

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA

METALÚRGICA



T E S I S

Optimización de parámetros del molino de bolas para la recuperación de

Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha -

Pasco – 2024

Para optar el título profesional de:

Ingeniero Metalurgista

Autores:

Bach. Franco Denis DAVIRAN PANEZ

Bach. Sarita Lourdes VALLADOLID LAURA

Asesor:

Dr. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO

Cerro de Pasco – Perú – 2024

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE FORMACIÓN PROFESIONAL DE INGENIERÍA

METALÚRGICA



T E S I S

Optimización de parámetros del molino de bolas para la recuperación de

Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha -

Pasco – 2024

Sustentada y aprobada ante los miembros del jurado:

Dr. Eduardo Jesús MAYORCA BALDOCEDA

PRESIDENTE

Mg. Manuel Antonio HUAMAN DE LA CRUZ

MIEMBRO

Mg. Osmer Ignacio BLANCO CAMPOS

MIEMBRO



Universidad Nacional Daniel Alcides
Carrión Facultad de Ingeniería
Unidad de Investigación

INFORME DE ORIGINALIDAD N° 196-2024-UNDAC/UIFI

La Unidad de Investigación de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión en mérito al artículo 23° del Reglamento General de Grados Académicos y Títulos Profesionales aprobado en Consejo Universitario del 21 de abril del 2022, La Tesis ha sido evaluado por el software antiplagio Turnitin Similarity, que a continuación se detalla:

Tesis:

"Optimización de parámetros del molino de bolas para la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha - Pasco – 2024"

Apellidos y nombres del tesista:

Bach. DAVIRAN PANEZ, Franco Denis

Bach. VALLADOLID LAURA, Sarita Lourdes

Apellidos y nombres del Asesor:

Dr. SURICHAQUI HIDALGO, Marco Antonio

Escuela de Formación Profesional

Ingeniería Metalúrgica

Índice de Similitud

13 %

APROBADO

Se informa el Reporte de evaluación del software similitud para los fines pertinentes:

Cerro de Pasco, 7 de octubre del 2024



Firmado digitalmente por MEJIA
CACERES Reynaldo FAU
201540035046 soft
Motivo: Soy el autor del documento
Fecha: 07.10.2024 03:47:03 -05:00

DEDICATORIA

A Dios por guiar nuestros pasos y a cada uno de nuestros seres queridos, que son los pilares de nuestro progreso y por todo el apoyo incondicional.

AGRADECIMIENTO

A Dios por brindarnos sabiduría y fuerza para culminar esta etapa académica.

A nuestra alma mater Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión por recibirnos en sus aulas a lo largo de nuestra carrera universitaria.

A nuestro asesor de tesis Dr. SURICHAQUI HIDALGO, Marco Antonio por su motivación y apoyo, con profesionalismo, durante todo el desarrollo de la presente investigación.

A nuestros maestros de la escuela por sus enseñanzas durante las clases.

RESUMEN

Hoy en día, la etapa de molienda continúa siendo esencial en la secuencia de procesos metalúrgicos. Contribuye a la preparación adecuada de minerales previa a la concentración, simplificando la separación entre los componentes valiosos y las gangas. Además, ejerce una influencia directa en la eficacia de las etapas subsiguientes del proceso, como la flotación, lixiviación y fundición.

La presente investigación de tipo aplicada se enfoca en la optimización del molino de bolas 8' x 10' en la planta concentradora Chicrin-Atacocha, la cual produce diariamente 4500 toneladas métricas (TMD). A lo largo de la historia, el molino de bolas ha sido esencial para la fragmentación de minerales y ha desempeñado un papel muy importante en el desarrollo de la industria minera.

La metodología adoptada se caracteriza por ser de nivel explicativo y con un diseño pre-experimental. Se ha llevado a cabo un análisis detallado de múltiples parámetros operativos, incluyendo la velocidad del molino, tamaño de las bolas y nivel de llenado de carga, etc. Se resalta la relación entre la energía de impacto y sus implicaciones en la eficiencia de molienda. Los resultados de potencia y velocidad crítica en los molinos N°3 y N°5 muestran la necesidad de ajustes muy cuidadosos para optimizar el rendimiento.

Además, se plantea llevar a cabo validaciones experimentales y realizar cambios en los parámetros operativos, con la observación constante del impacto en el rendimiento del molino. Además, se resalta la importancia de la capacitación del personal de operación para garantizar un entendimiento completo de la influencia de los parámetros en el rendimiento del molino.

Palabras clave: Metalurgia, Molino, Energía, Acero.

ABSTRACT

Today, the grinding stage continues to be essential in the sequence of metallurgical processes. It contributes to the proper preparation of minerals prior to concentration, simplifying the separation between valuable components and gangues. Furthermore, it has a direct influence on the efficiency of subsequent process steps such as flotation, leaching and smelting.

The present applied research focuses on the optimization of the 8' x 10' ball mill at the Chicrin-Atacocha concentrator plant, which produces 4,500 metric tons (TMD) daily. Throughout history, the ball mill has been essential for the fragmentation of minerals and has played a very important role in the development of the mining industry.

The methodology adopted is characterized by being of an explanatory level and with a pre-experimental design. A detailed analysis of multiple operating parameters has been carried out, including mill speed, ball size and charge filling level, etc. The relationship between impact energy and its implications on grinding efficiency is highlighted. The critical power and speed results on mills #3 and #5 show the need for very careful adjustments to optimize performance.

In addition, it is proposed to carry out experimental validations and make changes to the operating parameters, with constant observation of the impact on the mill's performance. In addition, the importance of training operating personnel is highlighted to ensure a complete understanding of the influence of parameters on mill performance.

Keywords: Metallurgy, Mill, Energy, Steel.

INTRODUCCIÓN

La evolución de la tecnología de molienda ha contribuido a la optimización de procesos metalúrgicos, mejorando la eficiencia y reduciendo costos. La planta concentradora Chicrin-Atacocha, se centra en la atención a los parámetros operativos, como la velocidad del molino y el tamaño de las bolas, que refleja la continua importancia de la molienda en la obtención eficiente de minerales valiosos. Este enfoque es esencial para garantizar un rendimiento óptimo de la planta y maximizar la recuperación de metales en los procesos metalúrgicos modernos.

La presente tesis denominada “Optimización de parámetros del molino de bolas para la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha - Pasco – 2024”.

Se sumerge en el fascinante campo de la simulación con software metalúrgico aplicado al molino de bolas 8' x 10', con el objetivo de determinar parámetros importantes que tienen un efecto en la calidad de la granulometría final. Este enfoque se gesta con la intención de evitar el desgaste de las bolas de acero y prevenir impactos en el revestimiento del molino.

Para llevar a cabo esta investigación se han empleado varios cálculos respaldados por modelos matemáticos integrados en el software metalúrgico, lo que ha permitido optimizar la operación del molino. La justificación es no sufrir pérdidas económicas por el desgaste innecesario, sino hacer más eficientes tanto el producto final como el proceso metalúrgico. Y que esto redunde en la calidad del producto y en la rentabilidad económica.

A continuación, se detallan los capítulos de la presente investigación.

El Capítulo I: Aborda la formulación del problema, objetivos, hipótesis y justificación de la investigación.

Capítulo II: Se presenta el marco teórico con antecedentes, bases teóricas y definición de términos.

Capítulo III: Detalla la metodología de la investigación, incluyendo tipo, método, diseño, población y muestra, así como las técnicas e instrumentos de recolección y análisis de datos.

Capítulo IV: Expone los resultados de la investigación, prueba de hipótesis y discusión de resultados.

Finalmente, se incluyen conclusiones, recomendaciones, referencias bibliográficas y anexos.

ÍNDICE

DEDICATORIA

AGRADECIMIENTO

RESUMEN

ABSTRACT

INTRODUCCIÓN

ÍNDICE

ÍNDICE DE TABLA

ÍNDICE DE FIGURAS

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1.	Identificación y determinación del problema	1
1.2.	Delimitación de la investigación	3
1.3.	Formulación del problema.....	3
	1.3.1. Problema general	3
	1.3.2. Problemas específicos	4
1.4.	Formulación de objetivos	4
	1.4.1. Objetivo general	4
	1.4.2. Objetivos específicos.....	4
1.5.	Justificación de la investigación.....	4
	1.5.1. Teórica.....	4
	1.5.2. Económica	5
1.6.	Limitaciones de la investigación	5

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1.	Antecedentes de estudio	6
2.2.	Bases teóricas - científicas.....	8
2.2.1.	Ubicación de la planta concentradora.....	8
2.2.2.	Molienda.....	9
2.2.3.	Características de molienda.....	10
2.2.4.	Movimiento de carga al molino.....	11
2.2.5.	Molino de Bolas.	11
2.2.6.	Función del molino de Bolas.....	12
2.2.7.	Partes del molino	15
2.2.8.	Eficiencia del Molino.	16
2.2.9.	Parámetros de operación.....	17
2.2.10.	Densidad y viscosidad de la pulpa.....	20
2.2.11.	Propiedades del plomo	20
2.2.12.	Propiedades del Zinc	21
2.2.13.	Simulación de procesos.	21
2.3.	Definición de términos básicos	22
2.4.	Formulación de la Hipótesis.....	23
2.4.1.	Hipótesis General.	23
2.4.2.	Hipótesis Especifica.	23
2.5.	Identificación de las variables.	23
2.5.1.	Variable independiente.....	23
2.5.2.	Variable dependiente.....	23
2.6.	Definición operacional de variables e indicadores.	24

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICA DE INVESTIGACIÓN

3.1.	Tipo de investigación.	25
3.2.	Nivel de investigación.	25
3.3.	Métodos de investigación.	26
3.4.	Diseño de investigación.	26
3.5.	Población y muestra.	27
3.6.	Técnicas e instrumento de recolección de datos.	27
3.7.	Técnicas de procesamientos y Análisis de datos.	28
3.8.	Tratamiento estadístico.	28
3.9.	Orientación ética filosófica y epistémica	28

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1.	Descripción del trabajo de campo.	29
4.1.1.	Estimación de los molinos COMESA 8' x 10'	30
4.2.	Presentación, análisis e interpretación de resultados.	31
4.2.1.	Resultados del muestreo	31
4.2.2.	Datos generales de los molinos 8' x 10'	33
4.2.3.	Análisis Granulométrico sin aplicar simulación.	35
4.2.4.	Resultados aplicando software metalúrgico	36
4.3.	Prueba de Hipótesis	44
4.4.	Discusión de resultados	51
4.4.1.	Balance metalúrgico.	54
4.4.2.	Gráficas de Energía de impacto.	58

CONCLUSIONES

RECOMENDACIONES

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANEXOS

ÍNDICE DE TABLA

Tabla 1 Datos de la Planta Concentradora Chicrin - Pasco	8
Tabla 2 Operacionalización de Variables-Definición-Dimensión e Indicadores	24
Tabla 3 Técnicas e instrumentos de recolección de datos.	27
Tabla 4 Datos operacionales del molino de Bolas N°3	31
Tabla 5 Datos operacionales del molino de Bolas N°5	32
Tabla 6 Datos operacionales Molino COMESA 8' x 10' N°3	33
Tabla 7 Datos operacionales Molino COMESA 8' x 10' N°5	34
Tabla 8 Análisis Granulométrico - A	35
Tabla 9 Datos para el nivel de llenado Molino COMESA N°3 Y 5.....	36
Tabla 10 Throughput del Molino COMESA N°3	39
Tabla 11 Serie de Combinaciones de potencia del molino N°3	39
Tabla 12 Serie de Combinaciones del throughput del molino N°3	39
Tabla 13 Throughput del Molino COMESA N°5	40
Tabla 14 Serie de Combinaciones de potencia del molino N°5	40
Tabla 15 Serie de Combinaciones del throughput del molino N°5	40
Tabla 16 Collar de bolas para los molinos COMESA N°3 y 5	41
Tabla 17 Mix de bolas de acero	41
Tabla 18 Energía de impacto del molino COMESA 8' x 10' N°3	42
Tabla 19 Energía de impacto del molino COMESA 8' x 10' N°5	42
Tabla 20 Análisis Granulométrico - B.....	43
Tabla 21 Estadística Hipótesis general	44
Tabla 22 Prueba Nula-Alternativa - Hipótesis General.....	45
Tabla 23 Estadística - Hipótesis Específico 1	47
Tabla 24 Prueba Nula - Alternativa - Hipótesis Específico 1.....	47

Tabla 25 Estadística -Hipótesis Específico 2	49
Tabla 26 Balance Metalúrgico sin Optimizar Parámetros	54
Tabla 27 Balance Metalúrgico sin Optimizar Parámetros	55
Tabla 28 Balance Metalúrgico Optimizando Parámetros	56
Tabla 29 Balance Metalúrgico Optimizando Parámetros	57
Tabla 30 Circuito de Molienda	68
Tabla 31 Circuito de flotación de Pb	70
Tabla 32 Circuito de flotación de Zn	72

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Desgaste de acero en el molino 8' x 10'	3
Figura 2 Grado de liberación- Mena	9
Figura 3 Molino de Bolas	12
Figura 4 Reducción de partículas - Molienda	14
Figura 5 Partes del Molino de bolas	15
Figura 6 Velocidad Crítica	17
Figura 7 Tamaño de bolas	19
Figura 8 Volumen de Carga	19
Figura 9 Gráfica del nivel de llenado del molino de bolas 8' x 10'	38
Figura 10 Gráfica de Distribución - Hipótesis	45
Figura 11 Gráfica de Caja - Hipótesis General	46
Figura 12 Grafica de distribución-Hipótesis Específico 1	48
Figura 13 Gráfica de caja-Hipótesis Específico 1	48
Figura 14 Gráfica de distribución-Hipótesis Específica 2.....	50
Figura 15 Energía de impacto Molino N°3 y 5 - Antes del cambio de parámetros	58
Figura 16 Energía de impacto - Después de modificar los parámetros.....	59
Figura 17 Circuito de chancado.....	67
Figura 18 Circuito de Molienda	69
Figura 19 Circuito de flotación de Pb	71
Figura 20 Circuito de flotación de Zn	73
Figura 21 Planta concentradora Chicrin-Atacocha	74

CAPÍTULO I

PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN

1.1. Identificación y determinación del problema

El proceso de la molienda en la etapa de conminución se ha vuelto tan vital que, aun hoy en día, con los últimos avances científicos y el surgimiento de nuevas tecnologías, este permanece vigente y en constante desarrollo.

