

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

**EVALUACIÓN DEL NIVEL DE CARGA DE BOLAS
PARA PUESTA EN MARCHA DEL MOLINO
FULLER EN PLANTA CONCENTRADORA
DE COBRE**

**TRABAJO DE SUFICIENCIA
PROFESIONAL**

Presentado por:

Bach. Fabrizio Paul Pinto Siña

Para optar el Título Profesional de:

INGENIERO METALURGISTA

TACNA – PERÚ

2024

UNIVERSIDAD NACIONAL JORGE BASADRE GROHMANN

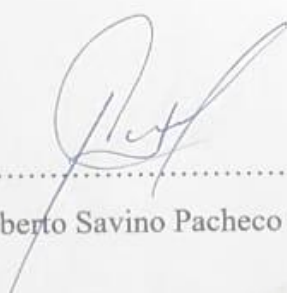
Facultad de Ingeniería

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica y Materiales

EVALUACIÓN DEL NIVEL DE CARGA DE BOLAS PARA PUESTA EN MARCHA DEL MOLINO FULLER EN PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE

Tesis presentado y aprobado el día 05 de julio del 2024, estando integrado el Jurado Calificador por:

PRESIDENTE:


Dr. Alberto Savino Pacheco Pacheco

SECRETARIO:


MSc. Daniel Jesús Zevallos Ramos

VOCAL:


Dr. MSc. Matías Carlos Vivar Colquicocha

ASESOR:


MSc. Edgardo Teófilo Valdez Cortijo



CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo **Edgardo Teófilo Valdez Cortijo**, en mi condición de asesor acreditada por Resolución de Facultad N° 8721-2024 -FAIN/UNJBG del **TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL** titulado: **EVALUACIÓN DEL NIVEL DE CARGA DE BOLAS PARA PUESTA EN MARCHA DEL MOLINO FULLER EN PLANTA CONCENTRADORA DE COBRE**, presentado por el bachiller **FABRIZIO PAUL PINTO SIÑA** para optar el **Título de Ingeniero Metalurgista**, habiendo cumplido con lo establecido en el reglamento de originalidad y similitud de trabajos de investigación y producción intelectual, considerando que según la revisión, evaluación y análisis realizada a través del software de similitud textual TURNITIN cuenta con el nivel de similitud que es permitido cuyo porcentaje es de 7 %. Por lo que, **CERTIFICO LA SIMILARIDAD** de la tesis enunciado líneas arriba, la cual esta expedita para continuar con los trámites para la obtención de **TITULO PROFESIONAL**, según corresponda consiguientemente la publicación en el repositorio institucional.

Firmo el presente certificado con fines de continuar con los trámites respectivos para su publicación.

Firma del Asesor

DNI: 17806674

Msc. Edgardo Teófilo Valdez Cortijo



Huella dactilar

Firma del Titulante

DNI: 73362583

Fabricio Paul Pinto Siña



Huella dactilar

DEDICATORIA

El presente trabajo está dedicado a mis padres Consuelo y Franco, que con su amor y apoyo incondicional me empujaron hacia el camino de bien y me motivaron a seguir adelante a pesar de las adversidades.

A mi abuela Paulina y mi hermana Rafaella, que con su ejemplo me han enseñado a ser resiliente frente a las dificultades que he podido encontrar en el camino, así mismo por sus consejos que me han ayudado a tomar decisiones óptimas durante mi formación académica.

AGRADECIMIENTO

Mis sinceros agradecimientos a mi alma mater, la Universidad Nacional Jorge Basadre Grohmann y a la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica, que durante mi formación académica he podido conocer docentes de alta trayectoria que me ayudaron a crecer personal y profesionalmente.

A Dios, por brindarme la oportunidad de tener salud y vitalidad en cada fase de mi existencia, y por enseñarme que lo más valioso es el vínculo familiar.

Agradezco a mi familia, por dedicarse a proporcionarme una educación de calidad y por siempre brindarme su apoyo incondicional.

CONTENIDO

CERTIFICADO DE SIMILITUD	iii
DEDICATORIA	iv
AGRADECIMIENTO	v
CONTENIDO	vi
ÍNDICE DE TABLAS	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	x
RESUMEN	xi
ABSTRACT	xii
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO I	2
ASPECTOS GENERALES	2
1.1. Descripción del tema (Problema)	2
1.1.1. Antecedente del problema	2
1.1.2. Problemática de la investigación	3
1.1.3. Formulación del problema	4
1.2. Justificación	5
1.2.1. Justificación técnica	5
1.2.2. Justificación económica	5
1.2.3. Justificación práctica	6
1.2.4. Justificación metodológica	6

1.3.	Objetivos	6
1.3.1.	Objetivos generales	6
1.3.2.	Objetivos específicos	7
CAPÍTULO II: MARCO TEÓRICO		8
2.1.	Antecedentes del estudio	8
2.1.1.	Internacionales	8
2.1.2.	Nacionales	9
2.1.3.	Locales	10
2.2.	Bases teóricas	11
2.2.1.	Molienda	11
2.2.2.	Factores importantes en el proceso de molienda	12
2.2.3.	Tamaño característico de los minerales	14
2.2.4.	Molinos	15
2.2.5.	Molino de bolas	19
2.2.6.	Operación de Molino de Bolas	20
2.2.7.	Nivel de Bolas en el Molino Fuller	22
2.2.8.	Consumo específico de energía	22
CAPÍTULO III FUNDAMENTO METODOLÓGICO		24
3.1.	Tipo y diseño de la investigación	24
3.2.	Población y muestra	25
3.3.	Operacionalización de variables	27

3.1.1. Variable dependiente	27
3.1.2. Variables independientes	27
3.4. Equipos y materiales	28
3.5. Técnicas e instrumentos para recolección de datos	29
3.6. Procesamiento y análisis de datos	29
RESULTADOS	30
Estimación del índice de abrasividad	30
Contrastación del consumo de bolas	32
CONCLUSIONES	34
RECOMENDACIONES	35
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Proceso de fragmentación	11
Tabla 2. Cálculo de tamaño de muestra	26
Tabla 3. Operacionalización de variables	28
Tabla 4. Valor del nuevo índice de abrasión	32

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Mecanismo de reducción de tamaño	14
Figura 2. Cuerpos Molturantes que emplea un molino	16
Figura 3. Molino de barras	17
Figura 4. Molino de bolas	18
Figura 5. Molino SAG	19
Figura 6. Perfil de carga en el molino de bolas	20
Figura 7. Vista interior de molino de bolas	21
Figura 8. Recalculo del índice de abrasión	30
Figura 9. Valor del nuevo índice de abrasión	31

RESUMEN

El presente trabajo informe titulado: Evaluación del nivel de carga de bolas para puestaben marcha del molino Fuller en planta concentradora de cobre, tiene como propósito, evaluar el rendimiento operativo después de la puesta en operación del molino Fuller con el nivel de bolas calculado. Así mismo, analizar el impacto del nivel de bolas calculado sobre las variables relacionadas al rendimiento operativo del molino y contrastar los principales métodos para calcular el nivel de bolas de trabajo con un procedimiento desarrollado en el laboratorio metalúrgico de la empresa.

