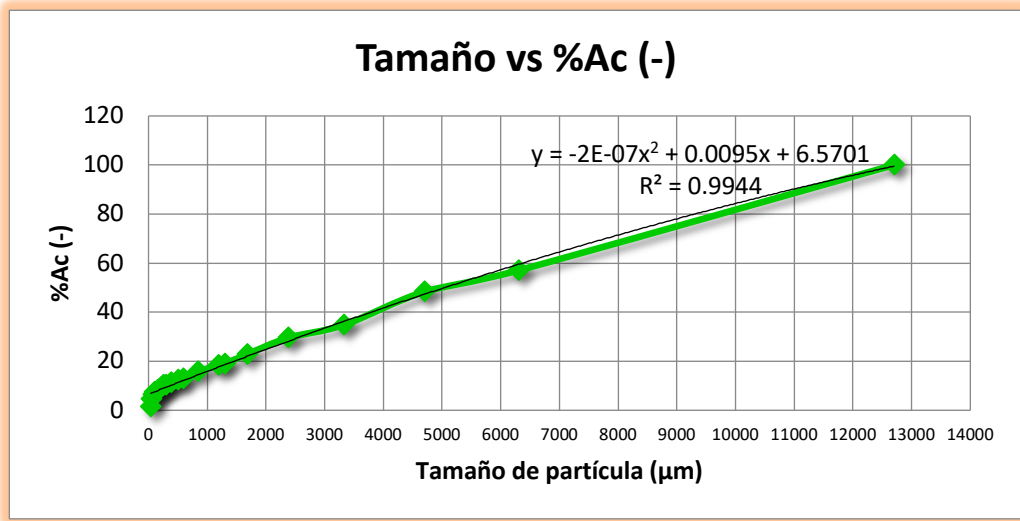


Figura No 22. Representación gráfica de la granulometría del mineral de llegada.

Referente a la caracterización del tamaño de partícula en el mineral de llegada de calcopirita, el análisis granulométrico mostrado, en la tabla 3, y su representación gráfica en la figura No 22, mostró un amplio intervalo de tamaño con partículas menores a 13000 µm y mayores a 38 µm, dominando en cantidad con más del 55% menores a 6300 µm.

4.4 Determinación del Índice de trabajo del mineral de calcopirita (Wi)

Tabla No 4. Datos de la muestra a analizar.

Muestra triturada (Kg)	Tiempo de trituración (s)
0.9354	2.6

Tabla No 5. Datos experimentales para análisis granulométrico en la alimentación al molino y su determinación de F80.

Tamaño (in) y No. de Malla	Tamaño (μm)	Masa (g)	%Retenido	%Acumulado (+)	%Acumulado (-)
1/2	12700	11.2	2.12	2.12	97.88
1/3	7935	367.3	69.56	71.69	28.31
3(1/2)	5660	132.8	25.15	96.84	3.16
5	3987	0.7	0.13	96.97	3.03
Pan	-3987	16	3.03	100.00	0.00
	Total	528			

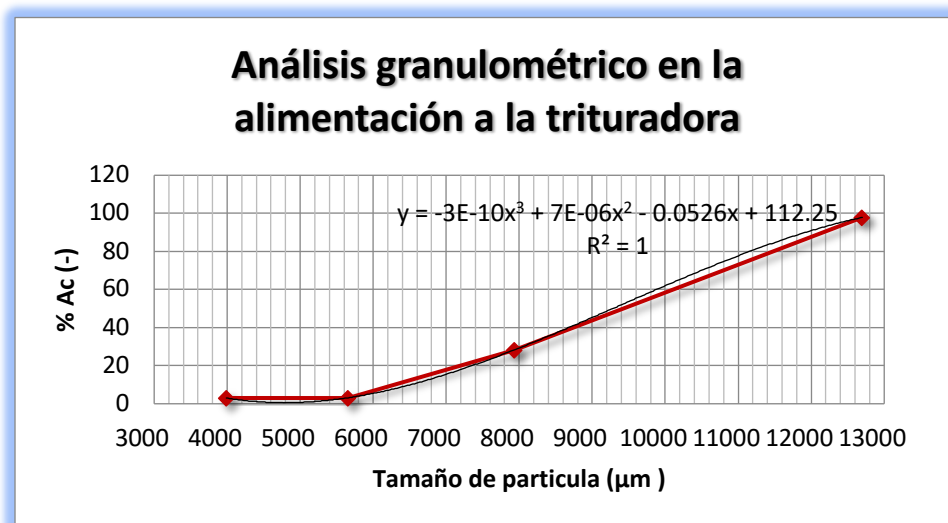


Figura No 23. Representación gráfica de la alimentación a la trituración para la determinación del valor F80 en el cálculo del W_i .

Tabla No 6. Datos experimentales para análisis granulométrico en el producto de trituración para la determinación de P80.

Tamaño (in) y No. de Malla	Tamaño (µm)	Masa (g)	%Retenido	%Ac. (+)	%Ac. (-)
½"	12700	17	3.45	3.45	96.55
1/3"	7935	167.5	34.00	37.45	62.55
3 ½	5660	191.2	38.81	76.27	23.73
5	3987	101	20.50	96.77	3.23
7	2819	1.5	0.30	97.08	2.92
8	2379	1.3	0.26	97.34	2.66
10	1678	0.4	0.08	97.42	2.58
12	1409	0.1	0.02	97.44	2.56
14	1300	0.1	0.02	97.46	2.54
16	1191	0.1	0.02	97.48	2.52
18	1000	0	0.00	97.48	2.52
20	840	0	0.00	97.48	2.52
30	595	0	0.00	97.48	2.52
Pan		12.4	2.52	100.00	0.00
	Total	492.6			

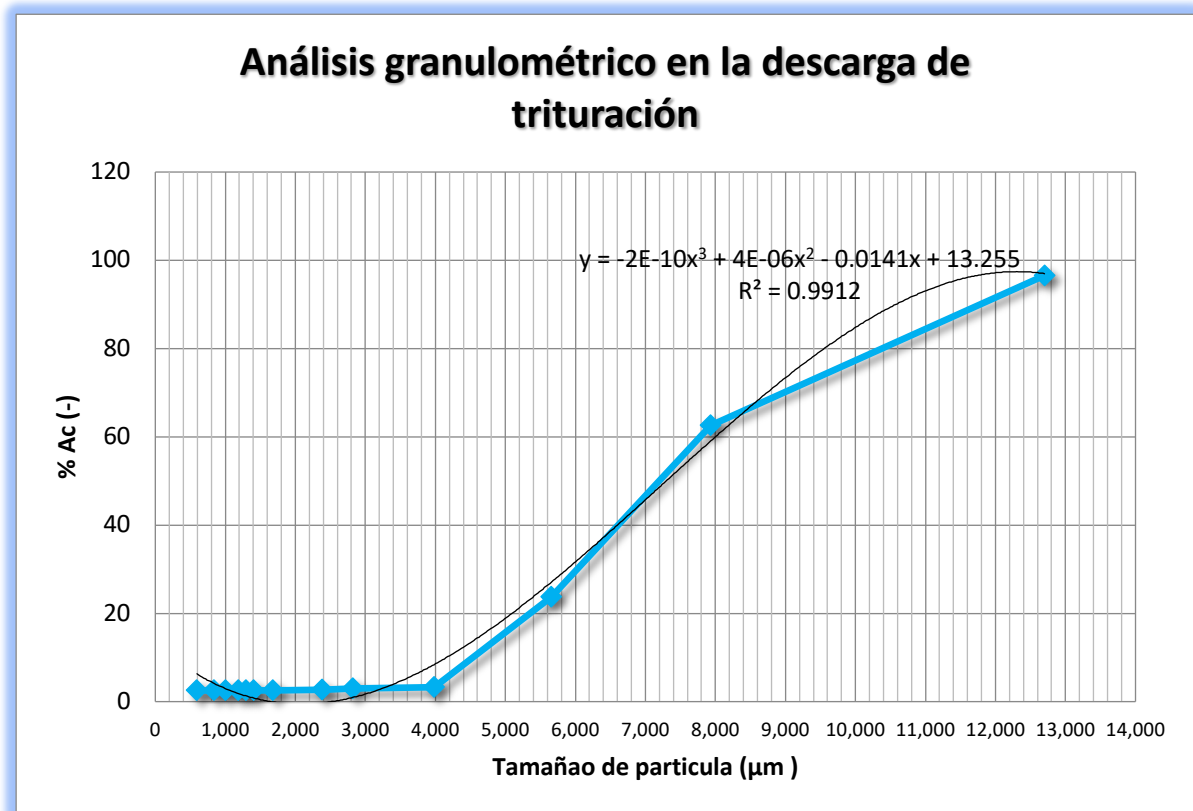


Figura No 24. Representación gráfica del producto de trituración para la determinación del valor P80 en el cálculo del Wi.