La Empresa Nexa Resources tiene a la unidad minera Atacocha que cuenta con la planta concentradora denominada Chicrin lo cual procesa minerales provenientes de la mina subterránea y a tajo abierto por tanto su mineralización geológica de Plomo-Zinc se produce en diversas asociaciones como la galena argentífera, marmatita y el más común que tiene como meta principal de zinc; la esfalerita. Todo ello operando con equipos que exigen un cuidado particular en todo sentido como es el molino de bolas.

Los molinos de bolas tienen un rol muy esencial en el proceso de recuperación de plomo y zinc, siendo equipos que trabajan con el fin de reducir el tamaño del mineral y que además son fundamentales para la eficiencia y rentabilidad de la operación. No obstante, se ha observado dificultades constantes relacionado con el desgaste prematuro de las chaquetas y bolas de acero

dificultando la producción en estos molinos. Este problema se asigna directamente a la pésima manipulación de variables operativas del equipo en funcionamiento, como el nivel de llenado, tamaño óptimo y trayectoria de las bolas de acero durante el proceso de molienda.

El problema identificado líneas arriba de los molinos de bolas no solo impacta negativamente la eficiencia y la eficacia de la planta concentradora, sino que paralelamente conlleva a costos significativos de mantenimiento y reemplazo; e incluso mayores costos de energía. Todas estas dificultades que se presentan surgen por la falta de comprensión y control de las variables operativas, lo que tiene como efecto o consecuencia una operación subóptima, es decir que los molinos de bolas no están alcanzando su máximo rendimiento. La necesidad de iniciar estos conflictos operativos radica en la importancia de optimizar los parámetros para garantizar una buena liberación de partículas valiosas y así poder potenciar la recuperación de plomo y zinc, al tiempo que se minimizan los costos operativos.

Considerando también que el proceso de molienda de la empresa “Codelco”, considerada una planta convencional con 12 molinos de bolas, las que son alimentadas por bolas de acero de distintos diámetros, mediante sistemas de carguío que presentan diferencias importantes entre sí, así como distintas condiciones de riesgo (atollo, traslado de bolas, descarga y cambio a puente grúa) para la seguridad de los operadores y la continuidad operacional.

Figura 1

Desgaste de acero en el molino 8' x 10'



Nota: Fotografía tomada de planta

1.2. Delimitación de la investigación

- A. Espacial:** La planta concentradora Chicrin es parte de la Unidad Minera Atacocha propiedad exclusiva de Nexa Resources que se ubica en el distrito de San Francisco de Asís de Yarusyacán en el departamento de Pasco con coordenadas UTM 369,177 E – 8'830,578 E.
- B. Temporal:** El periodo de estudio para la determinación y evaluación de parámetros de los molinos de bolas se realizó a partir de diciembre 2023 hasta el mes de abril 2024.

1.3. Formulación del problema

1.3.1. Problema general

¿De qué manera influye la optimización de parámetros del molino de bolas en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha – Pasco – 2024?

1.3.2. Problemas específicos

- A. ¿De qué manera influye la granulometría en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha – Pasco – 2024?
- B. ¿De qué manera influye la carga de molienda en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha – Pasco – 2024?

1.4. Formulación de objetivos

1.4.1. Objetivo general

Determinar la influencia de la optimización de parámetros del molino de bolas en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha – Pasco – 2024

1.4.2. Objetivos específicos.

- A. Determinar la influencia de la granulometría en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha – Pasco – 2024
- B. Determinar la influencia de la carga de molienda en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha – Pasco – 2024

1.5. Justificación de la investigación

1.5.1. Teórica

La presente investigación se fundamenta en afrontar desafíos asociados con el desgaste prematuro de partes operativas del molino bolas, eficiencia de productividad y el exceso de consumo de energía en la planta concentradora.

Desde el punto de vista teórico, se carece de información que aborde variables operativas y que trabajen de manera conjunta para poder optimizar la eficiencia del proceso.

Dicho esto, para tener un buen funcionamiento en la parte operativa del circuito de molienda se realizará evaluaciones a los parámetros mediante software metalúrgico Molycop Tools.

Esta investigación es importante ya que integrará conocimientos actuales para que permita una optimización precisa y eficaz.

1.5.2. Económica

Puesta en funcionamiento los cambios de variables operativos al circuito de molienda no solo va reducir el adicionamiento constante de bolas y mantenimientos mecánicos que interrumpen las operaciones de la planta concentradora; sino que también, mejorará la eficiencia del molino. La finalidad es lograr una buena liberación de partículas valiosas lo cual potenciará la recuperación de Pb-Zn. Es decir, estos ajustes se traducirán en beneficios económicos para la empresa.

1.6. Limitaciones de la investigación

La limitación fundamental para el desarrollo de la presente investigación consiste en la restricción de datos detallados de la planta concentradora de la unidad minera Atacocha. Pese a que se hizo el trabajo para poder obtener la información de manera inmediata sobre variables, balances metalúrgicos y detalles críticos del circuito de molienda, no estuvieron del todo disponible debido a que es rigurosamente privada, por lo cual tuvo mayor plazo de demora para la obtención de datos.

CAPÍTULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes de estudio

Nacional

(Gonzalo, 2019) “Análisis de los parámetros del molino de bolas en la producción de la planta concentradora en Milpo” El estudio se realizó con la finalidad de detallar que parámetros de funcionamiento del molino de bolas condicionan una buena producción se aplicaron técnicas de recolección de datos en reportes de operación al molino, de inventarios de los equipos de planta concentradora y de trabajos de investigación. Los resultados en la investigación mostraron que los parámetros mencionados tales como:

Velocidad crítica, tamaño máximo de los elementos moledores, volumen de carga, relación entre los elementos variables del molino, están relacionados de manera directa con la producción del molino de bolas. Concluyendo que el análisis de la influencia de parámetros en los molinos de bolas llega a un 95% de eficiencia.

(Turpo, 2018) presentó el trabajo titulado "Diseño y simulación de manipulador para forros de acero aplicados en molinos convencionales", con el propósito de mejorar la calidad del mantenimiento de los molinos convencionales. Este trabajo incluye el diseño de un manipulador para forros de acero, el cual fue desarrollado mediante software CAD, buscando lograr un sistema más rápido, preciso y seguro, en conformidad con las normas y técnicas de producción industrial y minera. La metodología aplicada se basó en el método analítico, utilizando la experimentación y el análisis de casos para establecer leyes universales. Los resultados obtenidos durante la presentación del proyecto permitieron determinar la potencia del motor, con valores encontrados de acuerdo a la metodología seleccionada. En conclusión, el proyecto logró reducir significativamente el tiempo necesario para el enchaquetado de los revestimientos de los molinos convencionales gracias al uso de CAD. Además, se identificaron y abordaron los factores de riesgo latentes en cada mantenimiento de los molinos.

Internacional

(Dueñas & Gonzales, 2016): "Diseño y construcción de un molino de bolas para la pulverización de arcillas en el laboratorio de materiales y catálisis de la universidad de córdoba" tiene como objetivo la ejecución de tres etapas; en una primera etapa se logró obtener los parámetros iniciales; la segunda etapa consistió en hacer uso de la revisión literaria necesaria para lograr diseñar los elementos mecánicos y determinar los parámetros de operación que componen el molino de bolas y la tercera se llevó a cabo la construcción y posterior prueba funcional del prototipo mediante ensayos experimentales. Concluyendo que se logró minimizar los tiempos de producción de arcilla pulverizada en un 98.5% con respecto al proceso manual empleado en el laboratorio de Materiales y

Catálisis de la Universidad de Córdoba, además de ello duplicó la cantidad de material pulverizado, logrando así aumentar la realización de prácticas de caracterización de arcilla en el laboratorio de Materiales y Catálisis de la Universidad de Córdoba 15 ensayos más de lo habitual, llegando a un total de 20 ensayos por periodo académico.

2.2. Bases teóricas - científicas

2.2.1. Ubicación de la planta concentradora

La planta concentradora Chicrin está ubicada en el distrito de San Francisco de Asís de Yarusyacán, en la provincia de Pasco, Perú.

Ubicado geográficamente en el lado este de la Cordillera de los Andes, específicamente en el área conocida como Atacocha. La instalación de procesamiento de minerales de Chicrin se encuentra a una altitud de 3600 metros sobre el nivel del mar, y su posición exacta se describe como la intersección de las coordenadas: Este 3675002; Norte 8831000.(Nexa, 2023)

Para ingresar a la U.M. Atacocha, es de: Lima a través de la carretera central en dirección a Oroya-Chicrin a una distancia de 324 Km de la capital.

Tabla 1

Datos de la Planta Concentradora Chicrin - Pasco

UBICACIÓN	Departamento pasco, distrito de San Francisco de Asís de Yarusyacán
RAZÓN SOCIAL	Nexa Resources- Atacocha S.A.A.
TIPO DE MINERÍA	Polimetálica
ALTITUD	4000 m.s.n.m.
PRODUCCIÓN	4500 toneladas por día

2.2.2. Molienda

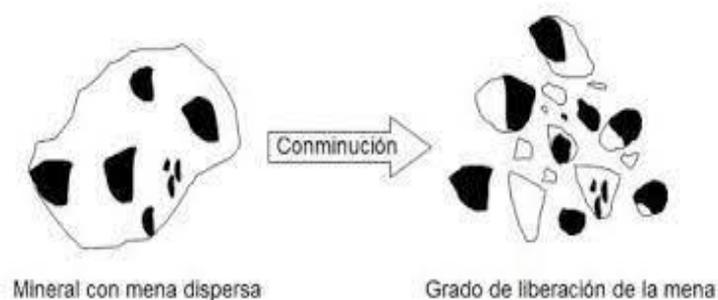
Mediante la molienda, la otra etapa del proceso de conminución después del chancado, se continúa reduciendo el tamaño de las partículas que componen el mineral, para obtener una granulometría máxima de 180 micrones (0,18 mm), la que permite finalmente la liberación de la mayor parte de los minerales de metálicos en forma de partículas individuales recuperables por flotación.

El proceso se lleva a cabo utilizando máquinas rotativas a granel existentes o molinos cilíndricos dispuestos en tres esquemas de molienda diferentes: molienda convencional, molienda de una sola pieza y molienda semiautógena. En esta etapa, se agrega una cantidad suficiente de agua al material mineralizado para formar un líquido junto con los reactivos necesarios para el siguiente proceso: la flotación.

En el proceso de trituración, la fase de trabajo es la que más energía consume de todo el proceso, por lo que para utilizarla de la forma más eficiente posible se ha conseguido el desarrollo tecnológico más potente rediseñando la máquina, en primer lugar, teniendo en cuenta las enormes dimensiones Tamaño del molino. Se pueden moler cada vez más minerales en una unidad .(Minero, 2020)

Figura 2

Grado de liberación- Mena



2.2.3. Características de molienda

A) Molienda en Seco.

- Genera más finos.
- Produce un menor desgaste de los revestimientos y medios de molienda.
- Adecuada cuando no se quiere alterar el mineral.

B) Molienda en Húmedo.

Generalmente se muele en húmedo debido a que:

- Tiene menor consumo de energía por tonelada de mineral tratada.
- Logra una mejor capacidad del equipo.
- Elimina problema del polvo y del ruido.
- Hace posible el uso de ciclones, espirales, harneros para clasificar por tamaño y lograr un adecuado control del proceso.
- Hace posible el uso de técnicas simples de manejo y transporte de la corriente de interés en equipos como bombas, cañerías, canaletas, etc.

La pulpa trabaja en un porcentaje de sólidos entre un 60% - 70% y trabaja a una velocidad entre 80% - 90% de la velocidad crítica.

La molienda es un proceso continuo, el material se alimenta a una velocidad controlada desde las tolvas de almacenamiento hacia un extremo del molino y se desborda por el otro después de un tiempo de residencia o permanencia apropiado. El control del tamaño del producto se realiza por el tipo de medio que se usa, velocidad de

rotación del molino, naturaleza de la alimentación de la mena y tipo de circuito que se utiliza. (Tapia, 2020)

2.2.4. Movimiento de carga al molino.

Al girar el molino la carga de mineral y medios de molienda son elevados hasta que se logra un equilibrio desde el cual los medios de molienda caen en cascada y catarata sobre la superficie libre de los otros cuerpos. (Tapia, 2020)

Los medios de molienda tienen 3 tipos de movimientos.

- Rotación alrededor de su propio eje.
- Caída en cascada en donde los medios de molienda caen rodando por la superficie de los otros cuerpos.
- Caída en catarata que es la caída libre de los medios de molienda sobre el pie de la carga.

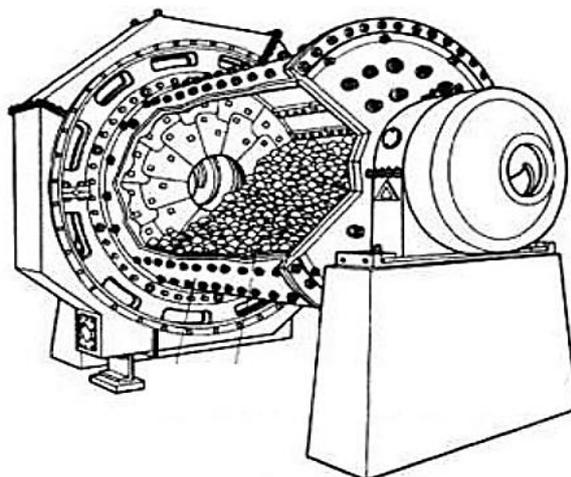
2.2.5. Molino de Bolas.

Un molino de bolas es un dispositivo giratorio diseñado para uno o más cilindros horizontales que se llenan parcialmente con bolas además del material a moler. Con un movimiento giratorio, promueve una colisión continua de bolas, haciendo que el material se vaya descomponiendo gradualmente, reduciéndolo a partículas más pequeñas. El impacto y el cizallamiento reducen el material a partículas de tamaño más fino adecuadas para materiales de alta dureza y difíciles de romper.

El uso de bolas de material con alta densidad es capaz de proporcionar un triturado más eficiente y asegurar la obtención de partículas más finas. Además de la densidad, se recomiendan esferas de diámetro más pequeño para obtener un tamaño de grano más fino, mientras que las esferas de diámetro más grande deben usarse para una molienda más gruesa. (Tecnal, 2020).