Su metodología de esta investigación para el desarrollo del proyecto, fue de enfoque cuantitativo, tipo aplicada, no experimental longitudinal. En cuanto al instrumento la recopilación de datos, el sistema automático de almacenamiento de datos en línea permite generar y guardar adecuadamente los datos en los servidores designados para tal fin, estos datos permiten controlar en todo momento los principales parámetros operativos del molino Fuller; esta base datos representa la materia prima para el presente estudio. En cuanto a los resultados de este trabajo informe se demostró que existe un nivel de carga ideal para poner en marcha un molino Fuller. Se concluyó que la evaluación del nivel de carga de bolas influyo significativamente en la puesta en marcha del molino Fuller en la planta concentradora de cobre.

Palabras clave: carga de bolas, operación de molino, cobre.

ABSTRACT

The present research report titled "Evaluation of ball charge level for the start-up of the Fuller mill in a copper concentrator plant" aims to assess the operational performance following the initiation of the Fuller mill with the calculated ball level. Additionally, it seeks to analyze the impact of the calculated ball level on variables associated with the mill's operational performance and to compare the primary methods for calculating the working ball level with a procedure developed in the company's metallurgical laboratory.

The methodology employed in this investigation for project development was quantitative in nature, applied type, and non-experimental longitudinal. Regarding data collection instruments, the automatic online data storage system enables the generation and proper storage of data on servers designated for this purpose. These data facilitate the continuous monitoring of the Fuller mill's principal operational parameters; this database serves as the raw material for the present study. Regarding the findings of this research report, it was demonstrated that there exists an ideal load level for initiating a Fuller mill.

It was concluded that the assessment of the ball charge level significantly influenced the initiation of the Fuller mill in the copper concentrator plant.

Keywords: ball charge, mill operation, copper.

INTRODUCCIÓN

Los molinos de bolas Fuller desempeñan un papel esencial en la industria minera al facilitar la reducción del tamaño de minerales, proceso fundamental para su posterior tratamiento. Este informe aborda su importancia tanto a nivel internacional como nacional, resaltando su relevancia histórica desde su invención por Charles Fuller en 1884. A lo largo de los años, estos equipos han sido objeto de constantes investigaciones y mejoras, especialmente en lo que respecta a su mantenimiento y la eficiencia del proceso de molienda, mediante innovaciones como la implementación de levantadores.

En este contexto, se exploran conceptos clave del proceso de molienda, como la velocidad crítica y los factores que influyen en su eficiencia, así como los diferentes tipos de molinos utilizados en la industria minera. Se destacan los mecanismos físicos de la conminución y se analizan los parámetros fundamentales en la operación de los molinos, como el nivel de carga de bolas y el consumo específico de energía.

CAPÍTULO I

ASPECTOS GENERALES

1.1. Descripción del tema (Problema)

1.1.1. Antecedente del problema

En el año 2020, la empresa Southern Perú anunció la ampliación de su planta de concentrado de cobre. Esta inversión se dio en un período de 4 años y previó un costo de \$ 600 millones, lo cual permitió ampliar el procesamiento de mineral de 85 a 120 mil toneladas de concentrado diario (El Comercio, 2020). En ese contexto, uno de los principales equipos que da soporte el proceso de molienda y que permite el cumplimiento de esta ampliación, es el molino de bolas de la marca Fuller, este equipo está diseñado para la reducción de tamaño de los minerales hasta una granulometría de 0,18 milímetros.

El proceso de molienda en minería, se encarga de la reducción de tamaño de los minerales que contienen cobre. El objetivo es aumentar la superficie de contacto del mineral reducido y los reactivos, lo que permite una separación eficiente de los metales valiosos de los estériles en los siguientes procesos. Las consecuencias de un proceso molienda ineficiente es el aumento de la carga del porcentaje del mineral fresco abastecido al molino, que es devuelto para ser remolido. Entre las principales causas se encuentran no considerar las 2 características físicas del tipo de mineral a tratar, la velocidad de rotación del molino, el nivel de bolas que contiene el

molino, la cantidad de agua a utilizar, el tamaño inicial de los minerales al ingreso del molino, lo que desencadena en un alto costo energético, menor tiempo de vida de los componentes de molinos en general, aumento del costo de operación y reducción de la recuperación de los minerales valiosos (Arias & Villacrés, 2020).

Por lo expuesto, el establecimiento y seguimiento de los parámetros de funcionamiento en relación al nivel de la carga moledora resulta indispensable para su correcto funcionamiento.

1.1.2. Problemática de la investigación

(Gonzalo, 2019) menciona que la molienda de los minerales es un proceso crítico en la minería y permite la reducción del tamaño de los minerales, para una obtención eficiente de cobre en los procesos posteriores. Encontrar un nivel óptimo del nivel de bolas en los molinos, es necesario debido a que un nivel bajo de bolas provoca que estas se atasquen y un nivel alto provoca que las bolas no tengan suficiente espacio para moverse, reduciendo su eficiencia en ambos casos. El nivel bolas también depende del tamaño de éstas. Las bolas más grandes requieren menor nivel y unas de menor tamaño mayor nivel. En general, el rango del nivel de bolas varía entre un 25% a 40% del volumen del molino. Sin embargo, es necesario realizar ajustes específicos, para una mayor eficiencia, de acuerdo con el proceso de molienda de la empresa en estudio, ya que un cálculo erróneo del nivel de bolas conlleva a los siguientes problemas:

- Aumento del desgaste del molino: un nivel alto o bajo del nivel de bolas provoca el acortamiento del ciclo de vida del molino por la mayor abrasión de las chaquetas o forros del molino y desgaste de las bolas.
- Aumento de los costos operativos: un nivel alto o bajo del nivel de bolas provoca un mayor consumo energético, ya que se tiene que reprocesar el tamaño de los minerales, mayores horas de trabajo por manteamientos no planificados, paradas de planta por problemas en los molinos, entre otros.
- Disminución de la producción: el cálculo erróneo del nivel de bolas provoca la obtención de mineral con el tamaño no esperado y por lo tanto aumentará el porcentaje del mineral fresco abastecido al molino que es devuelto para ser remolido (carga circulante) y menor obtención de cobre en los procesos finales.

Por lo expuesto, el presente estudio busca corroborar que el nivel de bolas calculado en la puesta a marcha de un molino nuevo tipo Fuller en una empresa minera sea el más adecuado para garantizar un rendimiento óptimo a través del análisis y contrastación de datos operativos de planta durante un periodo de tiempo establecido, buscando de esta forma prolongar la vida útil del equipo garantizando al mismo tiempo la producción.

1.1.3. Formulación del problema

Las plantas concentradoras requieren encontrar un valor apropiado en el

nivel de bolas en el proceso de molienda, ya que un nivel bajo de éstas provoca que se atasquen y un nivel alto de bolas provoca que no se tenga el suficiente espacio para moverse resultando en un tamaño de mineral no requerido.

1.2. Justificación

1.2.1. Justificación técnica

Los molinos Fuller son equipos claves en la industria minera, ya que permite reducir el tamaño de los minerales hasta una granulometría de 0,18 milímetros. Esto permite separar el cobre de otras sustancias y obtener un mineral con mayor pureza. Además, es necesario encontrar un nivel de bolas correcto en el molino, ya que un nivel bajo provoca una sobrecarga del molino, lo que causa daños al equipo y reduce su vida útil y un nivel alto de bolas provoca una disminución de la capacidad de molienda y a un aumento de la energía por los reprocesos (Maquera, 2016).