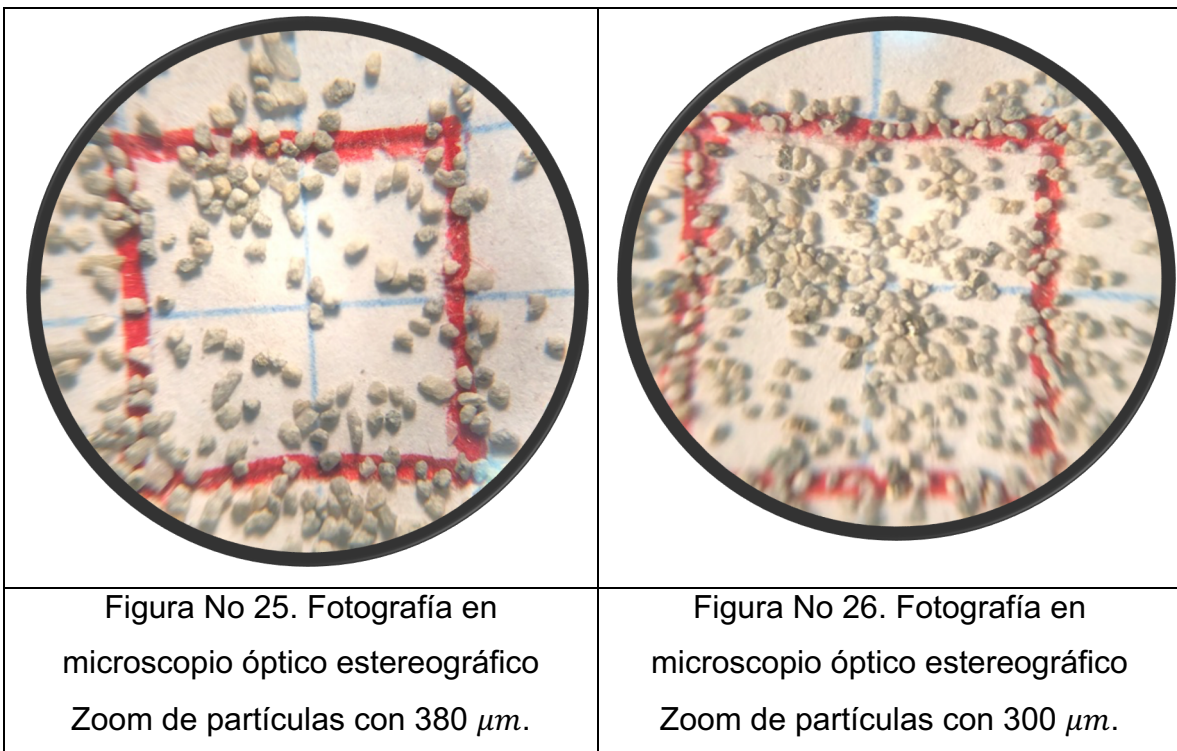
Tabla No 7. Datos y resultados del W y Wi del mineral de calcopirita en estudio.

lv(V)	lc(V)	V	NF	F80(µm)	P80(µm)	STPH	Kw	W (Kw-h/ston)	Wi (Kw-h/ston)
1.1	1.3	220	3	11420	10350	1.43	0.08	0.05	11.32

Para la caracterización en cuanto a dureza del mineral se refiere, a través del índice de trabajo (Wi), la tabla 4 muestra una adecuada cantidad de mineral 0.93 kg empleados en la alimentación de la trituradora, con registro de tiempo de trituración de 2.6 segundos. A través de la tabla No. 5 y la representación gráfica de la figura 23, se determinó el tamaño de partícula en la alimentación de la quebradora al 80% Ac (-) (F80) de 11420µm. Después de haber triturado el material en la quebradora de quijadas, se obtuvo el análisis granulométrico del producto obtenido y registrado

en la tabla No. 6 y figura No.24, de donde se puede observar que el tamaño de partícula en la descarga al 80% Ac (-) (P80) fue de 10350 μm . Finalmente, en la tabla No. 7 se presentaron los valores antes mencionados para la determinación, de la dureza del mineral de 11.32 kw-h/ston, este valor es congruente con el registrado al momento de ser enviado a las instalaciones del laboratorio de procesamiento de minerales y comunicado vía telefónica por la gerencia de la planta concentradora Buenavista del cobre.

4.5 Determinación del tamaño de liberación



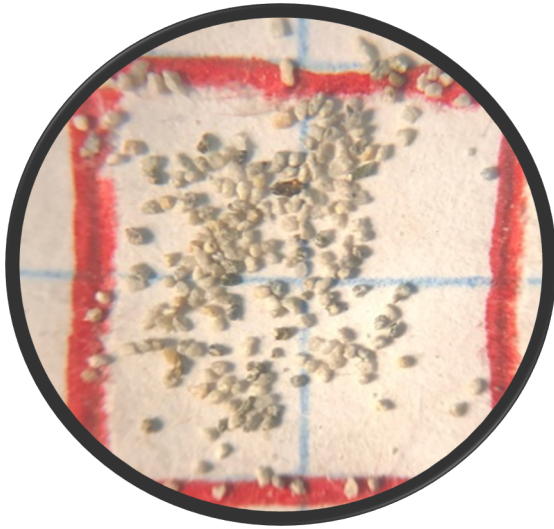


Figura No 27. Fotografía en
microscopio óptico estereográfico
Zoom de partículas con 250 μm .

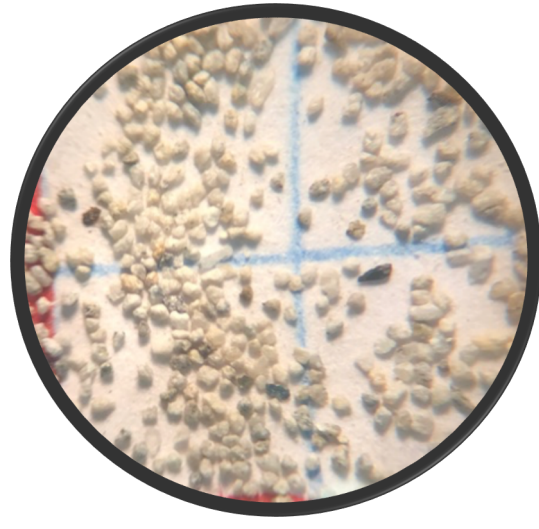


Figura No 28. Fotografía en
microscopio óptico estereográfico
Zoom de partículas con a 212 μm .

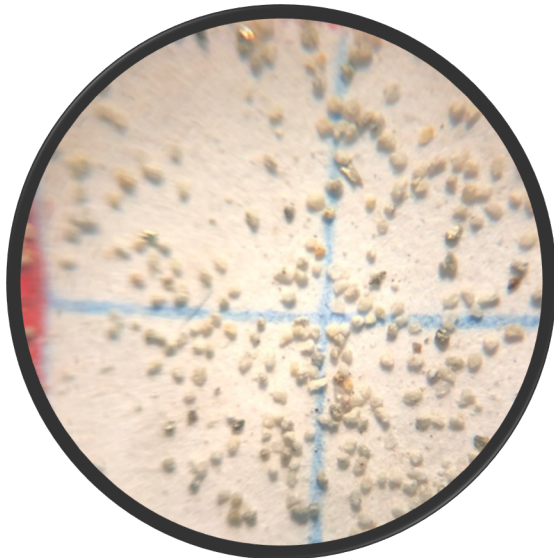


Figura No 29. Fotografía en
microscopio óptico estereográfico
Zoom de partículas con 149 μm .

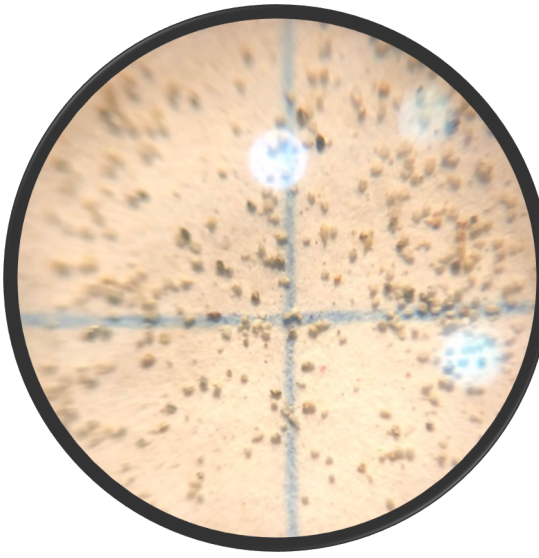


Figura No 30. Fotografía en
microscopio óptico estereográfico
Zoom de partículas con 104 μm .