Figura 3

Molino de Bolas



Nota: Imagen tomada de Yantai Jinpeng

2.2.6. Función del molino de Bolas.

La alimentación enviada al molino de bolas es el producto final obtenido en la cadena de trituración, cuyo tamaño es variable, dependiendo del tamaño del producto molido terminado y de los requerimientos energéticos del molino de bolas. Esto significa que el alimento no puede ser ni demasiado grueso ni demasiado fino, ya que la calidad del producto final afecta a la eficiencia del proceso posterior. La molienda generalmente se realiza agregando agua, agregando productos químicos (como cal para ajustar el pH), inhibidores (como sulfato de zinc y cianuro) y algunos agentes con propiedades especiales según el mineral que se trata.

Dentro del molino de bolas se tiene una carga de bolas de acero que suele ocupar entre 30 a 45% del volumen interior del molino. La carga de bolas puede estar compuesta de bolas del mismo diámetro o de una combinación de varios tamaños de bolas que permitan obtener un producto final adecuado. Existen relaciones matemáticas para determinar el tamaño óptimo de bolas de molienda,

y se basan en ciertas características del material que se alimenta, tal como la gravedad específica, tamaño máximo, y tamaño del producto final. La superficie interior del cuerpo cilíndrico del molino de bolas se cubre con forros de acero al manganeso, dichos forros tienen una forma superficial variable al igual que su espesor, siendo la superficie ondulada la más típica. El diseño del forro es importante porque permite elevar la carga de manera adecuada.

Cuando el molino de bolas comienza a girar, se agregan minerales, agua y productos químicos según sea necesario. Durante el movimiento en el molino, hay una mezcla continua entre el medio de molienda (bolas de acero) y el mineral. A medida que la carga se mueve hacia la salida del molino de bolas, el tamaño disminuye. Cabe mencionar que existen dos movimientos importantes en el molino, uno es el movimiento de cascada y el otro es el movimiento de cascada. En el primer caso, cuando la pelota alcanza el nivel más alto, tiende a deslizarse sobre la pelota y bajar los niveles de carga, creando un movimiento similar a la forma externa del riñón. En el segundo caso, cuando la bola alcanza el nivel más alto, hay una tendencia a soltar bolas y cargas colocadas en niveles inferiores. En el primer caso, se produce una mejor molienda y reducción de tamaño debido al contacto cercano y constante entre las partículas y las bolas, mientras que en el segundo caso, la molienda es menos efectiva debido a la falta de contacto cercano. Un control adecuado del flujo de mineral y la densidad de la pulpa asegura un movimiento de carga adecuado en el molino.

El producto del molino de bolas es recibido en un tanque de bombeo y enviado a un sistema de clasificación que consta de uno o más ciclones dependiendo del tamaño de la planta de procesamiento del

mineral y del proceso de concentración granulométrica y/o lixiviación. El desbordamiento del ciclón es el producto final y el escurrimiento del fondo contiene partículas gruesas que deben devolverse al molino para su molienda. Durante la operación de la concentradora, el ciclo de molienda y clasificación se repite continuamente, y su eficiencia afecta el proceso posterior (concentración o lixiviación). (Metallurgist, 2021)

Figura 4

Reducción de partículas - Molienda



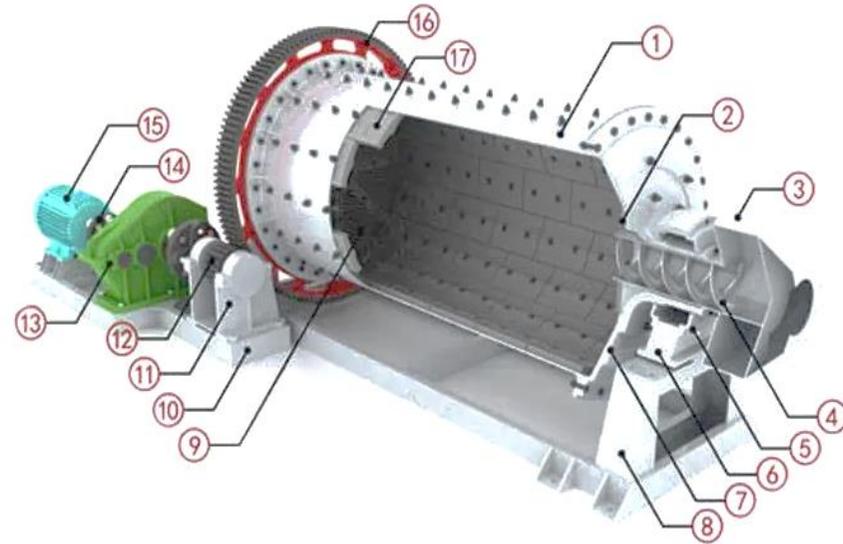
Nota: Imagen tomada de Wikipedia

2.2.7. Partes del molino

1. Cuerpo giratorio
2. Losa
3. Dispositivo alimentador
4. Tornillo de alimentación
5. Tapa de rodamiento
6. Asiento rodamiento
7. Cabeza del molino
8. Marco
9. Placa de tubos
10. Marco para parte motriz
11. Bloque de soporte de puente transversal
12. Piñón-corona
13. Reductor
14. Acoplador
15. Motor
16. Engranaje grande
17. Forro grande

Figura 5

Partes del Molino de bolas



Nota: *Imagen tomada de Henry Arrval*

2.2.8. Eficiencia del Molino.

Los factores de control que regulan la eficiencia de molienda de minerales en molinos cilíndricos son:

- La velocidad del molino afecta la capacidad, así como al desgaste del recubrimiento y de las bolas, en una proporción directa hasta el 65-75 por 100 de la velocidad crítica.
- Una carga de bolas equivalente al 35-50 por 100 del volumen del molino proporciona la máxima capacidad.
- Las bolas del menor tamaño, pero capaces de moler el material alimentado, proporcionan una eficiencia máxima.
- Los elevadores son esenciales para que las operaciones se realicen con suavidad.
- El relleno óptimo de material se produce cuando su volumen iguala al espacio vacío entre las bolas de molienda.
- Cargas circulantes mayores tienden a aumentar la producción y reducir la cantidad de material fino no deseable.
- La descarga de bajo nivel o rejilla, junto a la recirculación de material proveniente de un clasificador, tienden a incrementar la capacidad de molienda en comparación con la descarga por el centro o por rebosamiento, aunque el desgaste del revestimiento, la rejilla y los medios es mayor.
- Las razones de sólidos a líquidos en el molino deben estudiarse basándose en la reología de la suspensión. **(García, 2016)**

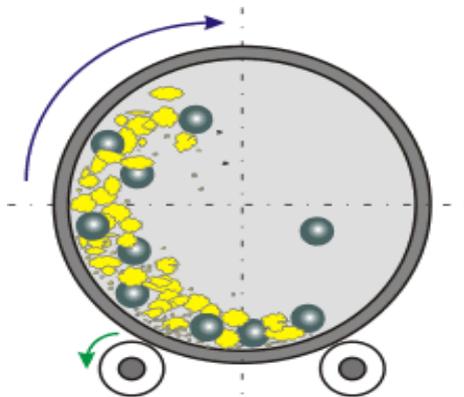
2.2.9. Parámetros de operación.

A. Velocidad crítica

La velocidad crítica se refiere a la velocidad mínima a la que la capa exterior del medio abrasivo se adhiere a la superficie interior del cilindro bajo la influencia de la fuerza centrífuga. En este punto, la fuerza centrífuga equilibra exactamente el peso del material triturado. Normalmente, el rango operativo está entre el 70% y el 80% de la velocidad crítica. En definitiva, la velocidad crítica es la velocidad a la que la fuerza centrífuga mantiene todo el material contra las paredes del molino, evitando las cascadas y saltos necesarios para el proceso de molienda. (Alcántara, 2008)

Figura 6

Velocidad Crítica



Nota: Imagen tomada de Alcántara 2008

B. Radio de reducción

En el proceso de calcular el Radio de Reducción (R_r), es esencial establecer los tamaños promedios tanto de la alimentación como de la descarga. Este procedimiento implica determinar el porcentaje acumulativo que atraviesa tanto el material de entrada como el de

salida. Posteriormente, se representa gráficamente en una escala semilogarítmica la relación entre el (% Acumulativo que atraviesa) y el (Tamaño de partícula en micrones), permitiendo así una determinación visual de los datos requeridos.

$$Rr = \frac{F_{80}}{P_{80}}$$

F₈₀: 80% Ac (-) en O, alimento al molino

P₈₀: 80% Ac (-) en M, descarga del molino.

C. Tamaño de bolas

$$B_s = \left(\frac{F_{80}}{330} \right)^{0.5} \left[\frac{\rho_{ore} \frac{W_{iB}}{1.10229}}{\%N_c D^{0.5}} \right]^{\frac{1}{3}}$$

B_s = Tamaño de bola óptima

ρ = Densidad de la mena (t/m³)

W_{iB} = Índice de trabajo de bond (KWh/t)

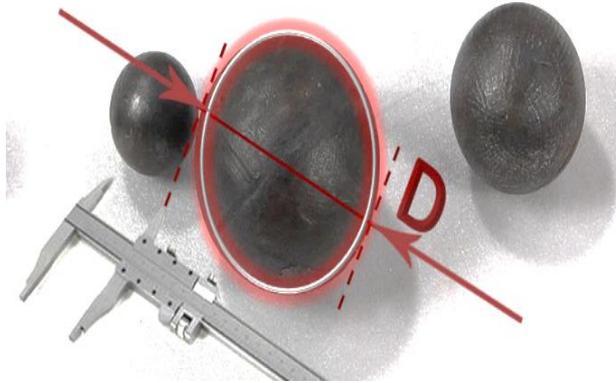
%N_c = Porcentaje de la velocidad crítica

D = Diámetro efectivo del molino (ft)

F₈₀ = Diámetro 80 de la alimentación (micras)

Figura 7

Tamaño de bolas



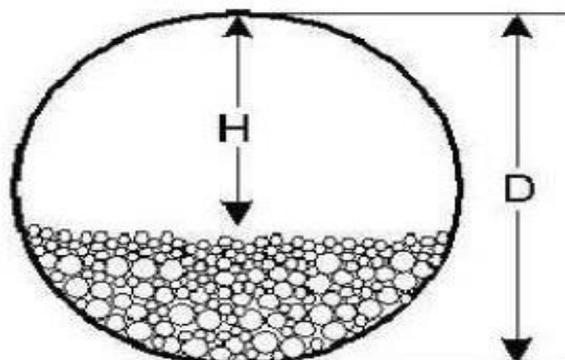
Nota: Imagen tomada de Energosteel

D. Volumen de carga

Se refiere al espacio total que ocupan las bolas, los minerales y el agua en el molino, incluso el espacio entre ellos. Este valor suele expresarse como porcentaje o fracción, denotado como "H", del volumen interno efectivo del molino.

Figura 8

Volumen de Carga



E. Energía del molino.

$$E = \frac{V.A.\sqrt{F}}{1000} \dots\dots\dots (1)$$

La cantidad de energía necesaria (E) para llevar a cabo una operación de molienda es directamente proporcional a la energía suministrada. Para calcular esta energía, se deben tener en cuenta factores como el voltaje (V), la corriente (A) y las fases del motor (F). (Rosales, 2020)

$$P = \frac{2\pi Nt}{60} \dots\dots\dots (2)$$

La potencia nominal consumida (P) también puede determinarse según se describe en la Ecuación 2. En este contexto, la relación entre el consumo de energía en un molino está vinculada al torque.

$$Ee = \frac{Pt_c}{m} \dots\dots\dots (3)$$

2.2.10. Densidad y viscosidad de la pulpa

La viscosidad y la densidad de la pulpa, están muy ligadas. Desafortunadamente la densidad de la pulpa dentro del molino no puede ser medida directamente, de modo que lo que se mide y controla es la densidad de la pulpa en la descarga del molino.

Es importante notar que ambas, en la descarga y en el interior del molino, no son las mismas. La retención de agua en el molino es generalmente menor que la de los sólidos finos, de allí que la densidad de la pulpa interior sea mayor que en la descarga.

A través de la densidad de la pulpa en la descarga, es posible controlar el nivel de la pulpa en el molino.

2.2.11. Propiedades del plomo

El plomo, elemento químico con símbolo Pb, número atómico 82 y masa atómica 207,19. Está clasificado como un metal pesado. Tiene una densidad relativa (o gravedad específica) de 11,4 a 16°C (61°F) y un color

azul característico que cambia a un tono gris opaco cuando se rocía. Este metal es dúctil y dúctil con un punto de fusión de 327,4 °C (621,3 °F) y un punto de ebullición de 1725 °C (3164 °F). Las valencias químicas típicas del plomo son divalentes y tetravalentes. Aunque se disuelve lentamente en ácido nítrico, es relativamente resistente a los ácidos sulfúrico y clorhídrico.

El plomo es anfífilo porque forma sales de plomo derivadas del ácido, así como sales metálicas derivadas del ácido del plomo. Además, tiene la capacidad de producir diversas sales, óxidos y compuestos organometálicos. Desde el punto de vista industrial, los compuestos de plomo más importantes son el óxido de plomo y el tetraetilo de plomo. El plomo puede formar aleaciones con varios metales, que es su forma principal en la mayoría de las aplicaciones industriales. Las aleaciones resultantes de estaño, cobre, arsénico, antimonio, bismuto, cadmio y sodio tienen una importancia industrial considerable. **(Lenntech 2, s.f.)**

2.2.12. Propiedades del Zinc

El zinc es un metal blanco y azulado que conduce la electricidad. Si bien puede ser un metal frágil, a una temperatura aproximada de entre 100° y 150° C se vuelve maleable, tiene propiedades superplásticas y a unos 238° C logra propiedades ferromagnéticas. No obstante, en estado natural, el zinc no es un elemento ferromagnético. Sí presenta propiedades eléctricas, térmicas y ópticas que pueden resultar interesantes. **(Geologiaweb, 2023)**

2.2.13. Simulación de procesos.

La simulación es una herramienta capaz de analizar residuos de materiales, evaluar patrones de molienda, simular el proceso y evaluar el material abrasivo. Además, “proporciona mayor versatilidad para el modelado

metalúrgico y la simulación de procesos. Además, permite la evaluación en línea de diversos esquemas disruptivos basados en modelos matemáticos confiables y de alta calidad.

En este estudio, podremos registrar datos sobre las operaciones de rectificado utilizando una interfaz interactiva.