1.2.2. Justificación económica

Un nivel de bolas óptimo en el molino Fuller puede aportar beneficios redituables a la empresa minera, ya que permite mejorar la eficiencia y el rendimiento del molino, generando ahorros económicos debido a la disminución de la carga circulante, aumento de la producción, disminución del consumo de energía eléctrica, disminución del desgaste del equipo y, por lo tanto, alargue de la vida útil del molino, entre otros (Delgado, 2019).

1.2.3. Justificación práctica

El estudio realizado respecto al nivel de bolas adecuado, en el molino Fuller, permitirá a los operadores del molino controlar los niveles de bolas de forma precisa y práctica, mejorando la eficiencia del proceso de molienda al procesar de manera óptima la reducción de tamaño del mineral, además de reducir el tiempo empleado y mano de obra al realizar mediciones de los niveles de bolas en el molino (Arias & Villacrés, 2020).

1.2.4. Justificación metodológica

El presente estudio tiene un carácter cuantitativo basado en datos de los registros operacionales iniciales del nuevo molino Fuller, momento en el cual se estableció parámetros operativos como el porcentaje de malla +65, la carga circulante, potencia de trabajo, nivel de bolas necesario, entre otros. La recolección de los registros se dio en un periodo de 5 meses y para el análisis de datos se utilizó métodos estadísticos, puesto que no es posible la manipulación de las variables involucradas, la investigación es clasificada como cuantitativa no experimental longitudinal.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivos generales

- Evaluar el rendimiento operativo después de la puesta en operación del molino Fuller con el nivel de bolas calculado.

1.3.2. Objetivos específicos

- Analizar el impacto del nivel de bolas calculado sobre las variables relacionadas al rendimiento operativo del molino.
- Contrastar los principales métodos para calcular el nivel de bolas de trabajo con un procedimiento desarrollado en el laboratorio metalúrgico de la empresa.

CAPÍTULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. Antecedentes del estudio

2.1.1. Internacionales

El molino de bolas Fuller fue inventado por el ingeniero americano Charles Fuller, en 1884, en la mina donde laboraba Fuller & Jones Mining Machinery Company. Este inventó se empleó para reducir el tamaño del mineral y estaba compuesto por bolas de acero en un cilindro de acero lleno del mineral. Donde el impacto y la abrasión de las bolas de acero reducían el tamaño del mineral. Esta máquina tiene más de 100 años y se considera un equipo fiable y eficiente para la industria minera (Colvin, 2016).

Existen estudios respecto a los molinos de bolas que buscan detectar anomalías en esta clase de máquinas como el estudio realizado en la Universidad Católica de Valparaíso donde en la minera Cerro Negro tenía, de forma recurrente, paradas de planta por falta de un plan de mantenimiento preventivo y/o correctivo de molinos de bolas Fuller y por lo tanto pérdidas económicas. En el estudio, el autor propone una serie de pasos para alargar el ciclo de vida de los molinos con mantenimientos de planta recurrentes (Zamora, 2018).

Por otro lado, las investigaciones respecto a cómo mejorar la cantidad de finos y uso menor de energía, en el proceso de molienda en dichas máquinas de bolas, por medio de la implementación de levantadores, que son piezas de acero

incrustadas en las paredes del molino, permitieron producir una mayor cantidad de finos (32%) y un consumo de energía bajo de 9,69 KWh/t (Rosales et al., 2020).

2.1.2. Nacionales

En el Perú, el molino de bolas Fuller es un equipo empleado en la industria minera para reducir el tamaño de los minerales para su posterior tratamiento y es utilizado en las empresas mineras más importantes del país para la obtención de oro, cobre, plata y otros. Tal es el caso de la minera Anglo American, en Quellaveco, donde cuenta con dos molinos de bolas, para la obtención de cobre y donde el mineral es reducido de 2 a 3 milímetros a partículas de 160 micras en promedio, el cual cuenta un sistema de electroimanes que reduce el desgaste del molino (AngloAmerican, 2022).

En uso de este tipo de molinos de bolas se ha incrementado en la minería del cobre peruano en mineras como Las Bambas, Toquepala, Antamina, entre otras, ya que la alta demanda de este metal por parte de EE.UU y China permitió un auge en inversión minera por más de 9,6 mil millones de USD, para el 2022, y se espera un inversión de más de 52 mil millones de USD en los próximos años (BBVA, 2023). Sin embargo, en uso de estas máquinas para reducir el tamaño del mineral de cobre debe estar en constante monitoreo por los problemas que puede causar en la producción del cobre. Tal es el caso de una mina de cobre en Ancash donde las fallas mecánicas del molino debido a un nivel de bolas inadecuado, desalineamiento de eje y desgastes por efecto de las abrasiones redujeron la disponibilidad del molino,

repercutiendo en los procesos productivos de la minera (Roque, 2021).

2.1.3. Locales

En la región sur del Perú, se encuentran distintas investigaciones referentes a la optimización de los procesos de molienda. Tal es la investigación en la empresa Century Mining Perú, donde muestra una mejora de procesos de molienda, en base a estudios de parámetros granulométricos más significativos que provocaban incidencias y en base a estas anomalías se realiza optimizaciones en el circuito del proceso a través de cálculos de procesamiento de la planta, logrando una recuperación de oro en flotación de 93%, anteriormente era de 87,32% (Almiron, 2018).

Por otro lado, las investigaciones sobre las comparaciones entre distintos molinos para molienda se dan en su mayoría por los revestimientos de acero que poseen. Los estudios sobre la confiabilidad de los molinos SAG y de bolas convencionales mostraron que los revestimientos de los molinos SAG son más confiables que los de los molinos de bolas convencionales. Esto se debe a que los molinos SAG utilizan una carga moledora compuesta por rocas de mineral y bolas de acero, mientras que los molinos de bolas convencionales solo utilizan bolas de acero. Las rocas de mineral ayudan a proteger los revestimientos del impacto de las bolas de acero, lo que reduce el desgaste. El estudio también mostró que la confiabilidad de los revestimientos de los molinos SAG se puede mejorar aún más mediante modificaciones en el diseño de los molinos (Ccahuana, 2018).

2.2. Bases teóricas

2.2.1. Molienda

Blanco (2021) menciona que molienda es el último proceso de fragmentación para la reducción de minerales. Estos provienen del proceso de triturado y son procesados hasta obtener un menor tamaño, en milímetros o micrómetros, para los procesos a posteriori, ya que facilita la obtención especies mineralógicas deseadas. Estos fragmentos son reducidos hasta una granulometría de 0,18 milímetros por una acción combinada de abrasión e impacto. Para este fin, son utilizados equipos de molino que trabajan en seco o húmedo, Estas maquinarias, que en su mayoría son recipientes hechos de acero de forma cilíndrica, rotan alrededor de un eje y poseen dentro cuerpos rodantes que pueden ser bolas, cilindros o barras de diámetros establecidos y dependiendo del grado de dureza de los minerales se pueden emplear bolas de cerámica o de acero (Rosales et al., 2020).