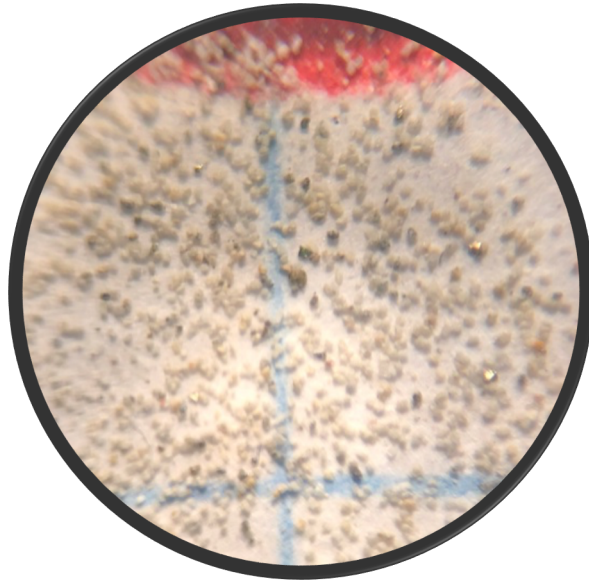


Figura No 31. Fotografía en microscopio óptico estereográfico Zoom de partículas con 75 μm .

Tabla No 8. Determinación del tamaño de liberación del mineral de calcopirita.

No. Malla	Tamaño (μm)	Porcentaje de liberación (%)
40	380	25
50	300	33
60	250	50
70	212	57
100	149	62
140	104	75
200	75	100

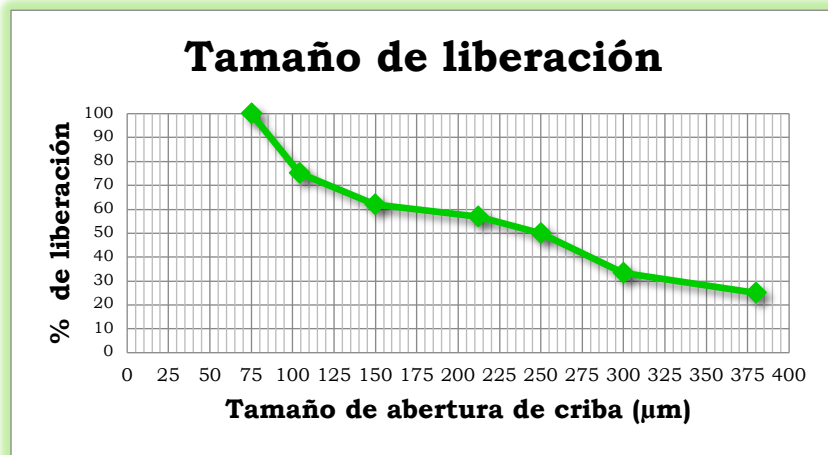


Figura No 32. Representación gráfica en el mineral de llegada, para la determinación del tamaño de liberación.

Previo a la determinación de las pruebas de molienda con cargas diferentes de bolas o de cargas de mineral, fue necesario determinar el tamaño de liberación para saber hasta qué tamaño se debe de reducir este mineral en molienda. Por tal motivo se realizó un cribado y observación al microscopio estereográfico de cada uno de los tamaños obtenidos por el método de cribado. Se puede observar desde la figura 25 a la 31 el incremento en partículas liberadas siendo el 100% en la figura No 31. En la tabla No. 8 y figura No. 32 se observa dicha confirmación, en donde podemos notar que a 75 micras se tiene el tamaño de liberación.

4.6 Pruebas Determinación del Tiempo óptimo de molienda al 80% Ac (-)

Tabla No 9. Análisis granulométrico del mineral de calcopirita con 10 minutos de molienda.

N° Malla	Tamaño (µm)	Masa (g)	%Retenido	% Ac (+)	% Ac (-)
10	1678	0.2	0.58	0.58	99.42
14	1300	0.4	1.16	1.74	98.26
16	1191	0.1	0.29	2.03	97.97
20	841	0.9	2.61	4.64	95.36
30	595	1	2.90	7.54	92.46
40	380	1	2.90	10.43	89.57
50	300	6.5	18.84	29.28	70.72
60	250	0.1	0.29	29.57	70.43
70	212	2.8	8.12	37.68	62.32
100	149	2.6	7.54	45.22	54.78
140	104	2.8	8.12	53.33	46.67
200	75	2.7	7.83	61.16	38.84
325	44	4.5	13.04	74.20	25.80
400	38	8.5	24.64	98.84	1.16
Pan		0.4	1.16	100.00	0.00
	Total	34.5	100.00		

Tabla No 10. Análisis granulométrico del mineral de calcopirita con 15 minutos de molienda.

N° Malla	Tamaño (µm)	Masa (g)	%Retenido	% Ac (+)	% Ac (-)
20	841	0.1	0.39	0.39	99.61
30	595	0.2	0.78	1.16	98.84
40	380	0.2	0.78	1.94	98.06
50	300	0.2	0.78	2.71	97.29
60	250	0.8	3.10	5.81	94.19
70	212	0.5	1.94	7.75	92.25
100	149	1.8	6.98	14.73	85.27
140	104	2.8	10.85	25.58	74.42
200	75	3.4	13.18	38.76	61.24
325	44	7.5	29.07	67.83	32.17
400	38	7.9	30.62	98.45	1.55
Pan		0.4	1.55	100.00	0.00
	Total	25.8	100.00		

Tabla No 11. Análisis granulométrico del mineral de calcopirita con 20 minutos de molienda.

No. Malla	Tamaño (µm)	Masa (g)	%Retenido	% Ac (+)	% Ac (-)
40	380	0.1	0.39	0.39	99.61
50	300	0	0.00	0.39	99.61
60	250	0	0.00	0.39	99.61
70	212	0	0.00	0.39	99.61
100	149	0.3	1.16	1.55	98.45
140	104	1.4	5.43	6.98	93.02
200	75	3.2	12.40	19.38	80.62
325	44	9.1	35.27	54.65	45.35
400	38	11.5	44.57	99.22	0.78
Pan		0.2	0.78	100.00	0.00
	Total	25.8	100.00		

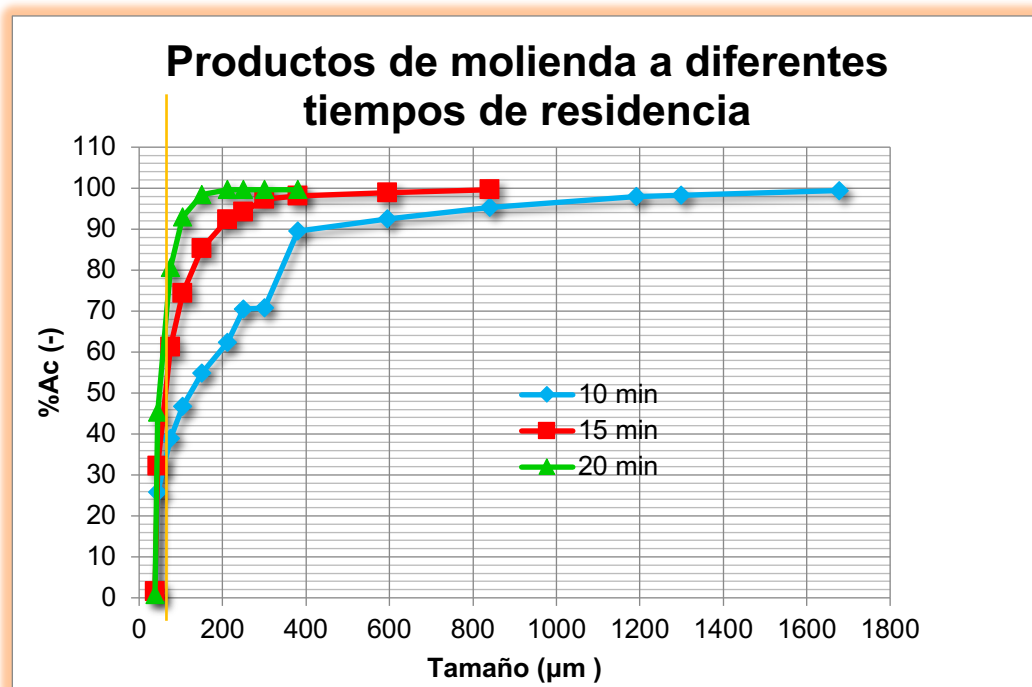


Figura No 33. %Ac(-) vs Tamaño de partícula de los productos a diferentes tiempos de molienda.