2.3. Definición de términos básicos

- **Metalurgia:** Extracción y producción de metales a partir minerales.
- **Partícula:** Un fragmento microscópico de un mineral que contiene compuestos químicos específicos, como óxidos, sulfuros o silicatos, que se extraen durante el proceso metalúrgico para obtener metales.
- **Mena:** Mineral que contiene suficiente cantidad de un metal valioso para ser económicamente rentable su extracción y procesamiento.
- **Ganga:** Impureza presentes en el mineral deseado.
- **Carga:** Carga de material sólido en molino.
- **P80:** El tamaño de partícula en el que el 80% del material triturado es más fino.
- **F80:** Tamaño de partícula en el que el 80% del material alimentado a un circuito de procesamiento es más grueso.
- **Granulometría:** Es la distribución de tamaños de partículas en un material, como minerales triturados o polvos metálicos. Además, es crucial para controlar la eficiencia de trituración, molienda y otros aspectos del manejo de materiales.
- **Ángulo:** Inclinación del molino de bolas que afecta el tamaño de partícula.
- **Energía:** Potencia realizada para reducir el tamaño de partículas.

2.4. Formulación de la Hipótesis.

2.4.1. Hipótesis General.

La optimización de parámetros del molino de bolas influye significativamente en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024

2.4.2. Hipótesis Específica.

A) La optimización de parámetros del molino de bolas influye significativamente en la granulometría para la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024

B) La optimización de parámetros del molino de bolas influye significativamente en la carga de molienda para la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024

2.5. Identificación de las variables.

2.5.1. Variable independiente.

- Optimización de parámetros del molino de bolas

2.5.2. Variable dependiente.

- Recuperación de Pb-Zn

2.6. Definición operacional de variables e indicadores.

Tabla 2

Operacionalización de Variables-Definición-Dimensión e Indicadores

Variable	Definición	Dimensiones	Indicadores
Variable Independiente			
Optimización de parámetros del Molino de Bolas	La optimización del molino de bolas aumentará la eficiencia y rendimiento de la molienda. favoreciendo la liberación de minerales valiosos e incrementando la interacción con los reactivos de flotación (Pb- Zn).	<ul style="list-style-type: none"> - Granulometría: estima la variación en el tamaño de partícula. - Perfil de carga: distribución y tamaño de bolas de acero - Eficiencia Energética: relación de energía y cantidad de material molido. - Cinética de molienda: estimar la características y propiedades para la etapa de molienda 	<ul style="list-style-type: none"> - Índice de trabajo - Velocidad del molino - Consumo de bolas de acero - Trayectoria de caída de bola de acero - Potencia (KW) - Angulo de reposo
Variable Dependiente			
Recuperación de Pb-Zn	<ul style="list-style-type: none"> - Mejorar la eficiencia de separación (Mena-Ganga) - Potenciar la recuperación 	Determinación química del concentrado	<ul style="list-style-type: none"> -Efectividad de molienda. -Recuperación global de Pb-Zn

CAPÍTULO III

METODOLOGÍA Y TÉCNICA DE INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación.

La investigación que se llevó a cabo para optimizar los parámetros de los molinos de bolas de 8' x 10' para la recuperación de Pb-Zn se enmarca principalmente como una investigación APLICADA porque se enfoca en abordar los problemas planteados, con el propósito de generar soluciones prácticas y aplicables que beneficien directamente a la planta concentradora.

Además, este estudio radica en su dependencia de fundamentos teóricos y conceptuales respaldados por conocimientos metalúrgicos los cuales serán aplicados específicamente en el área de operaciones de la concentradora. En este contexto, se abordará la interacción entre la granulometría y los parámetros del molino, buscando explicar de manera detallada los efectos observados en este proceso.

3.2. Nivel de investigación.

El desarrollo de esta investigación es de carácter EXPLICATIVO ya que se está buscando la causalidad, es decir, la causa-efecto, la cual se establecen relaciones existentes entre la aplicación de la variable independiente (en el

proceso) y el resultado obtenido considerando como variable dependiente; teniendo en cuenta para ello el problema principal planteado y que será desarrollado dentro del contexto de la investigación.

3.3. Métodos de investigación.

El método de investigación es HIPOTÉTICO-DEDUCTIVO, dado que posibilitará un análisis sistemático que permitió formular las hipótesis mediante una recolección de datos operativos de la planta, como las interacciones entre los parámetros del molino de bolas y la recuperación de plomo y zinc, el cual contribuyó a deducir tácticas más eficaces en el tratamiento metalúrgico.

Además, su enfoque de la presente investigación es de carácter **MIXTO** porque tiene una integración del método cuantitativo tal como recopilar y analizar datos numéricos mediante el software metalúrgico Molycop Tools bajo diferentes configuraciones y cualitativos mediante el análisis y la interpretación de resultados. Esta combinación ayudará la validación y una base más sólida para las conclusiones.

3.4. Diseño de investigación.

El diseño para la presente investigación es PRE-EXPERIMENTAL, dado que se manipularán las variables independientes para medir los cambios ocurridos a lo largo del tiempo y permiten evaluar el impacto de la intervención o manipulación de variables para finalmente tener resultados en la variable dependiente.

Para realizar el diseño de investigación, la manipulación de las variables se llevó a cabo mediante el uso de herramientas tecnológicas metalúrgicas. Además, al observar de manera controlada las variables independientes, se busca

determinar si han tenido algún impacto o influido positivamente en los resultados de la variable dependiente.

3.5. Población y muestra.

A) Población

La población para el desarrollo de esta investigación son los minerales que procesan en la concentradora Chicrin de la unidad minera Atacocha; específicamente en los molinos de bolas de 8' x 10', con alimentación de 76TMH de mineral.

B) Muestra

Serán las muestras tomadas de la descarga del molino de 8' x 10', cuyo producto final se obtendrá en 10 kilos de mineral tras realizar 10 cortes por guardia, esto es crucial para evaluar la granulometría del mineral procesado. Al elegir muestras de la descarga del molino, tendremos la capacidad de examinar minuciosamente la variación en la distribución de tamaños de partículas, lo cual es un aspecto fundamental para comprender el rendimiento del molino y tener mejores resultados de molienda.

3.6. Técnicas e instrumento de recolección de datos.

Tabla 3

Técnicas e instrumentos de recolección de datos.

Técnicas	Instrumentos
- Observación	- Registro de observaciones
- Revisión Documental	- Reportes de operación
- Clasificación de enfoques por diferentes autores	- Documentación académica
- Medición directa	- Ro Tap, tamizadores, flexómetro, flujómetro, medidores de presión, PLC, densímetro, tacómetro y cronómetro.

3.7. Técnicas de procesamientos y Análisis de datos.

Tras la recopilación de muestras del circuito de molienda, se llevará a cabo un minucioso seguimiento de los informes de operaciones de los molinos de bolas. En esencia, emplearemos instrumentos de recolección de datos para obtener la información más completa y detallada sobre el proceso en curso. Posteriormente, procederemos a evaluar e identificar las condiciones operativas.

En este sentido, se emplearán softwares metalúrgicos de vanguardia para determinar la distribución de partículas. Además, se aprovecharán herramientas con modelos matemáticos para optimizar los parámetros de molienda, asegurando así la máxima precisión en los resultados obtenidos.

3.8. Tratamiento estadístico

Se utilizaron simulaciones operativas del molino de bolas el cual permitió analizar de una manera más concisa.

Así mismo, cálculos estadísticos y matemáticos en granulometría y variables de operación del molino, para finalizar; balances metalúrgicos de un antes y después con el fin de validar con exactitud el resultado de la optimización.

3.9. Orientación ética filosófica y epistémica

La orientación ética en el proceso de la presente investigación, fue esencial desde la planificación hasta la evaluación del proyecto. Esto implica prevenir el plagio mediante el adecuado uso de citas bibliográficas y parafraseo, siguiendo las normas establecidas por nuestra casa superior de estudios.

CAPÍTULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Descripción del trabajo de campo.

En la actualidad, se encuentran un total de 7 molinos de bolas, de los cuales uno se utiliza como molino secundario. Hay 2 molinos cónicos HARDINGE de 8' x 5' y 4 molinos COMESA de 8' x 10' que actúan como molinos primarios. Cada uno opera en un circuito cerrado.

Hoy en día en la unidad minera, se emplean bolas de acero de 3 ½" en los molinos primarios, mientras que el molino secundario utiliza bolas de acero de 2 ½". La descarga de los molinos fluye hacia una celda flash SK80, responsable de recuperar concentrado de plomo grueso. El relave de esta celda es transportado por una bomba hacia un hidrociclón D- 15", donde los gruesos clasificados regresan al molino como carga circulante, y los finos se dirigen a la etapa de flotación bulk Pb-Cu.

Cada molino se alimenta a través de fajas transportadoras de velocidad variable, con el mineral proveniente de las tolvas de finos, y el tonelaje se regula

automáticamente mediante balanzas Ramsey. En esta fase del tratamiento, se incorporan los siguientes reactivos a cada molino primario:

Molino Primario

- $ZnSO_4$: Depresor
- NaCN: Depresor

Celda Flash

- Z11: Colector
- MIBC: Espumante

En particular, el molino N°3 COMESA de 8' x 10' trabaja en conjunto con un molino secundario HARDINGE de 8' x 5'. Los gruesos clasificados por el hidrociclón D- 15" son utilizados como alimentación para este molino secundario, cuya descarga es conducida por una bomba hacia un hidrociclón D- 20". Los gruesos clasificados en este hidrociclón vuelven al molino secundario como carga circulante, mientras que los finos resultantes son enviados al proceso de flotación bulk Pb-Cu.

4.1.1. Estimación de los molinos COMESA 8' x 10'

En la unidad minera se tienen 4 molinos primarios Comesa de 8' x 10' que trabajan con velocidades críticas distintas.

A) Circuito N°1 y 3:

Se introduce aproximadamente 76 TMPH de mineral proveniente de una mina subterránea en un molino cilíndrico COMESA de dimensiones 8' x 10'. La salida del molino se dirige a una celda flash SK80, donde se realiza la flotación de un concentrado de plomo grueso. Este concentrado se envía a la etapa de espesamiento, mientras que el material no flotado se traslada a un hidrociclón D15. En el proceso de clasificación, las partículas más finas

regresan al molino como carga circulante, mientras que las partículas más gruesas se dirigen al circuito de flotación

B) Circuito N° 5 y 6:

Se introduce una carga de aproximadamente 76 TMPH de mineral proveniente del tajo en los molinos COMESA de dimensiones 8' x 10'. En contraste con otros molinos, el producto de este material se envía directamente al circuito de Zinc. Posteriormente, se alimenta una lechada de cal tanto al acondicionamiento de zinc como a la segunda etapa de limpieza del circuito de Zinc, utilizando un sistema automático de circuito cerrado.

4.2. Presentación, análisis e interpretación de resultados.

4.2.1. Resultados del muestreo

A) Molino N°3

Tabla 4

Datos operacionales del molino de Bolas N°3

	Molino (3) 8'x10'
RPM	21
Velocidad crítica	77,3
Amp	350
Dp Feed	2370
%Bolas	35
% Carga	49

Nota: Elaboración propia

B) Circuito N°5

Tabla 5

Datos operacionales del molino de Bolas N°5

	Molino (5) 8'x10'
RPM	26
Velocidad crítica	75,9
Amp	360
Dp Feed	2365
%Bolas	36
% Carga	42

Nota: Elaboración propia

- ❖ Molino 3: 49%..... Mayor tonelaje
- ❖ Molino 5: 42%..... Menor tonelaje
- ❖ Las tablas presentadas 4 y 5 indican que a pesar de tener un RPM que está por debajo de la velocidad crítica indica un rendimiento inapropiado ya que durante la operación podría estar restringiendo la eficiencia de molienda, llevando a una capacidad de procesamiento disminuida y posiblemente a una producción ineficaz.
- ❖ A pesar de que el molino tiene un porcentaje de bolas del 35%, lo cual suele considerarse aceptable, el porcentaje de carga elevado del 49% sugiere una carga excesiva, lo que podría acarrear un desgaste prematuro de los componentes del molino, generando así costos adicionales de mantenimiento.
- ❖ La lectura del consumo eléctrico, que se sitúa en 350 Amperios, junto con el diferencial de presión registrado en el alimentador (Dp Feed) de 2370, plantea interrogantes sobre la eficiencia energética. Estos indicadores sugieren la existencia de posibles desafíos en la gestión

de la carga del molino, lo que podría afectar negativamente la eficiencia general.

- ❖ Aunque el porcentaje de bolas se eleva al 36%, indicando una carga sustancial, el porcentaje de carga, ubicado en el 42%, señala un nivel que no alcanza la eficiencia óptima del molino.

4.2.2. Datos generales de los molinos 8' x 10'

A) Molino de bolas COMESA 8' x 10' N°3

Tabla 6

Datos operacionales Molino COMESA 8' x 10' N°3

1	Diámetro (ft)	10
2	Longitud (ft)	8
3	RPM Normal	21
4	% de Humedad	--
5	Alimento TMS/hr	76
6	HP - (Motor)	540
7	Voltios	440
8	Factor de potencia	76
9	Amperaje	350
10	% Vc	77.3
11	Radio de reducción	2,15
12	Consumo de Energía	3,16
13	Tonelaje máximo	127,00
14	Eficiencia del motor	75,26
15	% de nivel de bolas	35
16	Wi	14
17	Densidad en la descarga	2370

NOTA: Elaboración propia

B) Molino de bolas COMESA 8' x 10' N°5

Tabla 7

Datos operacionales Molino COMESA 8' x 10' N°5

1	Diámetro (ft)	10
2	Longitud (ft)	8
3	RPM Normal	26
4	% de humedad	--
5	Alimento TMS/hr	76
6	HP - (Motor)	530
7	Voltios	445
8	Factor de potencia	75
9	Amperaje	360
10	% Vc	75,9
11	Radio de reducción	1,78
12	Consumo de Energía	3,15
13	Tonelaje máximo	125,00
14	Eficiencia del motor	76
15	% de nivel de bolas	36
16	Wi	13
17	Densidad en la descarga	2365

NOTA: Elaboración propia

4.2.3. Análisis Granulométrico sin aplicar simulación.

Tabla 8

Análisis Granulométrico - A

Abertura micrones	ALIMENTO				PRODUCTO			
	Peso (g)	% peso	%Ac (+)	%Ac (-)	Peso (g)	% peso	%Ac (+)	%Ac (-)
1700	0,00	0	0	100	0	0	0	100
600	209,30	69,77	69,77	30,23	89,1	29,7	29,7	70,3
417	50,90	16,97	86,73	13,27	48,9	16,3	46	54
300	16,60	5,53	92,27	7,73	31,6	10,53	56,53	43,47
212	6,30	2,1	94,37	5,63	25,7	8,57	65,1	34,9
150	1,80	0,6	94,97	5,03	15,5	5,17	70,27	29,7
106	1,30	0,43	95,4	4,6	12,5	4,17	74,43	25,57
75	0,70	0,23	95,63	4,37	8,8	2,93	77,37	22,63
53	0,80	0,27	95,9	4,1	7,8	2,6	79,97	20,03
45	0,20	0,07	95,97	4,03	2,5	0,83	80,8	19,2
38	0,00	0	95,97	4,03	3	1	81,8	18,2
	12,10	4,03	100	0	54,6	18,2	100	0
Total	300,00	100,00	F80	2431	300	100	P80	1127

NOTA: Elaboración propia

4.2.4. Resultados aplicando software metalúrgico

Según las características operativas y datos obtenidos por el muestreo de los molinos N°3-5; los nuevos parámetros del nivel de carga utilizando simulación metalúrgica son expuestas a continuación.