Segovia et al. (2016) menciona que Molienda es el proceso por el cual los minerales extraídos son reducidos a un tamaño mínimo, adecuado para el proceso de extracción, después de pasar por el proceso de chancado. Esta reducción de tamaño se realiza por equipos llamados molinos de minerales.

Tabla 1

Proceso de fragmentación

Proceso	Etapas	Escalón	Humedad	Tipo de equipo
Fragmentación	Trituración	Primaria		

(reducción de minerales a tamaños menores)	(tamaños gruesos) Molienda (tamaños finos)	Secundaria Terciaria Mediana, fina y ultra fina	Seco o húmedo Seco o húmedo	Trituradoras Molinos
---	--	--	--------------------------------------	---------------------------------

Nota. Resumen del Proceso de fragmentación

2.2.2. Factores importantes en el proceso de molienda

Para analizar el proceso de molienda, existen elementos físicos y/o mecánicos a considerar que influyen en el procesamiento de los materiales (Blanco, 2021):

- Velocidad crítica
- Relaciones entre los elementos variables del molino
- Tamaño máximo de los elementos moledores
- Volumen de carga
- Potencia
- Tipos de molienda seca o húmeda

2.2.2.1. Velocidad crítica

Es aquella velocidad donde los elementos moledores (bolas o barras) se adhieren a las paredes del molino. Esto se debe a que la fuerza centrífuga del sistema, que actúa sobre estos elementos, encuentra un punto de equilibrio con los pesos de los elementos y se adhieren a las paredes internas del molino. Esto provoca una disminución en la producción de la maquinaria, ya que reduce la abrasión o

impacto de las bolas con los minerales y se pierde la capacidad de moler (Jackson S., 2004).

$$n(rpm) = \frac{42,3}{\sqrt{D}} \quad (1)$$

- n (rpm): es la velocidad crítica del molino en revoluciones por minuto.
- D : es el diámetro del molino.

2.2.2.2. Relaciones entre los elementos variables

Los diámetros de los elementos moledores, del molino y la velocidad de giro son variables críticas del proceso. Para lo cual se resumen sus relaciones, ya que influyen en la eficiencia del proceso de molienda.

2.2.2.3. Conminución de minerales

La conminución es el proceso por el cual los minerales o rocas son reducidas de tamaño. Es empleado en varias industrias, como minera, construcción, farmacéutica, entre otros. El tamaño de las partículas es importante, ya que facilita la eficiencia del proceso y mejor obtención del producto final. Esta reducción se lleva a cabo en los procesos de Chancado y Molienda (Segovia et al., 2016), que incluyen:

- La extracción de los minerales valiosos. Estas partículas reducidas presentan una superficie de contacto más grande con los reactivos disueltos, lo que facilita la extracción de los minerales valiosos.
- Facilita el transporte y el almacenamiento, ya que partículas pequeñas son

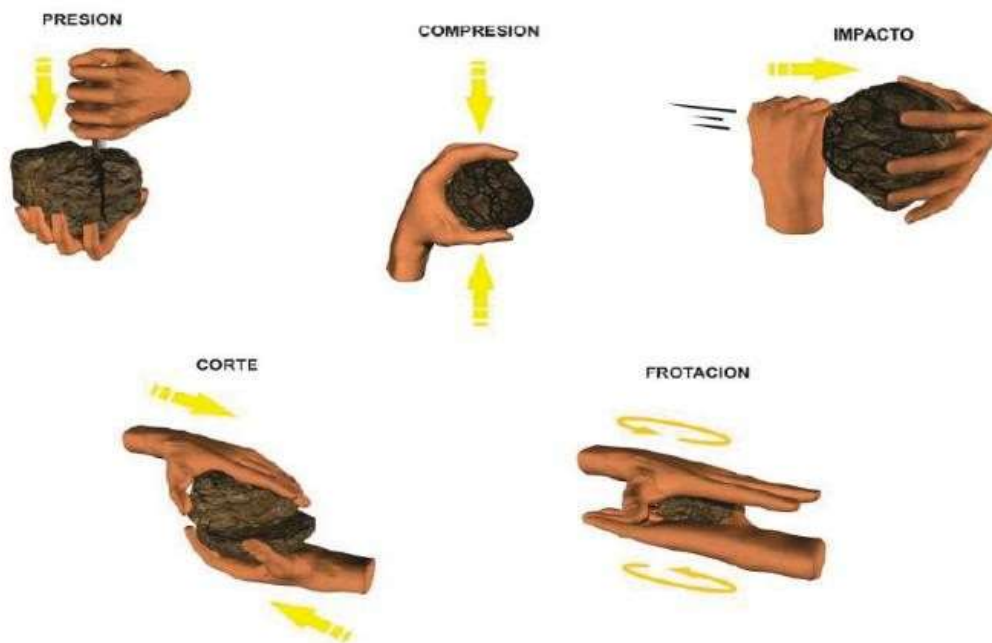
más fáciles de mover y almacenar.

- Facilita la eficiencia de los procesos posteriores. Algunos procesos necesitan minerales finos para extraer los productos finales.

Los mecanismos físicos para la conminución son presión, compresión, impacto, corte y frotación.

Figura 1

Mecanismo de reducción de tamaño



Nota. Adaptado de “Procesos y Mejoras en el Área de Molienda de la Planta Concentradora – Minera Las Bambas”, por Arenas, 2019, UNSAAC.

2.2.3. Tamaño característico de los minerales

El tamaño de los minerales extraídos puede variar desde milímetros hasta metros de diámetro, por lo que pasan al proceso de chancado y molienda para su

reducción de tamaño. En el proceso de Chancado, se reduce el mineral extraído

hasta un diámetro de $\frac{1}{2}$ pulgada (1,27 centímetros), para llegar a esta dimensión el mineral ha pasado por la etapa primaria (8 PGD), secundaria (3 PGD) y terciaria ($\frac{1}{2}$ PGD) y, en la etapa de Molienda, el mineral es reducido hasta un máximo de 0,18 milímetros (Codelco, 2018).

2.2.4. Molinos

Los molinos son maquinarias que permiten conminar fragmentos de rocas a tamaños óptimos para la extracción de metales preciosos. En la actualidad, existen varios modelos de molino y se caracterizan por las aplicaciones que se desean, ya que existen molinos para el sector minero, farmacéutico, alimentario, entre otros; sin embargo, todos trabajan por dos características principales de reducción de tamaño, por abrasión e impacto (Gonzalo, 2019). Entre los molinos más representativos del sector minero están: Molino de rulos y muelas, Molinos de disco, Molinos de barra, Molinos SAG y Molinos de bolas.

Figura 2

Cuerpos molturantes que emplea un molino



Nota. Adaptado de “Molinos de Bolas”, por Goldproballs. 2017 (www.goldproballs.com).

La elección del tipo de molino depende del tamaño a reducir, la dureza del mineral, la cantidad de mineral a moler y la eficiencia que se desea obtener. Esto permite clasificar al proceso de acuerdo con el tipo de equipo a utilizar:

- **Molienda de barras:** este equipo posee en su interior, barras de acero de 3,5 pulgadas de espesor que tienen la función de moler el mineral, que llega por las fajas transportadoras. Las barras de acero caen y se mueven en el interior del molino, moliendo el mineral.