Como última prueba de caracterización se tuvo la determinación del tiempo óptimo de molienda para llegar al 80% Ac (-) al tamaño de 75 μm . En las tablas No. 9 a la 11 se muestran los resultados de análisis granulométrico a diferentes tiempos de residencia con incrementos de 5 minutos hasta llegar al tamaño de liberación con 80% Ac (-), siendo esto plasmado gráficamente en la figura No 33, de donde se puede obtener que al tamaño de liberación se requiere de un tiempo de 20 minutos con un 80% Ac (-).

4.7 Pruebas de molienda a diferentes cargas de bolas

Tabla No 12. Análisis granulométrico en la descarga del molino con $C_b=7$ Kg y $C_m= 500$ g.

No. Malla	Tamaño (μm)	Masa (g)	%Retenido	%Acumulado (+)	%Acumulado (-)
60	250	0	0.00	0.00	100.00
70	212	0.1	0.41	0.41	99.59
100	149.86	0.6	2.46	2.87	97.13
140	104.14	1.9	7.79	10.66	89.34
200	75	4	16.39	27.05	72.95
325	44	12.4	50.82	77.87	22.13
400	38.1	5.3	21.72	99.59	0.41
Pan		0.1	0.41	100.00	0.00
Total		24.4	100.00		

Tabla No 13. Análisis granulométrico en la descarga del molino con Cb=7.5 Kg y
Cm= 500g.

No. Malla	Tamaño (μm)	Masa (g)	%Retenido	%Acumulado (+)	%Acumulado (-)
60	250	0.1	0.28	0.28	99.72
70	212	0.1	0.28	0.55	99.45
100	149.86	0.7	1.94	2.49	97.51
140	104.14	2.2	6.09	8.59	91.41
200	75	6	16.62	25.21	74.79
325	44	14.3	39.61	64.82	35.18
400	38.1	12.6	34.90	99.72	0.28
Pan	-38.1	0.1	0.28	100.00	0.00
Total		36.1	100.00		

Tabla No 14. Análisis granulométrico en la descarga del molino con Cb=8 Kg y
Cm= 500g.

No. Malla	Tamaño (μm)	Masa (g)	%Retenido	%Acumulado (+)	%Acumulado (-)
60	250	0	0.00	0.00	100.00
70	212	0.1	0.47	0.47	99.53
100	149.86	0.2	0.93	1.40	98.60
140	104.14	0.1	0.47	1.86	98.14
200	75	3.2	14.88	16.74	83.26
325	44	12.4	57.67	74.42	25.58
400	38.1	5.3	24.65	99.07	0.93
Pan	-38.1	0.2	0.93	100.00	0.00
Total		21.5	100.00		

Tabla No 15. Análisis granulométrico en la descarga del molino con Cb=8.5 Kg y
Cm= 500g.

No. Malla	Tamaño (μm)	Masa (g)	%Retenido	%Acumulado (+)	%Acumulado (-)
60	250	0.2	0.47	0.47	99.53
70	212	0.1	0.23	0.70	99.30
100	149.86	0.9	2.11	2.81	97.19
140	104.14	1.1	2.58	5.39	94.61
200	75	7.2	16.86	22.25	77.75
325	44	16.1	37.70	59.95	40.05
400	38.1	16.9	39.58	99.53	0.47
Pan	-38.1	0.2	0.47	100.00	0.00
Total		42.7	100.00		

Tabla No 16. Análisis granulométrico en la descarga del molino con Cb=9 Kg y
Cm= 500g.

No. Malla	Tamaño (μm)	Masa (g)	%Retenido	%Acumulado (+)	%Acumulado (-)
60	250	0.2	0.54	0.54	99.46
70	212	0.1	0.27	0.82	99.18
100	149.86	0.9	2.45	3.27	96.73
140	104.14	2.5	6.81	10.08	89.92
200	75	6.3	17.17	27.25	72.75
325	44	13.1	35.69	62.94	37.06
400	38.1	13.4	36.51	99.46	0.54
Pan	-38.1	0.2	0.54	100.00	0.00
Total		36.7	100.00		

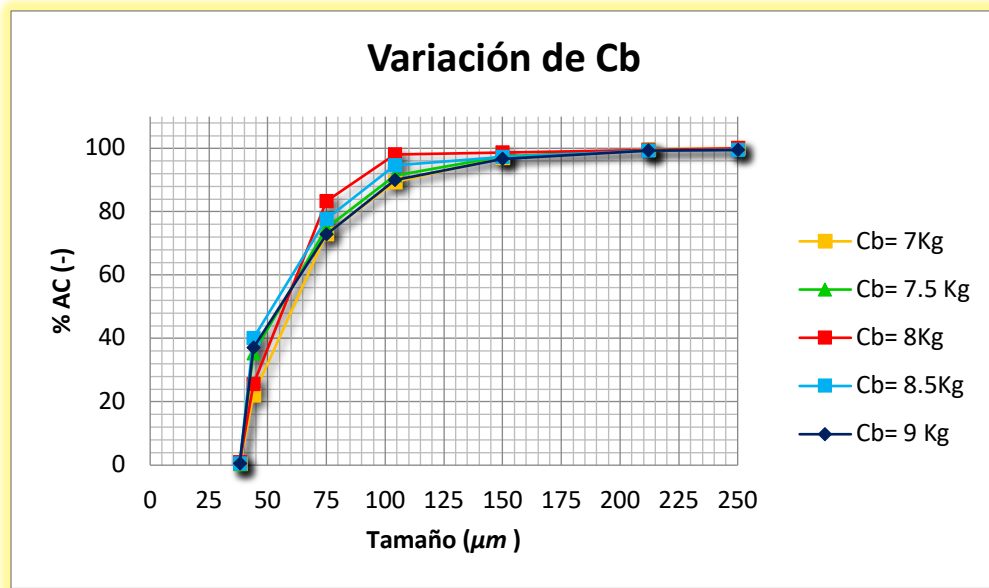


Figura No 34. Efecto de la variación de la carga de bolas en la distribución granulométrica del producto de molienda (%Ac (-) vs Tamaño μm).

4.8 Pruebas de molienda a diferentes cargas de mineral

Tabla No 17. Análisis granulométrico en la descarga del molino con Cb=8 Kg y Cm= 400 g.

No. Malla	Tamaño (μm)	Masa (g)	%Retenido	%Acumulado (+)	%Acumulado (-)
60	250	0.1	0.26	0.26	99.74
70	212	0	0.00	0.26	99.74
100	149.86	0.2	0.52	0.79	99.21
140	104.14	5.2	13.61	14.40	85.60
200	75	3.7	9.69	24.08	75.92
325	44	1.5	3.93	28.01	71.99
400	38.1	26.3	68.85	96.86	3.14
Pan		1.2	3.14	100.00	0.00
Total		38.2	100.00		

Tabla No 18. Análisis granulométrico en la descarga del molino con Cb=8 Kg y
Cm= 450 g.

No. Malla	Tamaño (μm)	Masa (g)	%Retenido	%Acumulado (+)	%Acumulado (-)
60	250	0.2	0.52	0.52	99.48
70	212	0.4	1.03	1.55	98.45
100	149.86	0.8	2.07	3.62	96.38
140	104.14	2.6	6.72	10.34	89.66
200	75	4	10.34	20.67	79.33
325	44	3.6	9.30	29.97	70.03
400	38.1	22.3	57.62	87.60	12.40
Pan	-38.1	4.8	12.40	100.00	0.00
Total		38.7	100.00		

Tabla No 19. Análisis granulométrico en la descarga del molino con Cb=8 Kg y
Cm= 500g.

No. Malla	Tamaño (μm)	Masa (g)	%Retenido	%Acumulado (+)	%Acumulado (-)
60	250	0	0.00	0.00	100.00
70	212	0.1	0.56	0.56	99.44
100	149.86	0.2	1.13	1.69	98.31
140	104.14	0.1	0.56	2.26	97.74
200	75	2.9	16.38	18.64	81.36
325	44	5.2	29.38	48.02	51.98
400	38.1	8.4	47.46	95.48	4.52
Pan	-38.1	0.8	4.52	100.00	0.00
Total		17.7	100.00		

Tabla No 20. Análisis granulométrico en la descarga del molino con Cb=8 Kg y
Cm= 550 g.