A) Nivel de llenado

Tabla 9

Datos para el nivel de llenado Molino COMESA N°3 Y 5

H(cm)	% de Llenado	H/D
295	1,00%	0,9671916
290	1,83%	0,9507874
285	2,80%	0,9343832
280	3,89%	0,917979
275	5,08%	0,9015748
270	6,37%	0,8851706
265	7,75%	0,8687664
260	9,19%	0,8523622
255	10,71%	0,83595801
250	12,28%	0,81955381
245	13,92%	0,80314961
240	15,60%	0,78674541
235	17,34%	0,77034121
230	19,12%	0,75393701
225	20,94%	0,73753281
220	22,79%	0,72112861
215	24,68%	0,70472441
210	26,60%	0,68832021
205	28,55%	0,67191601
200	30,52%	0,65551181
195	32,52%	0,63910761
190	34,54%	0,62270341
185	36,57%	0,60629921
180	38,62%	0,58989501
175	40,68%	0,57349081
170	42,75%	0,55708661
165	44,83%	0,54068241
160	46,91%	0,52427822
155	49,00%	0,50787402

LARGO	8	ft
	2,44	mt
DIAMETRO	10	ft
	3,05	mt
DIAMETRO int (cm)	305	cm
Radio Interior	152,4	cm
Área Total	72965,877	cm ²

Molino N° 3
34,54%

Molino N°5
34,50%

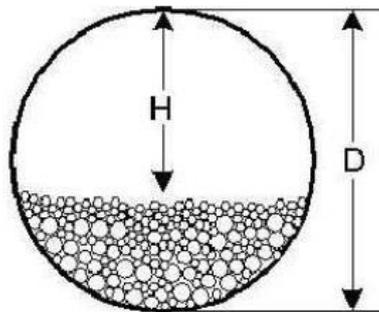
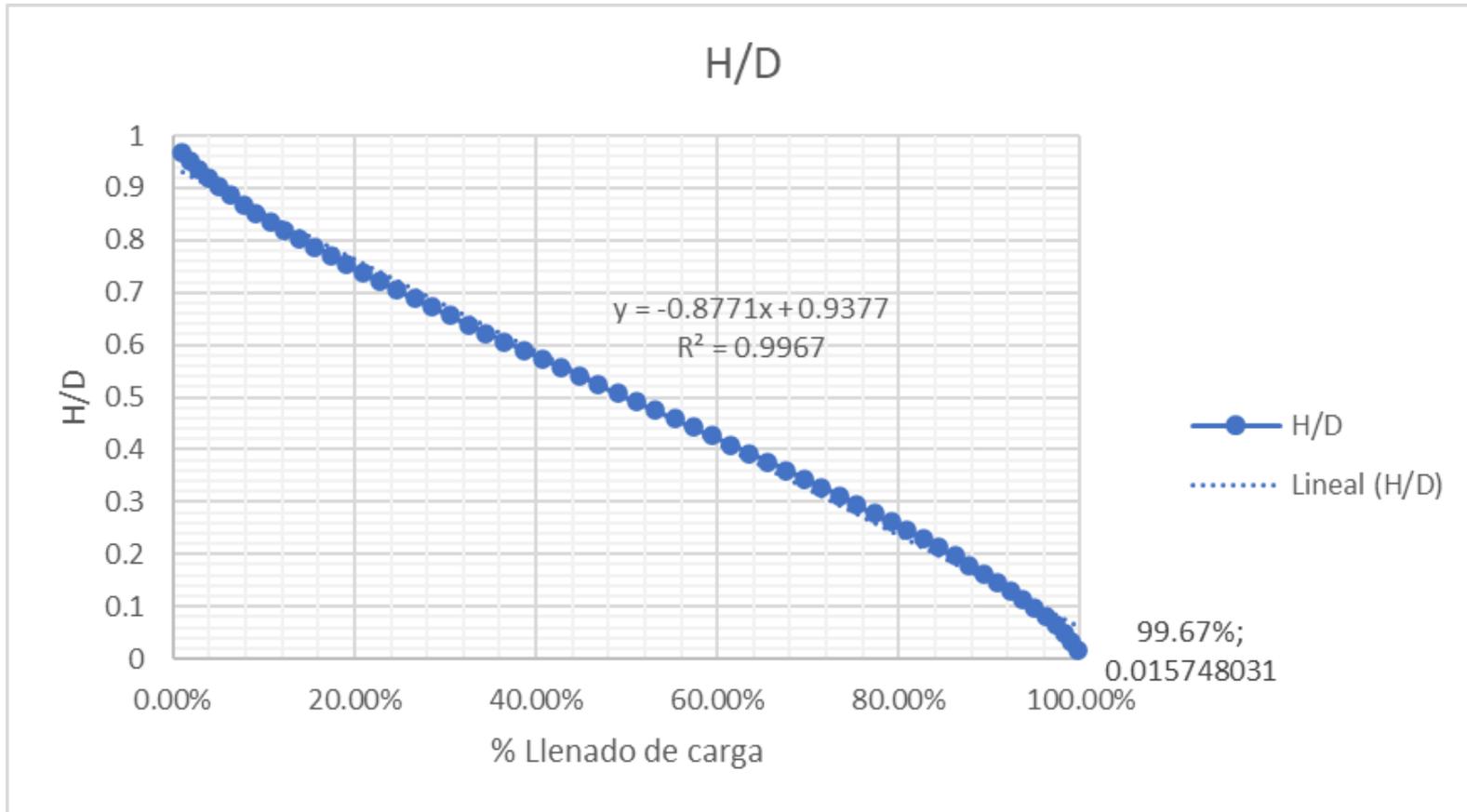


Figura 9

Gráfica del nivel de llenado del molino de bolas 8' x 10'



Nota: Elaboración propia

B) Throughput y potencia requerida

Tabla 10

Throughput del Molino COMESA N°3

Diámetro	Largo	%Vc	Llenado de carga	Carga de bolas	% Intersticial	Ángulo de reposo	Potencia total	Throughput
10	8	73	34,54	34,52	100	35,10	337	114,57

Tabla 11

Serie de Combinaciones de potencia del molino N°3

Potencia						
337 kw	34	36	38	40	42	44
70	326,7779	322,4324	317,6333	312,3805	306,6742	300,5142
72	336,1144	331,6448	326,7085	321,3057	315,4363	309,1003
74	345,4509	340,8571	335,7838	330,2309	324,1984	317,6864
76	354,7874	350,0695	344,859	339,156	332,9605	326,2725

Tabla 12

Serie de Combinaciones del throughput del molino N°3

Throughput						
114.57 ton/h	34	36	38	40	42	44
70	110,9649	109,4893	107,8596	106,076	104,1382	102,0465
72	114,1353	112,6176	110,9414	109,1067	107,1136	104,9621
74	117,3058	115,7458	114,0231	112,1374	110,089	107,8777
76	120,4762	118,8741	117,1048	115,1682	113,0644	110,7933

Gracias al software se pudieron tomar una serie de combinaciones con el fin de obtener el mejor tonelaje con una potencia adecuada para poder optimizar la eficiencia del molino N°3 y evitar costos excesivos.

Molino COMESA 8' x 10' N°5

Tabla 13

Throughput del Molino COMESA N°5

Diámetro	Largo	%Vc	Llenado de carga	Carga de bolas	% Intersticial	Ángulo de reposo	Potencia total	Throughput
10	8	72	34,50	34,50	100	34,06	320	108,53

Tabla 14

Serie de Combinaciones de potencia del molino N°5

Potencia							
320 kw	34	36	38	40	42	44	
70	312,3717	308,3366	303,8596	298,9407	293,5801	287,7776	
72	321,2966	317,1462	312,5413	307,4819	301,9681	295,9998	
74	330,2215	325,9558	321,223	316,0231	310,3561	304,222	
76	339,1465	334,7654	329,9047	324,5642	318,7441	312,4442	

Tabla 15

Serie de Combinaciones del throughput del molino N°5

Throughput							
108.53 ton/h	34	36	38	40	42	44	
70	105,8392	104,472	102,9551	101,2885	99,47215	97,50612	
72	108,8632	107,4569	105,8967	104,1824	102,3142	100,292	
74	111,8872	110,4418	108,8382	107,0764	105,1563	103,0779	
76	114,9112	113,4268	111,7798	109,9703	107,9983	105,8638	

De igual manera que en el molino N°3 se pudieron tomar una serie de combinaciones con el fin de obtener el mejor tonelaje con una potencia adecuada para poder optimizar la eficiencia del molino N°5 y evitar costos excesivos.

C) Collar de bolas

De acuerdo a los datos operacionales el tamaño óptimo de bola para los molinos N°3 y 5 son de 2 pulg.

A continuación, se presenta el collar de bolas con su respectiva distribución en toneladas; sugerido mediante el uso de software metalúrgico.

Tabla 16

Collar de bolas para los molinos COMESA N°3 y 5

Tamaño	% retenido	Ton
2,0	31,87	9,77
1,5	46,17	14,15
1	20,08	6,15
0,5	1,88	0,58

No obstante, se sugiere solo optar por un mix de bolas de acero.

Tabla 17

Mix de bolas de acero

Mix de bolas
2
1,5

D) Energía de impacto

Tabla 18

Energía de impacto del molino COMESA 8' x 10' N°3

Throughput	KW	% de Llenado	%Vc	Ángulo de R.	E. impacto
114,1353	336,1144	34	72	36,44115341	13,76725047
117,3058	345,4509	34	74	41,07309493	13,50003938
115,7458	340,8571	36	74	35,121231	13,50003938
117,1048	344,859	38	76	37,75605591	13,15084312
115,1682	339,156	40	76	36,39115341	13,15084312

NOTA: Elaboración propia

Tabla 19

Energía de impacto del molino COMESA 8' x 10' N°5

Throughput	KW	% de Llenado	%Vc	Ángulo de R.	E. impacto
115,3339271	340,3942128	34	72	37,81203142	13,75512047
118,5376473	349,8496076	34	74	41,71204642	13,50003938
117,0063982	345,3303099	36	74	39,92105112	13,50003938
118,4239021	349,5139022	38	76	38,35745504	13,15084312
116,506874	343,8560244	40	76	36,97858488	13,15084312

NOTA: Elaboración propia

Tabla 20*Análisis Granulométrico - B*

Abertura		ALIMENTO			PRODUCTO			
micrones	Peso (g)	% peso	%Ac (+)	%Ac (-)	Peso (g)	% peso	%Ac (+)	%Ac (-)
1700	0,00	0	0	100	0	0	0	100
600	182,40	61,87	60,87	39,13	64,2	21,4	21,4	77,9
417	67,20	21,04	83,27	16,73	52,5	17,5	38,9	62,3
300	26,80	8,57	92,23	7,77	36	12	50,8	48,1
212	11,42	3,23	96,03	3,97	28,1	9,37	60,26	39,74
150	4,73	1,93	97,6	2,4	17,7	5,9	66,18	34,83
106	2,81	0,93	98,53	1,47	12,9	4,3	70,46	29,53
75	1,71	0,67	99,1	0,9	8,6	2,87	73,34	26,67
53	1,73	0,77	99,67	0,33	7,2	2,4	75,73	24,27
45	0,00	0	99,67	0,33	2,5	0,83	76,58	23,43
38	0,80	0,4	99,87	0,13	2,7	0,9	77,46	22,53
	0,40	0,59	100	0	67,6	22,53	100	0
Total	300	100	F80	1325	300	100	P80	647

Nota: Elaboración propia

4.3. Prueba de Hipótesis

Una prueba de hipótesis se adentra en dos ideas opuestas respecto a una población: la hipótesis nula y la hipótesis alternativa. La hipótesis nula es la afirmación que se someterá a evaluación, generalmente expresada como "no hay efecto" o "no hay diferencia". En contraste, la hipótesis alternativa representa la declaración que se aspira a confirmar como verdadera según la evidencia obtenida de los datos de la muestra. En esencia, la prueba de hipótesis se sumerge en la confrontación de estas dos proposiciones para determinar cuál tiene más respaldo empírico.