Figura 3

Molino de barras

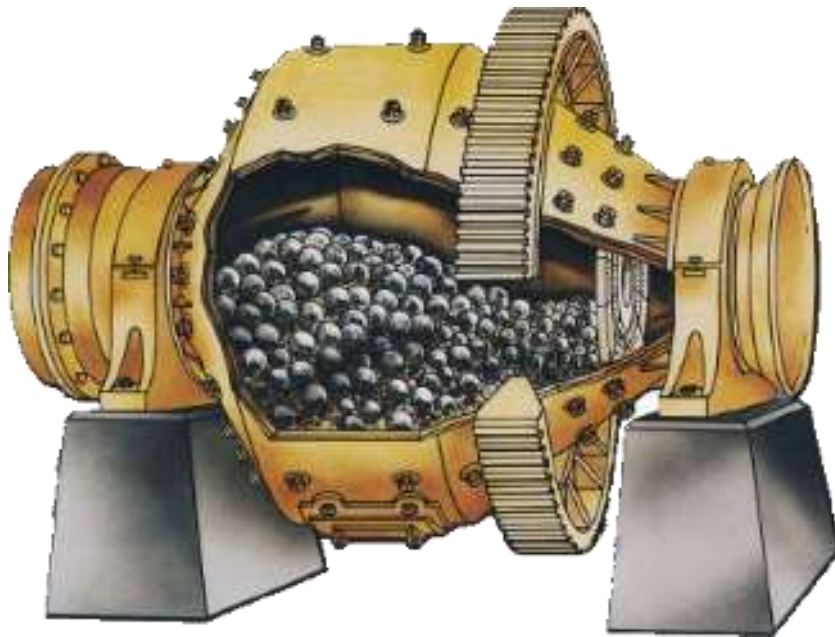


Nota. Adaptado de Molino de Barra, por 911Metallurgist, 2020, Metallurgist ([Molino De Barras De 0.5 A 50 Tph \(911metallurgist.com\)](https://www.911metallurgist.com)).

- **Molienda de bolas:** es el tipo de molino más común, utilizan bolas de acero para moler el mineral, de 3,5 pulgadas de diámetro y en promedio de 3kg de peso. El movimiento del molino hace que las bolas choquen con el mineral, que está en su interior, moliéndolo.

Figura 4

Molino de bolas



Nota. Adaptado de Molino de Bolas, por CarboSystem, 2020, CarboSystem ([Molienda de Bolas - CarboSystem](#)).

- **Molienda SAG:** este tipo de máquina es el más eficiente, respecto a las anteriores, ya que emplea mineral de la etapa primaria mezclado con cal y agua. El mineral es triturado por el mismo mineral y bolas de acero en caída libre, cuando el molino está en movimiento.

Figura 5

Molino SAG



Nota. Adaptado de *Molino de SAG*, por 911Metallurgist, 2020, Metallurgist ([Molinos SAG o AG \(911metallurgist.com\)](http://911metallurgist.com)).

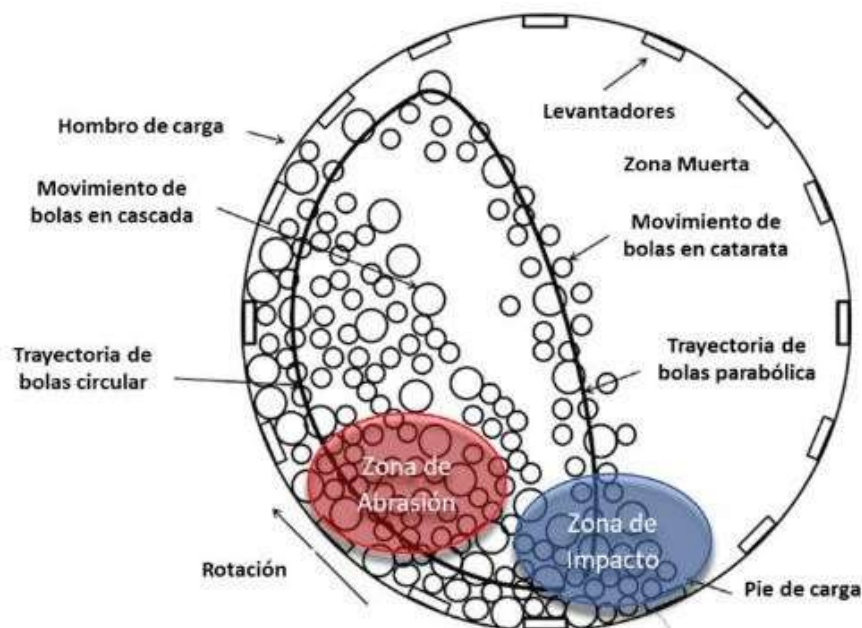
2.2.5. Molino de bolas

El molino de bolas, consiste en una estructura cilíndrica de acero que contiene bolas también de este material, agua y el mineral a reducir. Este cilindro gira sobre su propio eje, a una velocidad predefinida; lo que permite a las bolas moverse. Por efecto de este movimiento, las bolas golpean el mineral y reducen su tamaño. En este proceso de molienda, se distinguen dos mecanismos de fractura, colisión y fricción. La colisión da origen al impacto, este mecanismo de molienda es el resultado por la trayectoria parabólica de las bolas, produciendo una alta rotura

de mineral con poca energía. Por otro lado, la fricción da origen a la abrasión. Este mecanismo de fractura genera una cascada con una trayectoria de bola circular, produciendo una mayor cantidad de finos. Sin embargo, requiere mayor energía, ya que disipa calor en el sistema por resultado de la abrasión (Rosales et al., 2020).

Figura 6

Perfil de carga en el molino de bolas



Nota. Adaptado de Investigación experimental en el consumo de energía específica y reducción de tamaño en la molienda de bolas usando diferentes tipos de levitador, por Rosales et al, 2020, Ingeniería, Investigación y Tecnología.

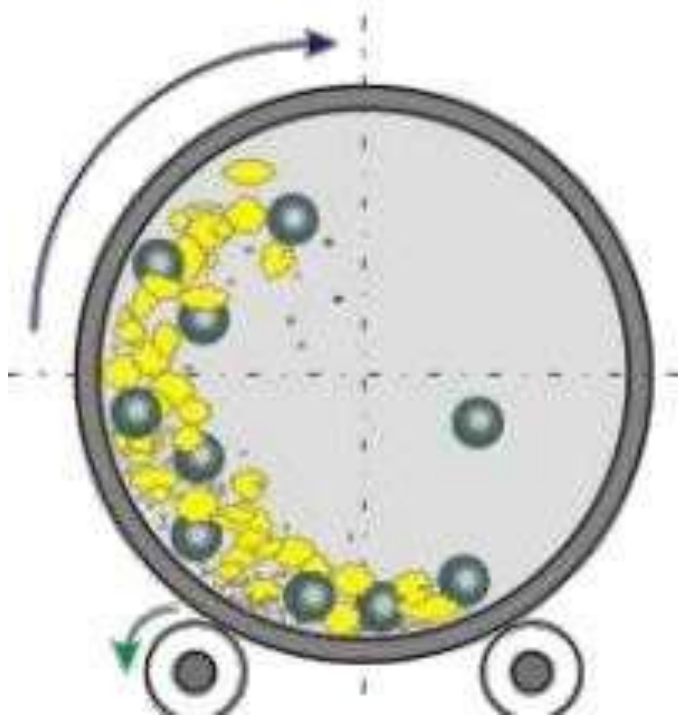
2.2.6. Operación de molino de bolas

Los molinos de bolas efectúan dos movimientos de cascadas y cataratas. El movimiento de cascadas se da por el rodado de las bolas de acero desde la parte

superior hacia la base y el segundo movimiento, cataratas, por el lanzamiento de las bolas por el aire. Por otro lado, la zona donde se concentran y se produce el mayor volumen de finos, se denomina el collar de bolas, que es la reunión de bolas y se forma por las fuerzas centrífugas que actúan dentro del molino (Universidad Politécnica de Cartagena, 2020).