No. Malla	Tamaño (μm)	Masa (g)	%Retenido	%Acumulado (+)	%Acumulado (-)
60	250	0	0.00	0.00	100.00
70	212	0.3	0.61	0.61	99.39
100	149.86	1	2.02	2.63	97.37
140	104.14	4.2	8.50	11.13	88.87
200	75	5.7	11.54	22.67	77.33
325	44	4.1	8.30	30.97	69.03
400	38.1	28.3	57.29	88.26	11.74
Pan	-38.1	5.8	11.74	100.00	0.00
Total		49.4	100.00		

Tabla No 21. Análisis granulométrico en la descarga del molino con Cb=8 Kg y
Cm= 600 g.

No. Malla	Tamaño (μm)	Masa (g)	%Retenido	%Acumulado (+)	%Acumulado (-)
60	250	0.1	0.25	0.25	99.75
70	212	0	0.00	0.25	99.75
100	149.86	1.2	3.02	3.27	96.73
140	104.14	4.6	11.59	14.86	85.14
200	75	6.7	16.88	31.74	68.26
325	44	4.4	11.08	42.82	57.18
400	38.1	22.3	56.17	98.99	1.01
Pan	-38.1	0.4	1.01	100.00	0.00
Total		39.7	100.00		

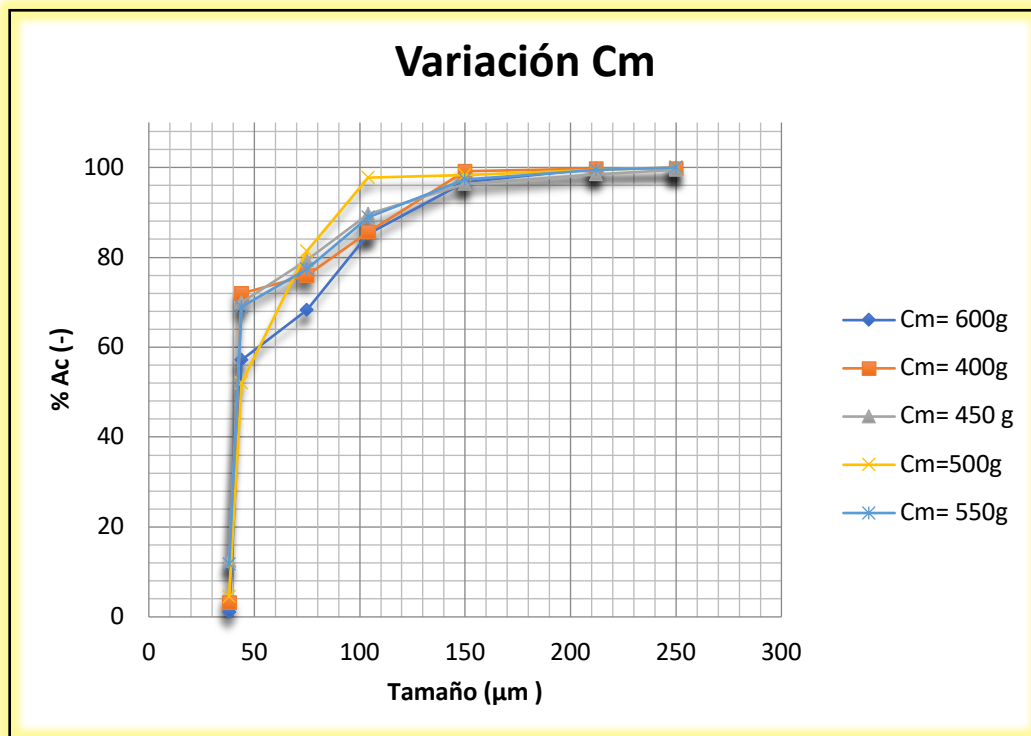


Figura No 35. Efecto de la variación de la carga de mineral en la distribución granulométrica del producto de molienda (%Ac (-) vs Tamaño µm).

De la tabla No. 12 a la 16, se muestran los análisis granulométricos obtenidos después de procesar el mineral a diferentes cargas de bolas a una carga de mineral constante, los cuales fueron representados gráficamente en la figura No. 34, de la cual se puede observar que en el tamaño de liberación se tiene 83.26 % de Ac(-) a la carga de bolas de 8 kg y que a cargas mayores y menores a este valor, se obtuvo un menor % Ac(-) y por lo tanto una cantidad menor de partículas finas, esto puede ser fundamentado que al incrementar la cantidad de bolas dentro del molino, se tiene un mayor cantidad de material molorante que impide el movimiento en la caída de las bolas sobre el mineral y para cantidades menor de carga, se tendrá también una deficiente molienda a causa de falta de medio molorante, sobre el mineral.

En las tablas No. 17 a 21, de manera análoga a las pruebas anteriores, pero correspondientes a la variación de carga de mineral, así como de su representación gráfica en la figura No. 35 se observó que el tamaño de liberación de 75 µm y con

una carga de mineral de 500 gramos, se obtuvo un 81.36 % Ac (-), el cual fue el valor más alto de %Ac(-) debido a que a esta condición se obtuvo la altura de carga de mineral que propició la mayor ruptura de mineral de calcopirita, y a mayores cantidades de mineral se elevó la cama de partículas de mineral, lo cual disminuyó la aceleración de la bola en el interior del molino, evitando el rompimiento de partículas. Para el caso de menor carga de mineral, también disminuyó el Ac (-) %, ya que se tiene menor mineral y las bolas de acero impactan más fácil entre ellas, teniendo una pérdida de energía en el proceso de molienda.

4.9 Pruebas de sonido

Tabla No 22. Datos experimentales de la intensidad de sonido (dB) a diferentes cargas de bola.

Cb (Kg)	dB
7	97
7.5	98
8	99
8.5	100
9	101

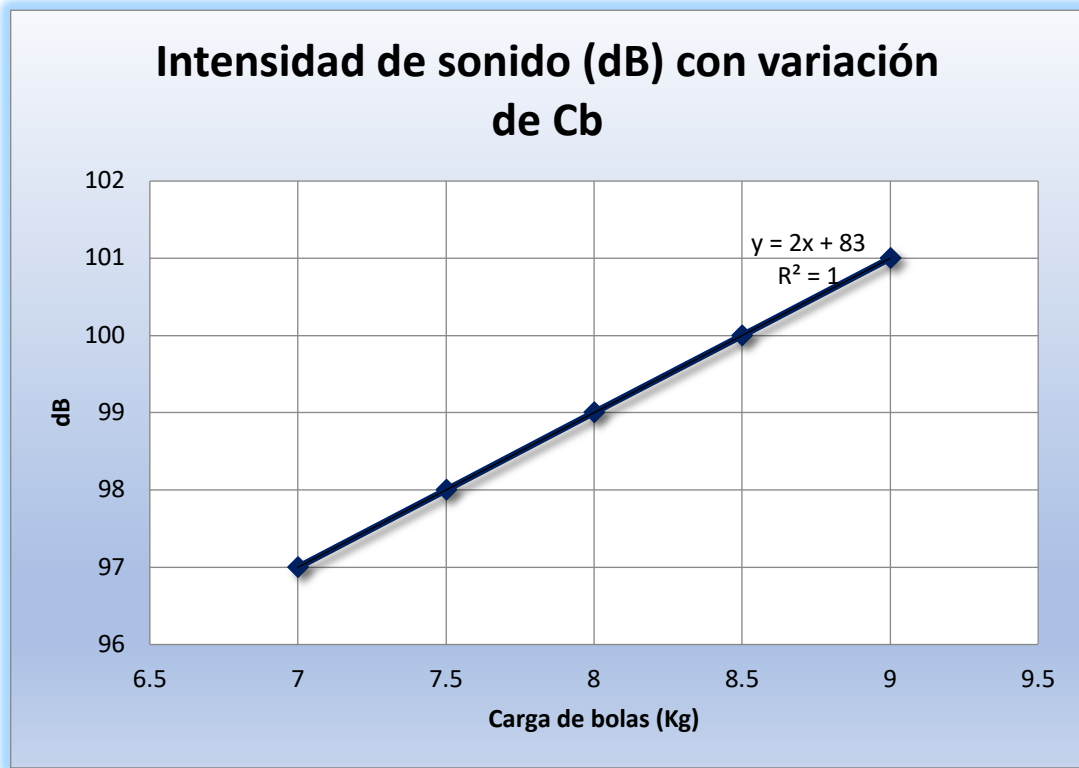


Figura No 36. Representación gráfica de la intensidad de sonido a diferentes cargas de bola.