A) Hipótesis Nula

La optimización de parámetros del molino de bolas no influye significativamente la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024

B) Hipótesis Alterna

La optimización de parámetros del molino de bolas influye significativamente la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024

Tabla 21

Estadística Hipótesis general

Muestra	N°	Media	Desv.Est	Error Estándar de la media
Sin optimizar	17	111,7	168,0	40,8
Optimizado	17	108,8	166,7	40,4

Nota: Elaboración propia

Tabla 22

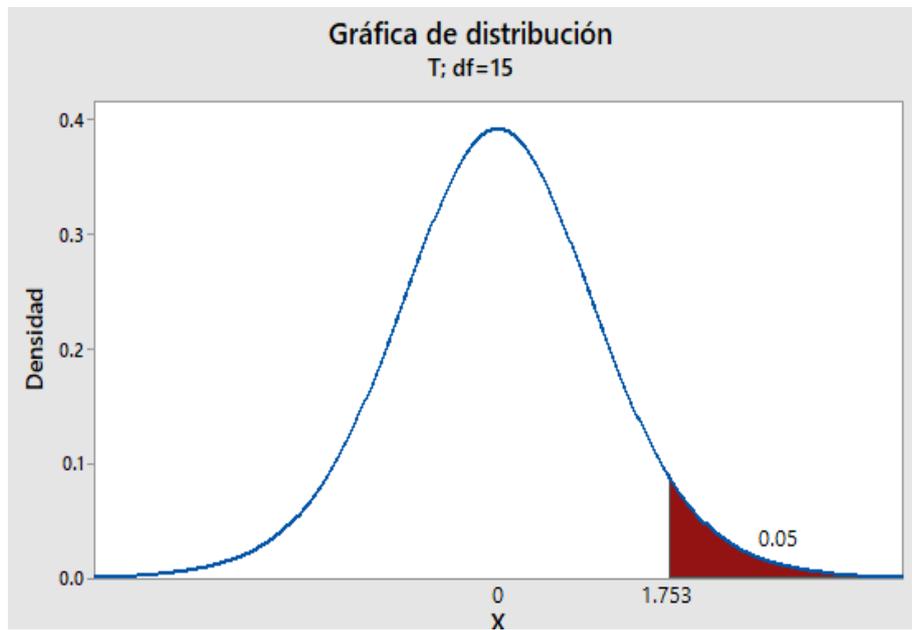
Prueba Nula-Alternativa - Hipótesis General

Hipótesis nula	H₀: diferencia = 0
Hipótesis alternativa	H₁: diferencia ≠ 0

Prueba	
Valor t	Valor p
2,40	0,029

Figura 10

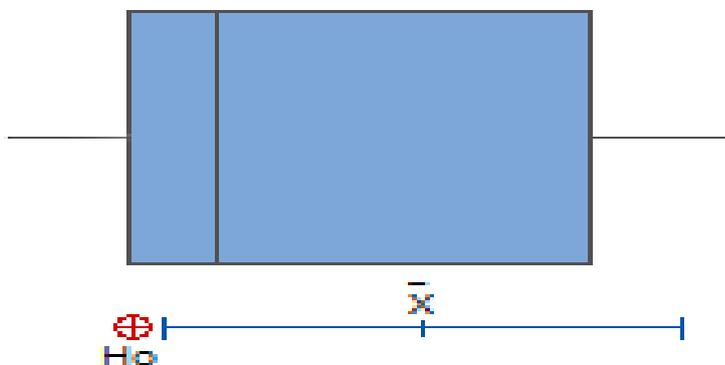
Gráfica de Distribución - Hipótesis



Nota: Elaboración propia

Figura 11

Gráfica de Caja - Hipótesis General



Nota: Elaboración propia

Valor de decisión

❖ **($P < \alpha$, Se rechaza la hipótesis nula)**

Del análisis de varianza tenemos: **$P=0,029$**

$P=0,029 < \alpha=0,05$

❖ **Decisión Final**

Se rechaza la hipótesis nula.

❖ **Conclusión**

Se concluye que hay una gran diferencia entre los datos de operación de un antes y después. Gracias a la optimización mediante la aplicación del software Molycop Tools en los molinos de bolas N° 3 y 5.

C) Hipótesis Nula

La optimización de parámetros del molino de bolas no favorece significativamente en la granulometría para la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024

D) Hipótesis Alternativa

La optimización de parámetros del molino de bolas favorece significativamente en la granulometría para la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024

Tabla 23

Estadística - Hipótesis Específico 1

Muestra	N°	Media	Desv.Est	Error Estándar de la media
Sin optimizar	12	40,77	27,52	7,95
Optimizado	12	37,52	29,48	8,51

Nota: Elaboración propia

Tabla 24

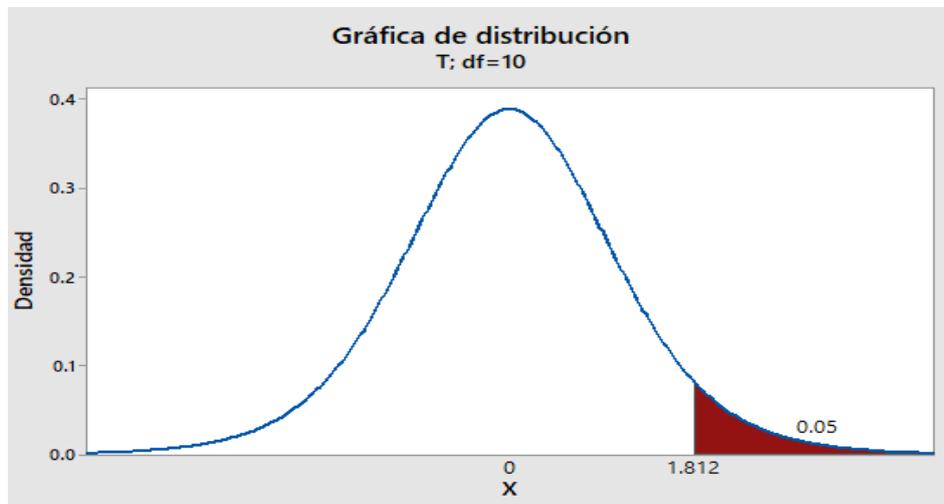
Prueba Nula - Alternativa - Hipótesis Específico 1

Hipótesis nula	H₀: diferencia = 0
Hipótesis alternativa	H₁: diferencia ≠ 0

Prueba	
Valor T	Valor p
3,42	0,006

Figura 12

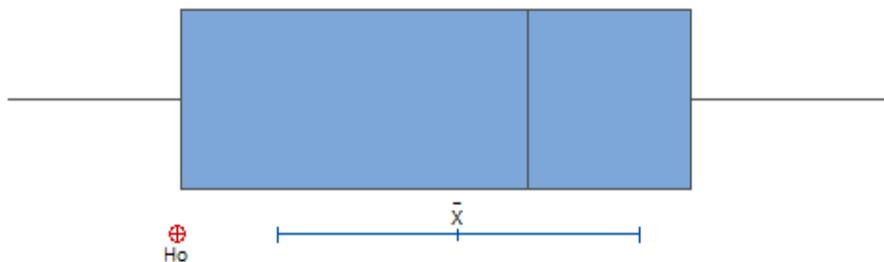
Gráfica de distribución-Hipótesis Específico 1



Nota: Elaboración propia

Figura 13

Gráfica de caja-Hipótesis Específico 1



Nota: Elaboración propia

Valor de decisión

❖ ($P < \alpha$, Se rechaza la hipótesis nula)

Del análisis de varianza tenemos: $P=0,006$

$P=0,006 < \alpha=0,05$

❖ **Decisión Final**

Se rechaza la hipótesis nula.

❖ **Conclusión**

Se concluye que mediante la optimización y aplicación del software Molycop Tools en los molinos de bolas N° 3 y 5; hay una gran diferencia entre los datos de la granulometría de un antes y después teniendo un p80 y f80 más optimo

A) Hipótesis Nula

La optimización de parámetros del molino de bolas no favorece significativamente en la carga de molienda para la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024

B) Hipótesis Alterna

La optimización de parámetros del molino de bolas favorece significativamente en la carga de molienda para la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024

Comparación de medias.

Tabla 25

Estadística -Hipótesis Específico 2

Muestra	N°	Media	Desv.Est	Error Estándar de la media
Sin optimizar	6	2,250	0,935	0,38
Optimizado	6	1,000	0,632	0,26

Nota: Elaboración propia

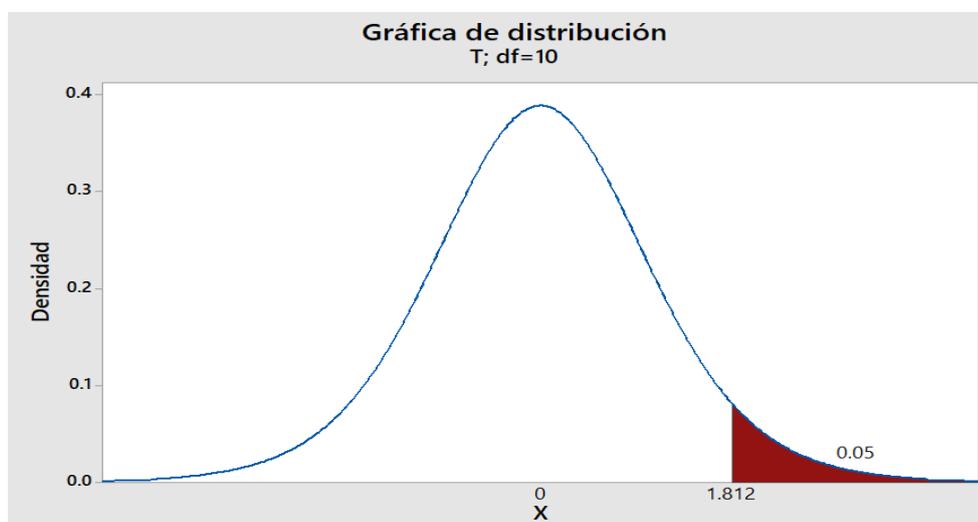
Prueba

- **Hipótesis nula** = $H_0: \mu_1 - \mu_2 = 0$
- **Hipótesis alterna** = $H_1: \mu_1 - \mu_2 \neq 0$

Valor T	GL	Valor P
2,71	8	0,027

Figura 14

Gráfica de distribución-Hipótesis Específica 2



Nota: Elaboración propia

Valor de decisión

❖ **($P < \alpha$, Se rechaza la hipótesis nula)**

Del análisis de varianza tenemos: **$P=0,027$**

$P=0,027 < \alpha=0,05$

❖ **Decisión Final**

Se rechaza la hipótesis nula.

❖ **Conclusión**

Los resultados presentados indican que la mejora de los parámetros del molino de bolas tiene un impacto sustancial en la carga de molienda para recuperar Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024.

Esto implica que los resultados estadísticos mostrados respaldan de manera contundente que optimizar los parámetros del molino de bolas

ejerce una influencia significativa en la carga de molienda, con un nivel de significancia del 0.05.

4.4. **Discusión de resultados**

Nuestros antecedentes recurren a resultados tales como:

❖ **(Gonzalo, 2019)**

Resultado: Mostraron que los parámetros tales como velocidad crítica, tamaño de bolas y volumen de carga están relacionados de manera directa con la producción del molino de bolas. Concluyendo que el análisis de la influencia de parámetros en los molinos de bolas llega a un 95% de eficiencia.

❖ **(Turpo, 2018)**

Resultado: Logró reducir significativamente el tiempo necesario para el enchaquetado de los revestimientos de los molinos convencionales gracias al uso de CAD. Además, se identificaron y abordaron los factores de riesgo latentes en cada mantenimiento de los molinos.

❖ **(Dueñas & Gonzales, 2016):**

Resultado: Logró minimizar los tiempos de producción de arcilla pulverizada en un 98.5% con respecto al proceso manual empleado, además duplicó la cantidad de material pulverizado, logrando así aumentar la realización de prácticas de caracterización de arcilla.

❖ **En la presente investigación**

Se tomó información operacional antes de evaluar y hacer cualquier cambio en los molinos N°3 y 5 las cuales sirvieron para construir nuevamente los parámetros en diferentes bases de datos.

Los datos de potencia, tonelaje, collar de bolas, nivel de carga, energía de impacto, velocidad crítica, etc fueron calculadas mediante el uso del software

metalúrgico Molycop Tools, aplicando diferentes modelos matemáticos bajo el campo metalúrgico.

- ❖ La eficacia de la molienda en un molino de bolas se puede optimizar con una carga óptima, pero una carga demasiado grande también requiere más energía para la labor operativa. Esto quiere decir que un exceso de carga en el molino aumenta el desgaste a las chaquetas y disminuye la eficiencia. Este hecho ha sido comprobado por un análisis granulométrico durante las labores.
- ❖ Si bien las bolas de acero de mayor tamaño tienen una probabilidad mayor de ser útiles en la molienda, también es crítico equilibrar este beneficio con el desgaste de las chaquetas, y demás costes involucrados. Ante estas circunstancias, se hizo un cambio en el tamaño de las bolas de acero: de 3/2 pulgadas a una combinación de bolas de 2 pulgadas y 1.5 pulgadas. Este ajuste se hizo con el fin de evitar el desgaste prematuro de las chaquetas en el molino 8'x10' causado por las bolas de mayor masa y energía de impacto y así evitar costos incensarios que perjudicaran a la empresa.
- ❖ Ajustar la velocidad del molino, el llenado de carga, el tamaño de bolas y otros factores interrelacionados de forma apropiada permitirá encontrar el punto ideal que maximice tanto la capacidad del molino como la calidad del proceso de molienda. El equilibrio en el que se tenga que mover la velocidad del molino, el llenado de carga, el tamaño de las bolas, y otros factores interrelacionados dependerá del punto de vista que se adopte. Este enfoque integral busca garantizar un rendimiento óptimo, considerando las complejas interacciones entre los distintos componentes del molino de bolas. Con estos parámetros muy bien ajustados, se obtendría un rendimiento óptimo de los molinos.

Por ende, se presentan las energías de impacto en forma gráficos en las cuales involucran los diferentes parámetros utilizados líneas arriba con el fin de saber cuánto es el efecto y la mejora que hace la simulación.