Figura 7

Vista interior de molino de bolas



Nota. Adaptado de *vigilancia tecnológica y análisis de trayectorias tecnológicas*, por Barrón et al, 2016, Minería Sustentable FORDECYT.

Por otro lado, la distribución calculada por el tamaño de bolas se calcula por medio de la ecuación de Allis Chalers (Bond) donde B_s es el tamaño de bola óptima

(in), ρ_{ore} es la densidad de la mena (t/m³), W_{iB} es el índice de molienda de Bond (kWh/t), N_c es la velocidad crítica (rpm), D es el diámetro efectivo del molino.

$$B_s = 1,354(F_{80})^{0.5} \chi \left[\frac{\rho_{ore} W_{iB}}{\frac{(N_c \cdot 0.305 D)^{0.25}}{25.4}} \right]^{1/3} \dots \quad (2)$$

2.2.7. Nivel de bolas en el molino Fuller

Para encontrar el nivel de bolas óptimo dentro del molino, se puede calcular a través de una la ecuación (2) No se encuentra el origen de la referencia, donde Carga % es el porcentaje de carga, H_c es la altura interior desde el nivel de la carga de bolas y R es el radio interior del molino. Esta ecuación nos permite obtener el volumen de carga, que tiene como regla general:

- Con descarga por rebose, no sobrepasar el 45% el volumen del molino
- Con descarga por rejilla, no sobrepasar el 50% del volumen del molino.

$$Carga = 113 - 63 \frac{H_c}{R} . \quad (3)$$

2.2.8. Consumo específico de energía

El consumo de energía representa un factor importante en el proceso de obtención de cobre. Los procesos de Chancado y Molienda representan hasta el 70% del gasto energético y equivalen el 50% del costo energético de toda la planta. La molienda de bolas tiene un consumo promedio de 8kWh/ton mineral (MCH, 2014).

Rosales et al. (2020) menciona que la energía requerida (E) es proporcional

al amperaje (A), el voltaje (V) y fases del motor (F). La ecuación para el cálculo de la energía necesaria se muestra a continuación:

$$E = \frac{V.A.\sqrt{F}}{1000} \dots \quad (3)$$

La potencia nominal consumida (P) es proporcional a la velocidad del molino en rpm (N), al torque ejercido por el molino y 2π . Ecuación 3.

$$P = \frac{2\pi.n.T}{60} \quad (4)$$

Considerando la energía adicionada al sistema (P), el tiempo de molienda(t) y la cantidad de masa (m). La energía específica (E_e) es igual a:

$$E_e = \frac{Pt}{m} \dots \quad (5)$$

CAPÍTULO III

FUNDAMENTO METODOLÓGICO

3.1. Tipo y diseño de la investigación

El presente trabajo está referenciado a partir de una base de datos, que contiene información operacional de una empresa clasificada en el sector de gran minería que procesa mineral sulfurado de cobre ubicado en la región de Tacna, esta información está contextualizada en el periodo cuando entró en operación el molino de bolas marca Fuller, momento en el cual se hizo necesario establecer parámetros operativos para el correcto funcionamiento del equipo mencionado, esta investigación está enfocada en los cálculos pertinentes para determinar el porcentaje de nivel de bolas que se efectuaron para la puesta en marcha del molino.

Para determinar la performance del molino se requirió el seguimiento operacional en un periodo de 5 meses de evaluación, las variables involucradas fueron el porcentaje de malla +65, la carga circulante, potencia de trabajo entre otros que serán mencionados y analizados a detalle en el siguiente capítulo.

Las variables mencionadas otorgan un enfoque cuantitativo al presente trabajo de investigación al tener características intrínsecas a la operación metalúrgica descrita que pueden ser medidos. (Alberto & Novoa, 2017) señalan que las variables involucradas en un enfoque sistémico cuantitativo deben ser medibles y deben guardar estrecha relación con la probable solución al problema planteado puesto que son considerados como componentes del objeto de estudio, permitiendo

de esta manera, establecer posibles relaciones de causa (variable independiente) – efecto (variables dependientes).

Por lo mencionado y dado que el análisis será en base a la data obtenida, es decir que, no es posible la manipulación de las variables involucradas en un contexto ya sucedido durante un periodo de cinco meses, la presente investigación es clasificada como cuantitativa no experimental longitudinal.

3.2. Población y muestra

Se establece como unidad de análisis al circuito de molienda primaria unitaria efectuado con el molino Fuller de la planta en mención, la población corresponde al universo de datos generados y recolectados en un periodo de 5 meses, la población está conformada por promedios de 24 horas en un lapso de 145 días de las principales variables metalúrgicas que evalúan el rendimiento operativo del molino.

A fin de establecer una muestra representativa, es decir un subgrupo que contenga las mismas características de la población definida, se plantea el uso de un muestreo probabilístico a fin de garantizar la aleatoriedad en la selección de la muestra, permitiendo además conocer el porcentaje de error probabilístico con el que se realizará las inferencias a partir del análisis estadístico realizado. Se establece la siguiente fórmula para determinar el tamaño de muestra, teniendo en consideración un nivel de confianza al 95% ($Z=1,96$), al no tener referencia de un

estudio efectuado bajo las mismas condiciones, la ocurrencia y no ocurrencia de éxito son equiparadas al 50% (p y q).

$$n = \frac{N \times Z^2 \times p \times q}{e^2 \times (N-1) + Z^2 \times p \times q} \quad (6)$$

Donde:

- n corresponde al tamaño de muestra calculado
- N indica el tamaño de la población
- Z es el estadístico para distribución Z de acuerdo con el nivel de confianza establecido
- p indica la probabilidad de ocurrencia de éxito
- q es la probabilidad de que no tener éxito (1- p)
- e es la estimación de error utilizado (100 - nivel de confianza)

De acuerdo con lo mencionado, teniendo una base de 145 días, el tamaño de muestra calculado es 105, el detalle de los datos seleccionados quedará referenciado en el capítulo siguiente mientras que los datos de la población serán referenciados en la parte de los anexos.

Tabla 2

Cálculo de tamaño de muestra

N	145
Z	1,96
p	0,5
q	0,5
e	0,05
n	105

3.3. Operacionalización de variables

A fin de dar cumplimiento al objetivo establecido, resulta conveniente aplicar una técnica adecuada que permita poder medir las variables en estudio, de acuerdo con Arias Gonzáles (2012) la operacionalización de variables consiste en el conjunto de técnicas que permiten definir las conceptualmente mediante palabras o frases y que al mismo tiempo permiten establecer la forma en que serán medidas.