Tabla No 23. Datos experimentales de la intensidad de sonido (dB) a diferentes cargas de mineral.

Cm (g)	dB
400	96
450	97
500	98
550	99
600	100

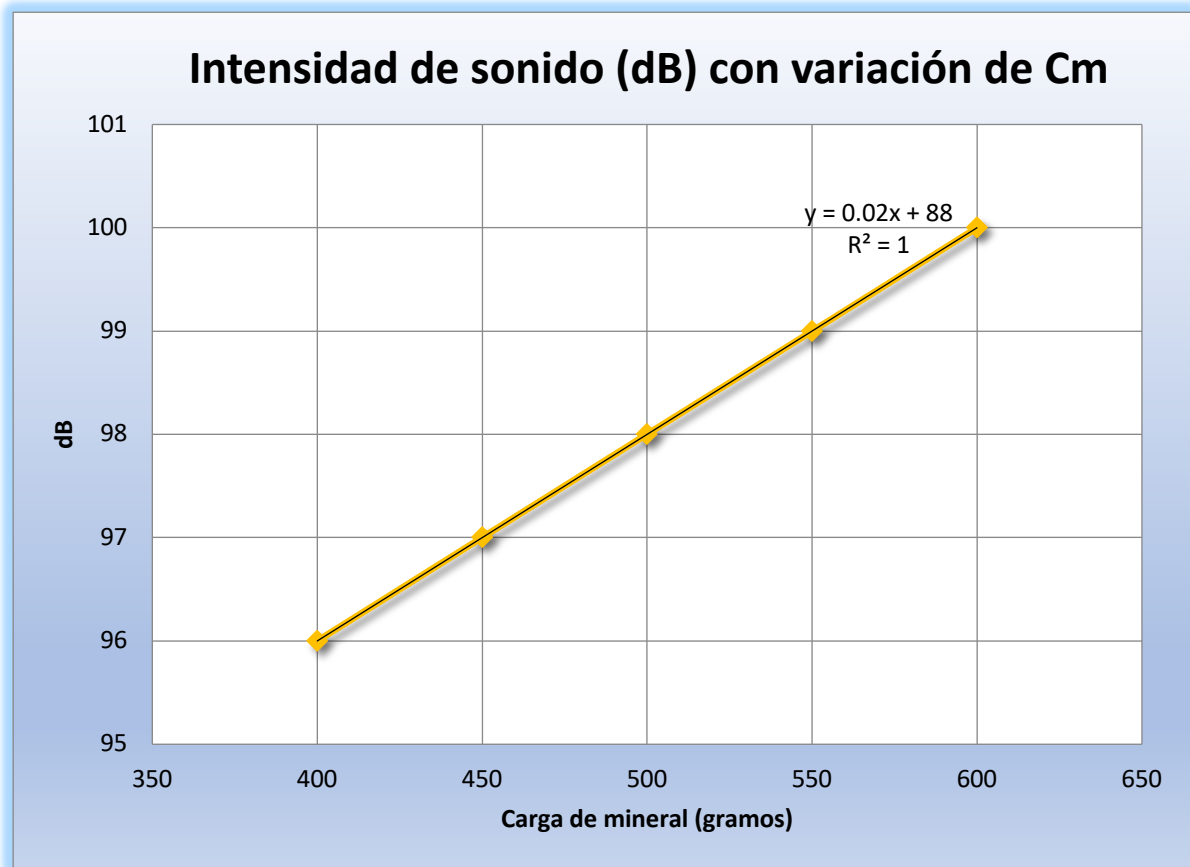


Figura No 37. Representación gráfica de los dB a diferentes cargas de mineral.

Tabla No 24. Datos de la intensidad de sonido (dB) de cada variación de Carga de bolas y el % Ac (-) al tamaño de liberación de 74µm.

dB	%Ac (-)
97	73
98	75
99	83
100	78
101	73

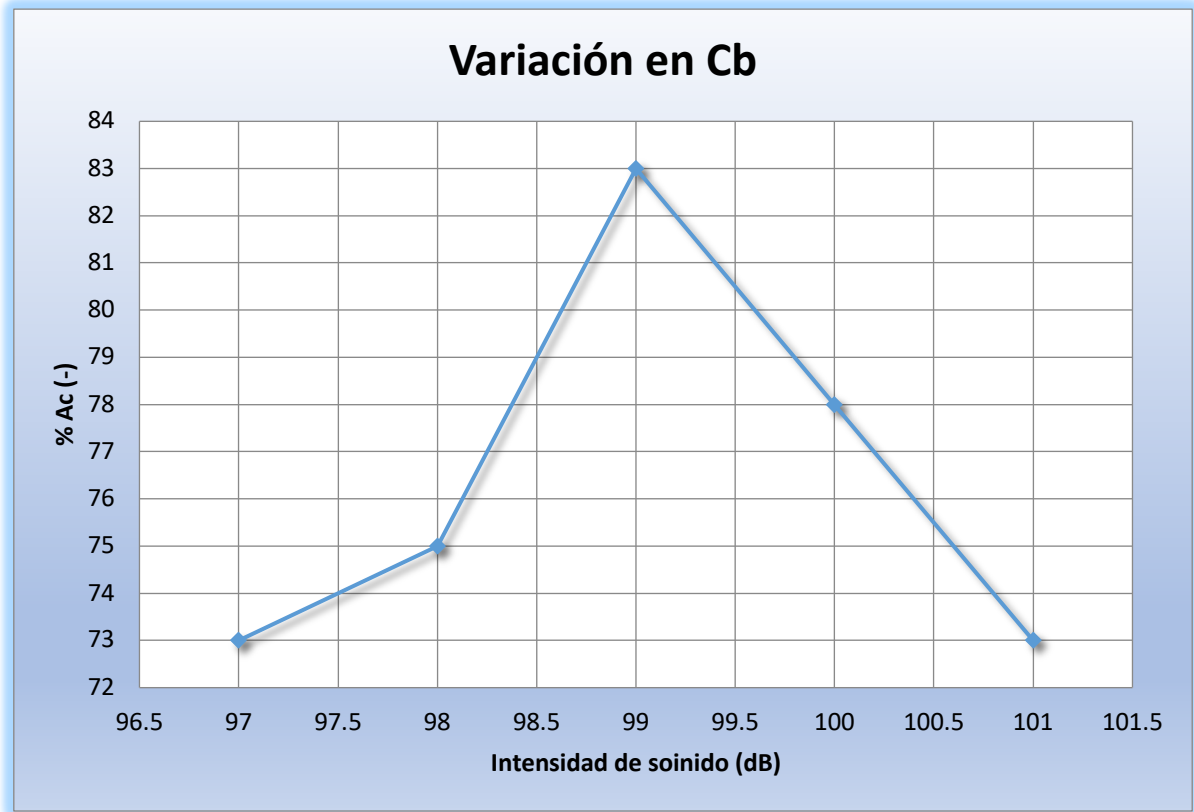


Figura No 38. Representación gráfica de la intensidad de sonido (dB) de cada variación de Carga de bolas y el % Ac (-) al tamaño de liberación de 75 μ m.