4.4.1. Balance metalúrgico.

Tabla 26

Balance Metalúrgico sin Optimizar Parámetros

Productos	Peso (TMSD)	Ensayes, %, * oz/tm, ** g/tm						Recuperación %					
		Ag*	%Pb	%Zn	%Fe	%Mn	Au**	Ag	Pb	Zn	Fe	Mn	Au
Cabeza	4568,60	1,20	1,63	1,38	1,86	0,37	0,71	100	100	100	100	100	100
Conc. Pb	90,57	33,20	45,50	6,38	2,53	0,18	18,71	78,29	81,44	13,49	3,97	1,42	76,88
Conc. Zn	79,39	2,49	4,58	51,01	2,75	0,71	2,88	4,23	5,73	75,38	3,01	3,91	8,27
Relave	4398,64	0,19	0,22	0,16	1,82	0,37	0,11	17,42	12,83	11,13	93,00	94,84	14,65
								100	100	100	100	100	100

Nota: Elaboración propia

Tabla 27

Balance Metalúrgico sin Optimizar Parámetros

Productos	Peso (TMSD)	Ensayes, %, * oz/tm, ** g/tm						Recuperación %					
		Ag*	%Pb	%Zn	%Fe	%Mn	Au**	Ag	Pb	Zn	Fe	Mn	Au
Cabeza	4568,60	1,25	1,51	1,34	2,71	0,39	0,62	100	100	100	100	100	100
Conc. Pb	90,57	36,99	46,10	5,09	5,63	0,41	15,91	79,23	82,54	10,27	5,62	2,84	69,3
													7
Conc. Zn	79,39	3,29	4,58	41,01	5,75	0,41	1,11	6,43	7,41	74,75	5,18	2,57	4,37
Relave	4398,64	0,18	0,16	0,21	2,55	0,39	0,17	14,42	10,05	14,98	89,25	94,66	26,3
													8
								100	100	100	100	100	100

Nota: Elaboración propia

Tabla 28*Balance Metalúrgico Optimizando Parámetros*

Productos	Peso (TMSD)	Ensayes, %, * oz/tm, ** g/tm						Recuperación %					
		Ag*	%Pb	%Zn	%Fe	%Mn	Au**	Ag	Pb	Zn	Fe	Mn	Au
Cabeza	4568,1	1,24	1,59	1,38	1,82	0,35	0,70	100	100	100	100	100	100
Conc. Pb	97,82	45,90	64,00	6,38	2,50	0,19	24,16	79,26	86,19	9,90	2,94	1,16	73,91
Conc. Zn	96,63	2,40	3,59	51,01	2,65	0,62	2,48	4,09	4,78	78,19	3,08	3,75	7,49
Relave	4373,65	0,22	0,15	0,17	1,78	0,35	0,14	16,99	9,03	11,91	93,64	95,53	19,07
								100	100	100	100	100	100

Nota: Elaboración propia

Tabla 29*Balance Metalúrgico Optimizando Parámetros*

Productos	Peso (TMSD)	Ensayes, %, * oz/tm, ** g/tm						Recuperación %					
		Ag*	%Pb	%Zn	%Fe	%Mn	Au**	Ag	Pb	Zn	Fe	Mn	Au
Cabeza	4568,60	1,26	1,46	1,20	2,94	0,35	0,65	100	100	100	100	100	100
Conc. Pb	90,57	49,75	60,92	5,37	3,78	0,13	23,06	80,73	85,64	9,16	2,63	0,75	72,34
Conc. Zn	79,39	3,63	2,69	51,11	5,63	0,61	1,62	5,17	3,31	76,44	3,44	3,13	4,46
Relave	4398,64	0,19	0,17	0,18	2,87	0,35	0,16	14,10	11,05	14,40	93,93	96,12	23,20
								100	100	100	100	100	100

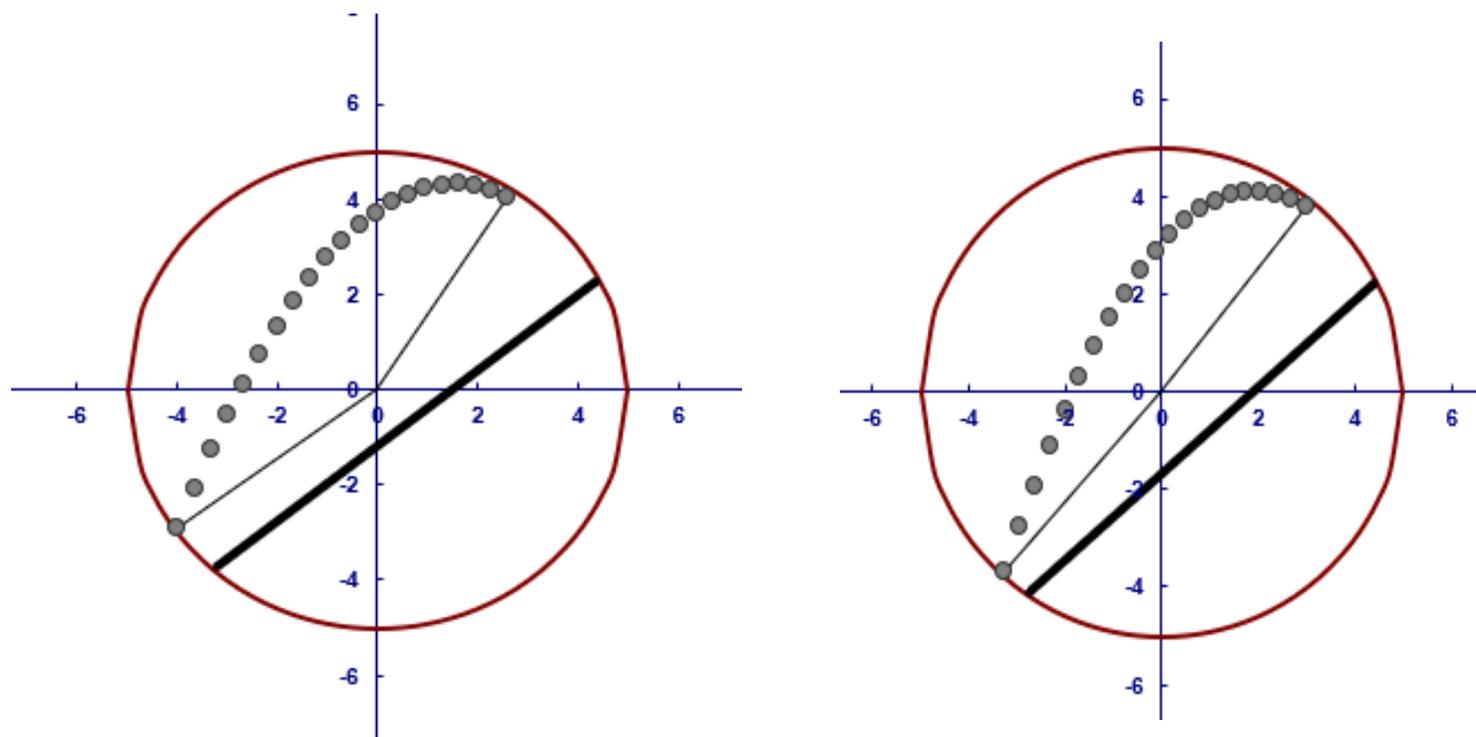
Nota: Elaboración propia

4.4.2. Gráficas de Energía de impacto.

A) Energía de impacto -antes de los cambios de parámetros -molino N°3 y 5

Figura 15

Energía de impacto Molino N°3 y 5 - Antes del cambio de parámetros

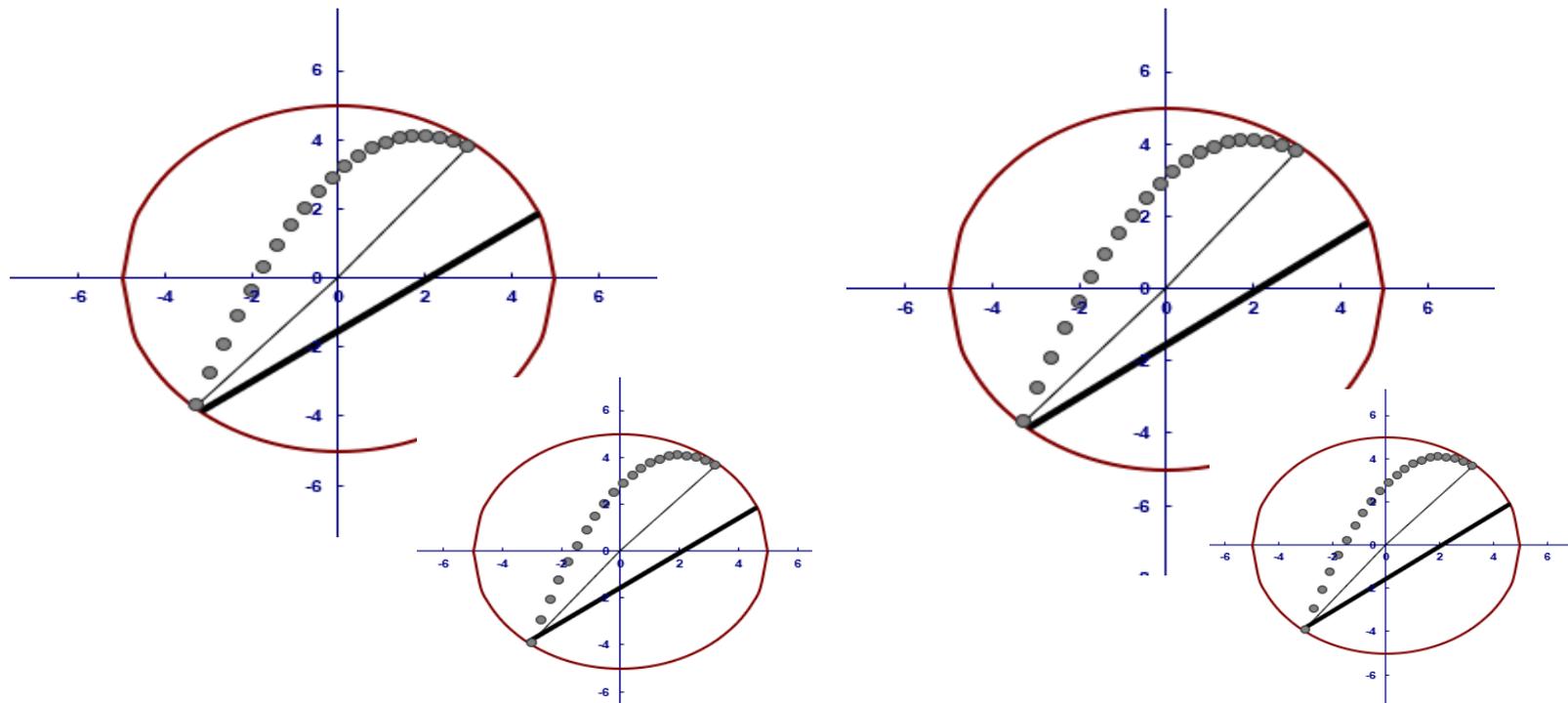


Nota: Elaboración propia

B) Energía de impacto -Después de los cambios de parámetros -molino N°3 y 5

Figura 16

Energía de impacto - Después de modificar los parámetros



Nota: Elaboración propia

CONCLUSIONES

- ❖ Se concluye que la optimización del molino de bolas en la planta concentradora Chicrin Atacocha ha arrojado resultados significativos. Los valores de P obtenidos **(0,029; 0,006; 0,027)** son todos menores que el nivel de significancia α establecido en **(0,05)**, lo cual proporciona una confianza del 95%. Por lo tanto, estos datos respaldan la idea de que los nuevos parámetros implementados en el molino tienen un impacto estadísticamente significativo en su operación.
- ❖ La potencia del molino N°3y5 es de (336,11; 340,39 Kw) y una velocidad crítica 72% esto quiere decir que, a mayores velocidades, generalmente se requiere más potencia para mantener una molienda más fina.
- ❖ La energía de impacto en los molinos N°3 y 5 es de (13,76; 13,75). Un aumento indica la cantidad de energía transferida durante el encuentro de las bolas con el material dentro del molino. Este incremento podría tener consecuencias significativas, ya que existe una alta probabilidad de que las bolas no alcancen el ángulo de reposo deseado e impacten en el revestimiento del molino $8^{\circ} \times 10^{\circ}$.

RECOMENDACIONES

- ❖ Se recomienda monitorear constantemente el rendimiento del molino. Al realizar cambios en el tonelaje o en otros parámetros deben ir acompañados de un análisis cuidadoso de cómo afectan la eficiencia y la calidad del producto final.
- ❖ Se recomienda realizar estudios detallados sobre el desgaste de los revestimientos del molino para comprender mejor cómo las variables operativas afectan la vida útil de los aceros.
- ❖ Se sugiere evaluar constantemente el tamaño de partícula del producto final mediante el análisis granulométrico y realizar ajustes en los parámetros en relación con los resultados que se obtiene.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alcántara, R. (2008). *Diseño de un MOLINO DE BOLAS*.
<https://www.yumpu.com/es/document/view/12942954/tesis-juan-ramon-alcantara-valladares-molino-de-bolaspdf>
- Dueñas, J., & Gonzales, V. (2016). Diseño y construcción de un molino de bolas para la pulverización de arcillas en el laboratorio de materiales u catálisis de la Universidad de Córdoba. *Ingeniería*, 154(3), 28.
<https://repositorio.unicordoba.edu.co/server/api/core/bitstreams/af1f6913-67fb-4c5a-aa6d-f76b66bf33e7/content>
- García, N. (2016). *Molinos de bolas para operaciones mineras*.
<https://docplayer.es/216304395-Vigilancia-tecnologica-y-analisis-de-trayectorias-tecnologicas-molinos-de-bolas-para-operaciones-mineras.html>
- Geologiaweb. (2023, June 24). *Propiedades y Características del Zinc*.
<https://geologiaweb.com/minerales/zinc/>
- Gonzalo, J. (2019). *Análisis de los parámetros del molino de bolas en la producción de la planta concentradora en Milpo*. 97.
<http://repositorio.uncp.edu.pe/handle/20.500.12894/5386>
- Lenntech 2. (n.d.). *Propiedades químicas del plomo*. Retrieved January 28, 2024, from
<https://www.lenntech.es/periodica/elementos/pb.htm>
- Metallurgist. (2021, April 26). *Molino de Bolas -Uso y Funcionamiento*.
<https://www.911metallurgist.com/metallurgia/molino-a-bolas/>
- Minero, P. (2020). *Manual General de Minería y Metalurgia*.
<https://www.portalminero.com/wp/producto/manual-general-de-mineria-y-metalurgia/>
- Nexa. (2023). *Ubicación-Atacocha*. <https://www.bnamericas.com/es/perfil->

empresa/compania-minera-atacocha-saa

- Rosales, G. (2020). Investigación experimental en el consumo de energía específica y reducción de tamaño en la molienda de bolas usando diferentes tipos de levitador. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 21(2), 1–8.
<https://doi.org/10.22201/FI.25940732E.2020.21N2.020>
- Tapia, J. (2020, November). *Teorías y Técnicas de Molienda*.
<https://www.studocu.com/pe/document/universidad-nacional-de-trujillo/6-flotacion-de-minerales/teorias-y-tecnicas-de-molienda/10368972>
- Tecnal. (2020, July 20). *Uso del molino de bolas*.
https://tecnal.com.br/es/blog/285_cuando_utilizar_un_molino_de_bolas
- Turpo, moises. (2018). *Diseño y simulación de manipulador para forros de acero aplicados en molinos convencionales*. <https://1library.co/document/q05v9xgy-diseno-simulacion-manipulador-forros-acero-aplicados-molinos-convencionales.html>

ANEXOS

Anexo C- Descripción de la planta concentradora.