Se establece en dos los tipos de variables para el presente trabajo, variable dependiente y variables independientes.

3.1.1. Variable dependiente

- **Nivel de carga de bolas**

Es definido como la relación en términos porcentuales entre el volumen total del molino y el volumen que ocupan la carga moledora, conformada para este caso en particular, por la distribución de las bolas de acero.

3.1.2. Variables independientes

- **Variables metalúrgicas en operación del molino**

Se establece las principales variables metalúrgicas que permiten medir el

rendimiento operativo del molino Fuller, es necesario mencionar que la selección de estas variables es consecuencia del seguimiento operativo propio para cada planta concentradora, en este caso en particular se consideró:

- Porcentaje de malla +65, conformado por la cantidad porcentual del material retenido sobre la malla indicada (230 micras)
- Carga circulante: porcentaje del mineral fresco abastecido al molino que es devuelto para ser remolido.
- Potencia consumida, está relacionada con la energía necesaria para transferir la energía cinética necesaria para generar los mecanismos de reducción del tamaño de partícula.

Tabla 3
Operacionalización de variables

Variable	Dimensión	Indicador
VI Porcentaje de malla +65	tamaño de partícula	% m+65
Carga circulante	cantidad de mineral a remolienda	%
Potencia de trabajo	energía consumida	W-h
VD Nivel de carga de bolas	cantidad de medio molidor	%

Nota. VI: variable independiente; VD: variable dependiente

3.4. Equipos y materiales

Definimos como equipo principal al molino Fuller con las siguientes características:

- molino de bolas marca Fuller

- diámetro: 6,2 m
- longitud: 10,95 m
- volumen del molino: 330,3 m³
- Potencia: 9 500 HP
- Velocidad de giro: 13,05 RPM
- Velocidad crítica: 70 a 75 %

3.5. Técnicas e instrumentos para recolección de datos

En cuanto a la recopilación de datos, el sistema automático de almacenamiento de datos en línea permite generar y guardar adecuadamente los datos en los servidores designados para tal fin, estos datos permiten controlar en todo momento los principales parámetros operativos del molino Fuller; esta base de datos representa la materia prima para el presente estudio.

3.6. Procesamiento y análisis de datos

Los datos recolectados serán estudiados y analizados principalmente con los programas Microsoft Excel para la generación de gráficos y tablas, en tanto que el análisis estadístico será desarrollado con el programa MINITAB.

RESULTADOS

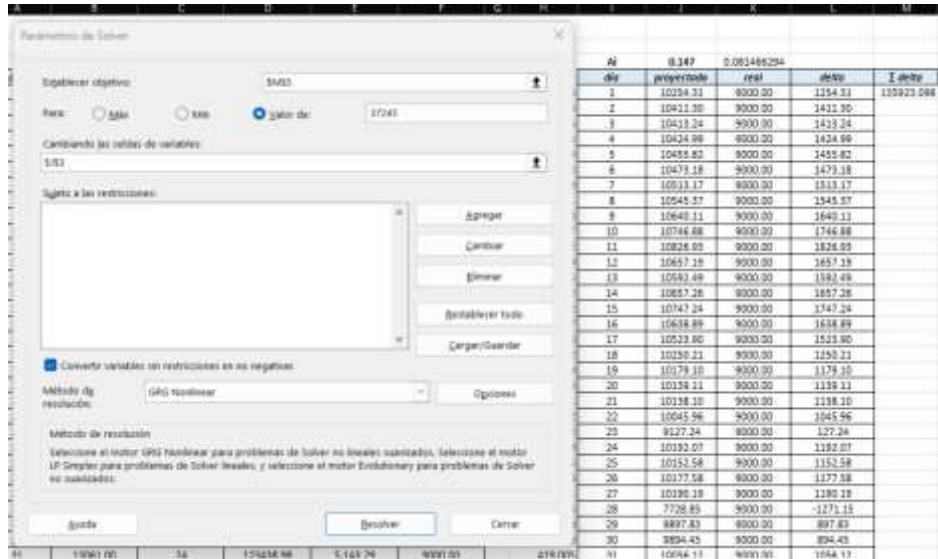
Estimación del índice de abrasividad

Para recalcular el A_i (índice de abrasividad) utilizamos los datos de la tabla referenciado en el anexo 2, específicamente, la sumatoria de la diferencia de los valores proyectados y los valores reales, siendo este valor de 135923 kg.

Para hallar un nuevo índice de abrasión, se debe ajustar la diferencia a 37245 kg que es la cantidad de carga faltante hallado en la medición del nivel de bolas cuando el molino estuvo parado (ver 4.2.9).

Figura 8

Recalculo del índice de abrasión



Nota: Cálculo efectuado con herramienta solver de Microsoft Excel.

La figura anterior muestra la configuración de los datos ingresados para las iteraciones de la herramienta Solver, el valor del delta de consumo es usado como

valor objetivo para efectuar el recalcu­lo y este debe aproximarse a 37245 kg, así mismo, el valor de A_i ($A_i=0,147$) representa el valor que debe ser modificado para hallar el objetivo.

Figura 9

Valor del nuevo índice de abrasión

Ai	0.121			
<i>día</i>	<i>proyectado</i>	<i>real</i>	<i>delta</i>	Σ <i>delta</i>
1	9534.08	9000.00	534.08	37244.999
2	9680.04	9000.00	680.04	
3	9681.84	9000.00	681.84	
4	9692.76	9000.00	692.76	
5	9721.43	9000.00	721.43	
6	9737.58	9000.00	737.58	
7	9774.75	9000.00	774.75	
8	9804.69	9000.00	804.69	
9	9892.78	9000.00	892.78	
10	9992.05	9000.00	992.05	
11	10066.47	9000.00	1066.47	
12	9908.65	9000.00	908.65	
13	9848.50	9000.00	848.50	
14	9908.72	9000.00	908.72	
15	9992.39	9000.00	992.39	
16	9891.64	9000.00	891.64	
17	9784.73	9000.00	784.73	
18	9530.26	9000.00	530.26	
19	9464.14	9000.00	464.14	
20	9426.97	9000.00	426.97	
21	9426.03	9000.00	426.03	
22	9340.36	9000.00	340.36	

Nota: La imagen solo referencia una parte de toda la data.

Según el recalcu­lo mostrado en la figura anterior (tabla completa en anexo 4), el índice de abrasión que mejor se ajusta corresponde al valor de 0,121. Con este nuevo índice se obtiene un acumulado en la diferencia de 37244,999 kg que es un

valor muy cercano de 37245 kg.

Contrastación del consumo de bolas

A partir del valor recalculado del índice de abrasividad, se volverá a contrastar el consumo de bolas proyectado y el real en el segundo periodo de evaluación. A fin de disminuir la diferencia obtenida en el primer periodo (135923 kg) se incrementó la adición diaria de bolas a 10000 kg.