Tabla No 25. Datos de la intensidad de sonido (dB) de cada variación de carga de mineral y el % Ac (-) al tamaño de liberación de 74 μ m.

dB	%Ac (-)
96	75.92
97	79.33
98	81.33
99	77.33
100	68.26

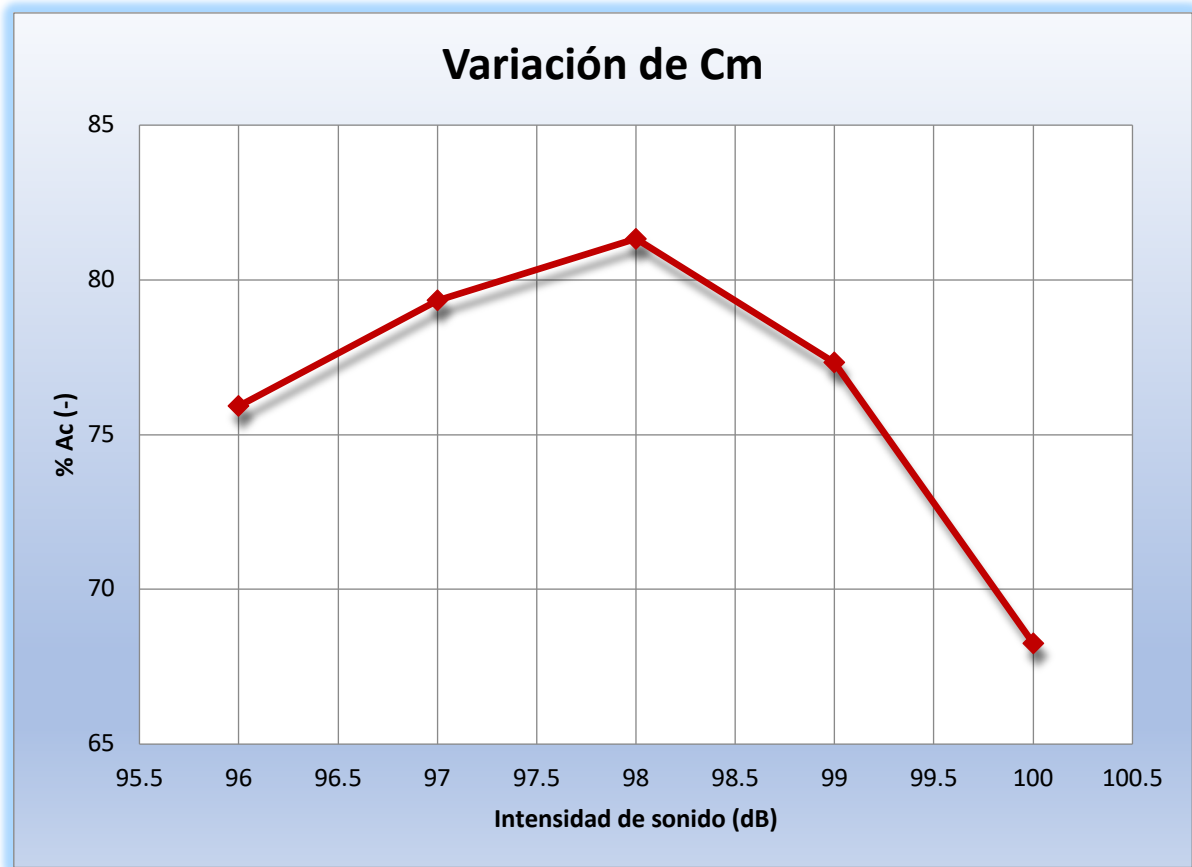


Figura No 39. Representación gráfica de la intensidad de sonido (dB) de cada variación de carga de mineral y el % Ac (-) al tamaño de liberación de 75 µm.

En la tabla No. 22 mostramos los respectivos valores de intensidad de sonido (dB) a diferentes cargas de bolas teniendo una carga de mineral constante. Para su mejor análisis se observa en la figura No. 36, que la intensidad de sonido es directamente proporcional con la carga de bolas, debido a que hay mayor liberación de energía en forma de sonido a causa del aumento de carga de bolas que impactan en las paredes del molino más que en el mineral. Notamos en esta gráfica que efectivamente sí hay variación lineal.

Ahora analizando de esta misma manera, pero con variación en carga de mineral dejando constante la carga de bolas, observamos la tabla No 23. Y su representación gráfica en la figura No. 37, se observa que hay una variación en la intensidad del sonido en proporción directa con respecto al cambio de carga de

mineral, esto es, a mayor carga de mineral le corresponde un mayor sonido. Esto se debe a que al aumentar la carga de mineral tenemos más partículas en impacto, lo cual significa que hay mayor cantidad de liberación de energía en forma de sonido en el momento que se fracturan las partículas de mineral y al impactar con los interiores del molino.

Por otra parte a partir de la tabla No. 24 y figura No.38 se observa que hay un punto máximo de 83% Ac(-) en 99 dB y con tamaño de 75 μm , en la variación en la carga de bolas Cb, al tener un exceso de carga o un déficit de intensidad de sonido (dB) o su equivalente en carga de bolas, se tiene una menor probabilidad de impacto del medio molurante con las partículas minerales, y su correspondiente liberación de energía en forma de sonido, a causa del aumento de carga de bolas que impactan en las paredes del molino más que en el mineral. A una menor carga, se propicia una menor cantidad de impactos lo cual causa una menor cantidad de intensidad de sonido. En el caso del efecto de cantidad de mineral se puede observar en la tabla No. 25 y figura No. 39, que a 98 dB tenemos un máximo con 81.33 %Ac (-) en el tamaño de liberación (75 μm), este % Ac (-) disminuye en las pruebas con mayor y menor intensidad de sonido, lo cual corresponde a una disminución o aumento en la carga de mineral. Al disminuir la carga de mineral tenemos una ineficiencia en el proceso, ya que disminuye la probabilidad de que las bolas de acero impacten en el mineral. En el caso contrario, donde se aumentó la carga de mineral tenemos también una ineficiencia en el proceso a causa de que la cama de mineral aumenta, dándole a las bolas de acero menor altura y por lo tanto menor fuerza para impactar en el mineral y así fracturarlo.

Para saber cuál es la intensidad de sonido que nos indica una correcta carga de bolas, tomaremos en cuenta que la molienda correcta se tiene al obtener el 80 % Ac (-) en el tamaño de liberación. Para esto podemos observar la Figura No. 38, que a 98.7 dB tenemos el 80% Ac (-) y por lo tanto una correcta carga de bolas, pero como nuestro equipo de medición únicamente registra valores enteros de dB,

podemos decir que cuando registremos 99 dB tendremos la carga correcta de Carga de bolas.

Finalmente, para poder saber la intensidad de sonido que nos indica una correcta carga de mineral, tomaremos en cuenta la Figura No. 39, donde buscaremos el 80% Ac (-) de igual forma como se hizo con la Figura No. 38 para la carga de bolas. En la Figura No. 39 notamos que a 97.4 dB tenemos el 80 % Ac (-) y por lo tanto una carga correcta de mineral, pero por los motivos que mencionamos anteriormente, sabemos que el valor de 98 dB en nuestro equipo de medición nos indica una carga de mineral.

Capítulo 5. Conclusiones

- ✓ El material identificado como calcopirita presentó textura equigranular la cual es fácilmente liberable y procesable por beneficio de minerales.
- ✓ Fue posible construir un medidor de intensidad de sonido a partir de una tarjeta de Arduino, que funcione para detectar variaciones en las cargas de bolas en un molino en seco de laboratorio.
- ✓ La calcopirita que se trabajó sí muestra variaciones de sonido medibles al ser fracturada en un proceso de molienda en seco a nivel laboratorio.
- ✓ El incremento de la carga de mineral varía directamente proporcional con el aumento en la intensidad del sonido, bajo condiciones de carga de bolas constante.
- ✓ El incremento de la carga de bolas varía directamente proporcional con el incremento en la intensidad del sonido, bajo condiciones de carga de mineral constante.
- ✓ Considerando el tamaño de liberación de 74 μm , dureza de 11.32 kw-h/ston, se obtiene un % Ac (-) máximo a una intensidad de sonido de 99 dB, al existir una variación en la carga de bolas.
- ✓ Considerando el tamaño de liberación de 74 μm , dureza de 11.32 kw-h/ston, se obtiene un % Ac (-) máximo a una intensidad de sonido de 96 dB, al existir una variación en la carga de mineral, es decir el % Ac (-) es inversamente proporcional a la intensidad de sonido.
- ✓ Por medio del sonido podemos monitorear la carga de bolas o la carga de mineral en un proceso de molienda en seco a nivel laboratorio.
- ✓ La intensidad de sonido que indica el equipo de medición que se tiene la mejor carga de bolas para el molino de bolas a nivel laboratorio, es de 99 dB.
- ✓ La intensidad de sonido que indica el equipo de medición que se tiene la mejor carga de mineral para el molino de bolas a nivel laboratorio, es de 98 dB.

Bibliografía

[1] https://centrohipicolasriendas.es/dsxfY/2021_consumo-de-energia-en-el-molino-de-bolas-de-mineral/ (consultado el 13 de julio del 2021 a las 2:45 pm).

[2] <https://www.weg.net/institutional/ES/es/solutions/energy-efficiency/industrial-applications/ball-mill> (consultado el 22 de julio del 2021 a las 9:45 pm).

[3] Curso a distancia: Circuitos de molienda de minerales. Impartido por: Ing. Luis Magallanes Hernández. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CIDT) de Grupo Peñoles. Fecha: Diciembre del 2021.