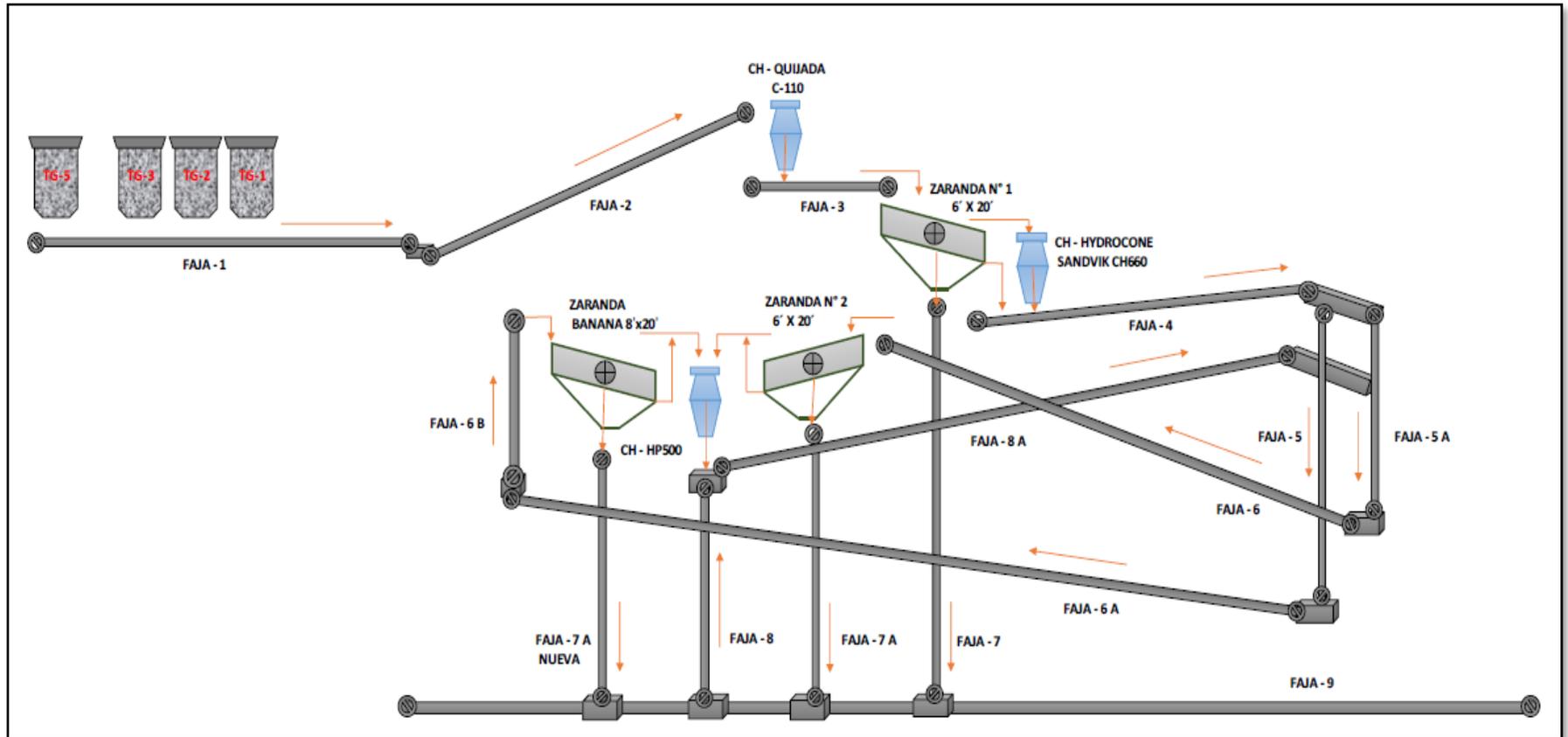
CIRCUITO DE CHANCADO

N°	Cant	Descripción
Tolvas de Gruesos		
1	1	Tolva de gruesos N°1 (1,600 TM)
2	1	Tolva de gruesos N°2 (1,900 TM)
3	1	Tolva de gruesos N°3 (800 TM)
4	1	Tolva de gruesos N°4 (700TM)
Fajas		
5	12	Fajas trasportadoras
Alimentadores		
6	2	Alimentador oruga Apronn Feeder COMESA 42"x12'
7	2	Alimentador oruga Apronn Feeder COMESA 60"16'
Chancadoras		
8	1	Chancadora primaria NORDERG C110B (1100 mm x850 mm)
9	1	Chancadora Secundaria Sandvik CH660: Produce un producto de 1½"
10	1	Chancadora terciaria (Hp-500)
Zarandas		
11	1	Zaranda N° 1 SIMPLICITY: 6' x 20' de dos pisos, con aberturas de mallas de 1-1/2" x 1-1/2" en el piso superior y 3/8" x 3/8" en el piso inferior
12	1	Zaranda Banana: 8' x 20' de dos pisos, con aberturas de mallas de 1½" x 1½" en el piso superior y 3/8" x 3/8" en el piso inferior
13	1	Zaranda N° 2 SIMPLICITY: 6' x 20' de dos pisos, con aberturas de mallas de 1½" x 1½" en el piso superior y 3/8" x 3/8" en el piso inferior
Tolvas de Finos		
14	6	Tolvas de (400 TM)

Nota: Elaborado por la Unidad Minera Atacocha

Figura 17

Circuito de chancado



Nota: Elaborado por la Unidad Minera Atacocha

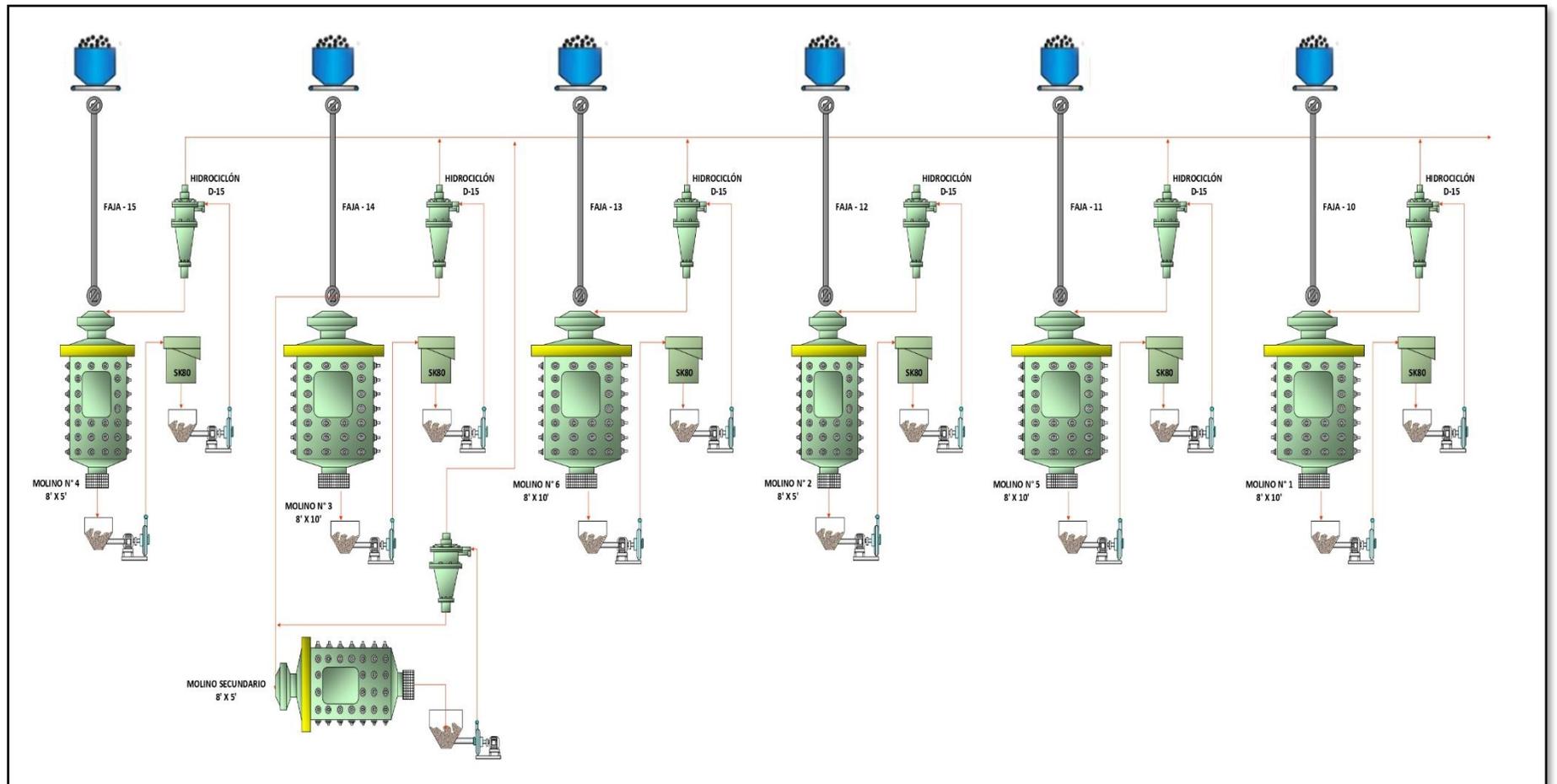
Tabla 30*Circuito de Molienda*

CIRCUITO DE MOLIENDA		
N°	Cant	Descripción
Tolva		
1	6	Tolvas de fino (400 TM) – (N°1,2,3,4,5,6)
Molinos		
2	4	Molinos primarios COMESA de 8' x 10'
3	2	Molinos Cónicos HARDINGE de 8' x 5'
4	1	Molino secundario HARDINGE DE 8' x 5'
Celdas		
5	6	Celdas Flash SK80
Hidrociclones		
6	6	Hidrociclones Krebs D-15"
7	1	Hidrociclón Krebs D-20"
Bombas		
8	12	Bombas ASH -Hidrociclón D-15
9	1	Bomba ASH - Hidrociclón D-20
Fajas		
10	1	Faja transportadora-Molino primario N°1
11	1	Faja transportadora-Molino primario N°2
12	1	Faja transportadora-Molino primario N°3
13	1	Faja transportadora-Molino primario N°4
14	1	Faja transportadora-Molino primario N°5
15	1	Faja transportadora-Molino primario N°6

Nota: Elaborado por la Unidad Minera Atacocha

Figura 18

Circuito de Molienda



Nota: Elaborado por la Unidad Minera Atacocha

Tabla 31

Circuito de flotación de Pb

CIRCUITO DE FLOTACIÓN DE PB

N°	Cant	Descripción
1	1	Super acondicionador-Dimesiones 10'x12'
2	6	Celdas Flash SK-80
3	1	Celda de flotación OK-3 de limpieza
4	2	Celda OK-30
5	1	Espesador de Plomo
6	1	Celda RCS-30
7	2	Bombas HR-250
8	6	Bancos OK-8 Scavenger
9	3	Bomba Vertical 3 ^{1/2}
10	1	Celda OK-20
11	1	Celda OK-8 (junto a la a celda de limpieza OK-3)
12	1	Celda OK-16 Scavenger
13	5	Bancos OK-8(Santa Barbara)
14	2	Bomba Vertical 2 ^{1/2}
15	2	Celda OK-30 (recibir espumas de la celda OK-8 Scavenger)
16	1	Bomba 5"x4"
17	1	Courier

Nota: Elaborado por la Unidad Minera Atacocha

Tabla 32

Circuito de flotación de Zn

Circuito de Flotación de Zn

N°	Cant	Descripción
1	1	Super agitadores 16'x16'
2	1	Celda OK-100
3	1	Celda OK-50 Ro
4	1	Celda RCS-30
5	3	Celda OK-16
6	4	Celda OK-16 (Scavenger)
7	1	Celda OK-50
8	1	Celda OK-50 (Limpieza)
9	10	Celda OK-3 (2da Limpieza)
10	1	Espesador de Zn
11	5	Bomba vertical
13	2	Bomba HR-250
14	1	Bomba sala
15	1	Bomba Horizontal

Nota: Elaborado por la Unidad Minera Atacocha

Anexo D– Fotos – Planta concentradora Atacocha

Figura 21

Planta concentradora Chicrin-Atacocha









Anexo B. Matriz de Consistencia

“Optimización de parámetros del molino de bolas para la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha - Pasco – 2024”

PROBLEMAS	OBJETIVOS	HIPOTESIS	VARIABLE	METODOLOGIA
<p>PROBLEMA GENERAL</p> <p>¿De qué manera influye la optimización de parámetros del molino de bolas en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024?</p> <p>PROBLEMA ESPECÍFICOS</p> <p>¿De qué manera influye la granulometría en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024?</p> <p>¿De qué manera influye la carga de molienda en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024?</p>	<p>OBJETIVO GENERAL</p> <p>Determinar la influencia de la optimización de parámetros del molino de bolas en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha – Pasco – 2024</p> <p>OBJETIVO ESPECÍFICOS</p> <ul style="list-style-type: none"> - Determinar la influencia de la granulometría en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha – Pasco – 2024 - Determinar la influencia de la carga de molienda en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin – Unidad Minera Atacocha – Pasco – 2024 	<p>HIPÓTESIS GENERAL</p> <p>La optimización de parámetros del molino de bolas influye significativamente en la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024</p> <p>HIPÓTESIS ESPECÍFICOS:</p> <ul style="list-style-type: none"> - La optimización de parámetros del molino de bolas influye significativamente en la granulometría para la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024 - La optimización de parámetros del molino de bolas influye significativamente en la carga de molienda para la recuperación de Pb-Zn en la Planta Concentradora Chicrin–Unidad Minera Atacocha–Pasco–2024 	<p>VARIABLES INDEPENDIENTES:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Optimización de parámetros del molino de bolas <p>VARIABLES DEPENDIENTES:</p> <ul style="list-style-type: none"> - Recuperación de Pb-Zn 	<p>TIPO:</p> <p align="center">Aplicada</p> <p>MÉTODO:</p> <p align="center">Hipotético-deductivo</p> <p>DISEÑO:</p> <p align="center">Pre experimental</p> <p align="center">GE: 01 x 02</p> <p>Donde:</p> <p>G.E. Grupo experimental</p> <p>01: Pre test</p> <p>02: Post Test</p> <p>X: Manipulación de variable independiente</p>
			<p align="center">Bach. DAVIRAN PANEZ, Franco Denis Bach. VALLADOLID LAURA, Sarita Lourdes</p>	