Tabla 4

Valor del nuevo índice de abrasión

<i>día</i>	<i>TMS</i>	<i>T oper.</i>	<i>Energía (KW)</i>	<i>KW-hr</i>	<i>Carga (Kg)</i>
1	12222.30	24	129871.54	5411.31	10000.00
2	13064.52	24	135243.92	5635.16	10000.00
3	12823.84	24	141950.10	5914.59	10000.00
4	12061.23	24	144458.21	6019.09	10000.00
5	12382.30	24	136351.20	5681.30	10000.00
6	12217.51	24	138634.05	5776.42	10000.00
7	12294.07	24	139682.31	5820.10	10000.00
8	12585.39	24	133873.12	5578.05	10000.00
9	11866.54	24	119922.73	4996.78	10000.00
10	13768.19	24	140770.02	5865.42	10000.00
11	11549.36	24	148822.54	6200.94	10000.00
12	13153.84	24	133536.32	5564.01	10000.00

La tabla presentada, muestra un extracto de los valores operativos en el periodo comprendido posterior a la parada de planta (tabla completa en Anexo 5),

se evaluó un total de 112 días donde se obtiene en promedio un tonelaje diario de 12339 TMS, valor muy similar a las 12426 TMS del primer periodo con lo que se puede afirmar que se mantiene la cantidad de mineral procesado.

En base a los datos de consumo energético de la tabla anterior y usando un índice de abrasividad de 0,121 se construye la siguiente tabla:

Figura 11

Valor del nuevo índice de abrasión

Ai	0,121			
día	proyectado	real	delta	Σ delta
1	9837,03	10000,00	-162,97	42491,458
2	10243,96	10000,00	243,96	
3	10751,91	10000,00	751,91	
4	10941,89	10000,00	941,89	
5	10327,83	10000,00	327,83	
6	10500,74	10000,00	500,74	
7	10580,14	10000,00	580,14	
8	10140,13	10000,00	140,13	
9	9083,47	10000,00	-916,53	
10	10662,53	10000,00	662,53	
11	11272,46	10000,00	1272,46	
12	10114,62	10000,00	114,62	
13	11644,13	10000,00	1644,13	

A diferencia del primer periodo donde se obtuvo una diferencia estimada de 135923,098 kg, para este nuevo periodo se obtuvo 42491,458 kg, este valor representa una disminución de 68,74 %.

CONCLUSIONES

Primera: De acuerdo al objetivo general planteando en el presente trabajo, concluimos que la evaluación del rendimiento operativo posterior a la puesta en marcha del molino Fuller con el nivel de bolas calculado, es crucial para comprender el impacto de este parámetro en la eficiencia y productividad de la planta concentradora de cobre.

Segunda: En función al primer objetivo, el análisis del impacto del nivel de bolas calculado sobre las variables relacionadas con el rendimiento operativo del molino, revela la importancia crítica de este parámetro en la eficiencia y productividad del proceso: al estudiar cómo este factor afecta variables clave como la producción, el consumo de energía y la calidad del producto final.

Tercero: En función al segundo objetivo, la contrastación de los principales métodos para calcular el nivel de bolas de trabajo con un procedimiento desarrollado en el laboratorio metalúrgico de la empresa ofrece una perspectiva invaluable sobre la precisión y eficacia de los diferentes enfoques. Al comparar y evaluar estos métodos, se identifican sus fortalezas, limitaciones y posibles áreas de mejora.

RECOMENDACIONES

Primera: Se sugiere establecer un programa regular de monitoreo y evaluación del rendimiento operativo del molino Fuller después de la puesta en marcha con el nivel de bolas calculado. Este programa podría incluir la recopilación sistemática de datos sobre la producción de mineral procesado, el consumo de energía y otras variables relevantes para el rendimiento del molino.

Segunda: Se recomienda un monitoreo regular del rendimiento del molino para evaluar cómo el nivel de bolas calculado influye en variables críticas como la producción, el consumo de energía y la calidad del producto final, optimizando así la eficiencia y productividad.

Tercera: Se aconseja evaluar regularmente los métodos para calcular el nivel de bolas de trabajo, contrastando el procedimiento del laboratorio metalúrgico. Esta comparación proporciona una visión detallada de los enfoques, identificando fortalezas, limitaciones y oportunidades de mejora para optimizar la precisión y eficacia del proceso.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Alberto, C., & Novoa, B. (2017). *Investigación cuantitativa*.
<http://www.areandina.edu.co>
- AngloAmerican. (2022). *Comienza a girar el molino de bolas*.
<https://peru.angloamerican.com/quellaveco/el-proyecto/comienza-a-girar-el-molino-de-bolas.aspx>
- Arias Gonzáles, J. L. (2012). Guía para elaborar la operacionalización de variables. *Revista Espacio I+D Innovación Más Desarrollo*, X (28), 42–56.
<https://doi.org/10.31644/IMASD.28.2021.a02>
- Arias, L., & Villacrés, J. (2020). *Reingeniería en el diseño e implementación de un molino tipo bola para una industria minera ubicada en Naranjal*.
Universidad Politécnica Salesiana.
- BBVA. (2023). *Perú situación del sector minero*.
- Codelco. (2018). *Chancado Reduciendo Rocas*.
<https://www.codelcoeduca.cl/codelcoeduca/site/edic/base/port/chancado.html>
- Colvin, F. (2016). *American Machinist Grinding Book*.
- Delgado, J. (2019). *Sistema de monitoreo en línea del desgaste de los revestimientos en los molinos convencionales de la Unidad Minera Uchucchacua*. UTEC.

- El Comercio. (2020). Southern espera luz verde para ampliación de Cuajone.
<https://elcomercio.pe/economia/dia-1/cuajone-southern-espera-luz-verde-para-Ampliación-de-Cuajone-Southern-Copper-Noticia/>
- Gonzalo, J. (2019). Análisis de los parámetros del molino de bolas en la producción de la planta concentradora en Milpo. UNCP.
- Maquera, M. (2016). Optimización del mantenimiento en el cambio de los forros en el molino fuller de la empresa Southern Perú – Toquepala –. Universidad Nacional del Altiplano Facultad.
- MCH. (2014). Molienda y chancado: Apostando por la eficiencia energética.
<https://www.mch.cl/informes-tecnicos/molienda-y-chancado-apostando-por-la-eficiencia-energética/>
- Roque, A. (2021). Modelo de jerarquización para determinar el tipo de mantenimiento que incremente la disponibilidad mecánica de molinos de bolas en Compañía Minera Santa Luisa. Universidad Continental.
- Rosales, G., Andrade, J., Alvarado, G., Espinosa, E., & Nava, D. (2020). Investigación experimental en el consumo de energía específica y reducción de tamaño en la molienda de bolas usando diferentes tipos de levantador. *Ingeniería Investigación y Tecnología*, 21(2), 1–8.
<https://doi.org/10.22201/fi.25940732e.2020.21n2.020>
- Segovia, J., Godoy, J., & Pérez, L. (2016). Determination of production capacity

constraints in the process of obtaining copper. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 24, 49–59.

Universidad Politécnica de Cartagena. (2020). TEMA 5-Parte I:
Molinos Bolas.

Zamora, I. (2018). Diseño de un plan de mantenimiento para un
molino de bolas de la empresa compañía minera cerro negro.
Universidad Católica de Valparaíso.