[4] <https://www.911metallurgist.com/blog/ball-mill>. (Consultados el 2 de agosto del 2021 a las 9:27 pm)

[5] <https://www.fonotecanacional.gob.mx/index.php/108-articulos/296-decibeles-y-efectos> (Consultado el 22 de julio del 2021 a las 10:48pm).

[6] <https://dewesoft.com/es/daq/que-es-un-sensor> (Consultado el 22 de julio del 2021 a las 11:12 pm).

[7] Curso: Domótica con Arduino. Impartido por Lic. Fernando Ramírez Padrón. Fecha: Noviembre 2019.

[8] Curso: Robótica con Arduino. Impartido por Ing. Ricardo Daniel López Carmona. Fecha: Diciembre 2019.

[9] <https://www.arduino.cc/en/Guide/Introduction> (Consultado el 23 de julio a las 12:18 am).

Figuras

Figura No. 1 Esquema de la componentes fundamental de Arduino UNO, empleado en este proyecto.

Figura No. 2 Diagrama de flujo de la metodología experimental realizada.

Figura No. 3 Configuración del sistema Arduino con el sistema de detección de sonido.

Figura No. 4 Diagrama de flujo de la programación (código) para la captura y registro de la intensidad de sonido.

Figura No. 5 Sistema de medición de intensidad Arduino adaptado al sistema de molienda.

Figura No. 6 Medición de Amperaje sobre el motor de la trituradora, en la determinación del índice de trabajo (W_i) del mineral de calcopirita.

Figura No.7 Ro-Tap empleado para la realización del análisis granulométrico.

Figura No. 8 Medición y registro del sonido en el sistema Arduino-computadora al molino de bolas.

Figura No. 9 Placa Arduino UNO, *jumpers* y micrófono seleccionado para construir el sistema de medición de sonido.

Figura No. 10 *Protoboard*, *Jumpers*, y micrófono seleccionados

Figura No.11 Módulo I2C adaptado a la Pantalla LCD.

Figura No 12. Código de programación desarrollado para el sistema Arduino-sensores-computadora, para la medición y registro de la intensidad de sonido.

Figura No 13. Sistema Arduino-sensores-computadora construido para la medición de sonido emitido por el molino.

Figura No. 14 Mineral de calcopirita sin polarizador, campo claro, nicoles cruzados 10x.

Figura No. 15 Mineral de calcopirita campo claro, nicoles paralelos 10x.

Figura No.16 Mineral de calcopirita con polarizador, campo claro, nicoles cruzados 10x.

Figura No. 17 Mineral de calcopirita con polarizador, campo claro, nicoles paralelos 10x.

Figura No. 18 Mineral de calcopirita sin polarizador, campo obscuro, nicoles cruzados 10x.

Figura No. 19 Mineral de calcopirita sin polarizador, campo obscuro, nicoles paralelos 10x.

Figura No. 20 Mineral de calcopirita con polarizador, campo obscuro, nicoles cruzados 10x.

Figura No. 21 Mineral de calcopirita con polarizador, campo obscuro, nicoles paralelos 10x.

Figura No. 22 Representación gráfica de la granulometría del mineral de llegada.

Figura No. 23 Representación gráfica de la alimentación a la trituración para la determinación del valor F80 en el cálculo del W_i .

Figura No. 24 Representación gráfica del producto de trituración para la determinación del valor P80 en el cálculo del W_i .

Figura No. 25 Fotografía en microscopio óptico estereográfico Zoom de partículas

con 380 μm .

Figura No. 26 Fotografía en microscopio óptico estereográfico Zoom de partículas con 300 μm .

Figura No. 27 Fotografía en microscopio óptico estereográfico Zoom de partículas con 250 μm .

Figura No. 28 Fotografía en microscopio óptico estereográfico Zoom de partículas con a 212 μm .

Figura No. 29 Fotografía en microscopio óptico estereográfico Zoom de partículas con 149 μm .

Figura No. 30 Fotografía en microscopio óptico estereográfico Zoom de partículas con 104 μm .

Figura No. 31 Fotografía en microscopio óptico estereográfico Zoom de partículas con 75 μm .

Figura No. 32 Representación gráfica en el mineral de llegada, para la determinación del tamaño de liberación.

Figura No. 33 %Ac(-) vs Tamaño de partícula de los productos a diferentes tiempos de molienda.

Tablas

Tabla No. 1 Condiciones de estudio menagráfico en las muestras de calcopirita

Tabla No 2. Condiciones experimentales de molienda.

Tabla No 3. Datos experimentales para análisis granulométrico del material de llegada.

Tabla No 4. Datos de la muestra a analizar.

Tabla No 5. Datos experimentales para análisis granulométrico en la alimentación al molino y su determinación de F80.

Tabla No 6. Datos experimentales para análisis granulométrico en el producto de trituración para la determinación de P80.

Tabla No 7. Datos y resultados del W y Wi del mineral de calcopirita en estudio.

Tabla No 8. Determinación del tamaño de liberación del mineral de calcopirita.

Tabla No 9. Análisis granulométrico del mineral de calcopirita con 10 minutos de

Tabla No 10. Análisis granulométrico del mineral de calcopirita con 15 minutos de

Tabla No 11. Análisis granulométrico del mineral de calcopirita con 20 minutos de molienda.

Tabla No 12. Análisis granulométrico en la descarga del molino con $C_b=7$ Kg y $C_m= 500$ g.

Tabla No 13. Análisis granulométrico en la descarga del molino con $C_b=7.5$ Kg y $C_m= 500$ g.

Tabla No 14. Análisis granulométrico en la descarga del molino con $C_b=8$ Kg y $C_m= 500$ g.

Tabla No 15. Análisis granulométrico en la descarga del molino con $C_b=8.5$ Kg y $C_m= 500$ g.

Tabla No 16. Análisis granulométrico en la descarga del molino con $C_b=9$ Kg y $C_m= 500$ g.

Tabla No 17. Análisis granulométrico en la descarga del molino con $C_b=8$ Kg y $C_m= 400$ g.

Tabla No 18. Análisis granulométrico en la descarga del molino con $C_b=8$ Kg y $C_m= 450$ g.

Tabla No 19. Análisis granulométrico en la descarga del molino con $C_b=8$ Kg y $C_m= 500$ g.

Tabla No 20. Análisis granulométrico en la descarga del molino con $C_b=8$ Kg y $C_m= 550$ g.

Tabla No 21. Análisis granulométrico en la descarga del molino con $C_b=8$ Kg y $C_m= 600$ g.

Tabla No 22. Datos experimentales de la intensidad de sonido (dB) a diferentes cargas de bola.

Tabla No 23. Datos experimentales de la intensidad de sonido (dB) a diferentes cargas de mineral.

Tabla No 24. Datos de la intensidad de sonido (dB) de cada variación de Carga de bolas y el % Ac (-) al tamaño de liberación de 74 μ m.

Tabla No 25. Datos de la intensidad de sonido (dB) de cada variación de carga de mineral y el % Ac (-) al tamaño de liberación de 74 μ m.

Anexo A

$$kW = \frac{(I_c - I_v)V\sqrt{NF}}{1000} \quad \text{Ecuación No. 1}$$

Donde:

I_c = Intensidad de corriente desarrollado cuando la trituradora está con carga (amp)

I_v = Intensidad de corriente desarrollado por la trituradora en vacío (amp)

V = Diferencia de potencial de línea (volt)

NF = Número de fases del motor

kw = kilowats desarrollados en la trituradora

$$cap = \frac{a(\text{kg})}{t(\text{s})} \rightarrow \frac{\text{ston}}{h} \quad \text{Ecuación No. 2}$$

$$W = \frac{kw}{\frac{\text{ston}}{h}} = \frac{kw-h}{\text{ston}} \quad \text{Ecuación No. 3}$$

Una vez determinado el consumo de energía a través de la ecuación 3 los valores, y determinados los tamaños de partícula F80 y P80, usando la ecuación 4 es posible conocer el valor Wi.

$$Wi = W / \left[\frac{(\sqrt{F_{80}} - \sqrt{P_{80}})}{\sqrt{F_{80}}} \right] \sqrt{\frac{100}{P_{80}}} \quad \text{Ecuación No. 4}$$

Donde:

W = consumo de energía (kw-h/ston).

Wi = Índice de trabajo (kw-h/ston).

F80 = Tamaño de partícula (μm) al 80% Ac (-) en la alimentación.

P80 = Tamaño de partícula (μm) al 80% Ac (-) en la descarga.

$C_b = 0.2044 (d_{\text{mediomolurante}} \text{Tg/cm}^3) \text{ Volumen del molino cm}^3$ Ecuación No. 5