



Universidad Nacional Mayor de San Marcos

Universidad del Perú. Decana de América

Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica

Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica

**Incremento de la capacidad de tratamiento para la
planta concentradora – Sección Molienda en la sierra sur
del país**

TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL

Para optar el Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico

AUTOR

Freddy Jesús SOTO CASTRO

Lima, Perú

2025



Reconocimiento - No Comercial - Compartir Igual - Sin restricciones adicionales

<https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Usted puede distribuir, remezclar, retocar, y crear a partir del documento original de modo no comercial, siempre y cuando se dé crédito al autor del documento y se licencien las nuevas creaciones bajo las mismas condiciones. No se permite aplicar términos legales o medidas tecnológicas que restrinjan legalmente a otros a hacer cualquier cosa que permita esta licencia.

Referencia bibliográfica

Soto, F. (2025). *Incremento de la capacidad de tratamiento para la planta concentradora – Sección Molienda en la sierra sur del país*. [Trabajo de suficiencia profesional de pregrado, Universidad Nacional Mayor de San Marcos, Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica]. Repositorio institucional Cybertesis UNMSM.

Metadatos complementarios

Datos de autor 1	
Nombres y apellidos	Freddy Jesús Soto Castro
Tipo de documento de identidad	DNI
Número de documento de identidad	72613505
URL de ORCID	-
Datos de asesor	
Nombres y apellidos	No aplica
Tipo de documento de identidad	-
Número de documento de identidad	-
URL de ORCID	-
Datos del jurado	
Presidente del jurado	
Nombres y apellidos	Dr. Daniel Florencio Lovera Dávila.
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	06450640
Miembro del jurado 1	
Nombres y apellidos	Dr. Vidal Sixto Aramburú Rojas
Tipo de documento	DNI
Número de documento de identidad	08608364
Miembro del jurado 2	
Nombres y apellidos	Dr. Luis Américo Rivera Del Valle
Tipo de documento	DNI

Número de documento de identidad	10647742
Datos de investigación	
Línea de investigación	No aplica
Grupo de investigación	No aplica
Agencia de financiamiento	Sin financiamiento
Ubicación geográfica de la investigación	País: Perú Departamento: Tacna Provincia: Jorge Basadre Distritos: Ilabaya Latitud: -17.2456 Longitud: -70.6136
Año o rango de años en que se realizó la investigación	2024 – 2025
URL de disciplinas OCDE	Mineralogía https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#1.05.02 Minería, Procesamiento de minerales https://purl.org/pe-repo/ocde/ford#2.07.05



«Año de la recuperación y consolidación de la economía peruana»

**ACTA DE SUSTENTACIÓN DE TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL
PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**

En el salón de Grados y Títulos de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica de la Universidad Nacional Mayor de San Marcos, el miércoles 17, del mes de diciembre del 2025 siendo las 12:00 m, en presencia de los Señores Docentes designados como Miembros del Jurado Calificador:

Dr. DANIEL FLORENCIO, Lovera Dávila	(PRESIDENTE)
Dr. LUIS AMÉRICO, Rivera Del Valle	(MIEMBRO)
Dr. VIDAL SIXTO, Aramburú Rojas	(MIEMBRO)

Reunidos para el Acto Académico Público de la Sustentación del TRABAJO DE SUFICIENCIA PROFESIONAL Titulada: «**INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE TRATAMIENTO PARA LA PLANTA CONCENTRADORA - SECCIÓN MOLIENDA EN LA SIERRA SUR DEL PAÍS**» presentada por Don: FREDDY JESÚS SOTO CASTRO, Bachiller en Ingeniería Metalúrgica, para la obtención del Título Profesional de Ingeniero: **METALÚRGICO**.

Los miembros del Jurado Calificador, escuchada la sustentación respectiva, plantearon al graduando las observaciones pertinentes, que fueron absueltas a:

.....**SATISFACCIÓN**.....

Concluida la Sustentación, el Jurado procedió a evaluar y calificar según el reglamento vigente, cuyo resultado fue la nota de:

.....*Dieciséis*..... (*16*) *Aprobado con mención honrosa*.....

Habiendo sido aprobada la Sustentación del Trabajo de Suficiencia Profesional, el Presidente del Jurado, recomienda que la Facultad de Ingeniería Geológica, Minera, Metalúrgica y Geográfica, otorgue el **TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO METALÚRGICO**, a Don: **Freddy Jesús Soto Castro**.

Siendo las *13:00* horas, se dió por concluido el acto académico, expidiéndose cinco (5) Actas Originales de la Sustentación de Suficiencia Profesional.

Lima, 17 de diciembre del 2025


Dr. DANIEL FLORENCIO LOVERA DÁVILA
Presidente


Dr. LUIS AMÉRICO RIVERA DEL VALLE
Miembro


Dr. VIDAL SIXTO ARAMBURÚ ROJAS
Miembro



UNIVERSIDAD NACIONAL MAYOR DE
SAN MARCOS
Universidad del Perú, Decana de América

CERTIFICADO DE SIMILITUD

Yo, Luis ALFREDO ORIHUELA SALAZAR en mi condición de Director de Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica de la Facultad de Ingeniería Geológica, Minea Metalúrgica y Geográfica del Trabajo de Suficiencia Profesional, cuyo título es **“INCREMENTO DE LA CAPACIDAD DE TRATAMIENTO PARA LA PLANTA CONCENTRADORA – SECCIÓN MOLIENDA EN LA SIERRA SUR DEL PAÍS”**, **FREDDY JESÙS SOTO CASTRO** para optar el título profesional de Ingeniero Metalúrgico.

CERTIFICO que se ha cumplido con lo establecido en la Directiva de Originalidad y de Similitud de Trabajos Académicos, de Investigación y Producción Intelectual. Según la revisión, análisis y evaluación mediante la plataforma PIDS, el documento evaluado cuenta con el 5% de similitud, nivel PERMITIDO para continuar con los trámites correspondientes y para su **publicación en el repositorio institucional**.

Se emite el presente certificado en cumplimiento de lo establecido en las normas vigentes, como uno de los requisitos para la obtención del título correspondiente.

Lima, 11 de diciembre del 2025

Firma del Director

Mg. LUIS ALFREDO ORIHUELA SALAZAR

DNI: 08004136

ÍNDICE

ÍNDICE.....	2
DEDICATORIA.....	4
AGRADECIMIENTOS.....	5
RESUMEN	6
NOMENCLATURA.....	8
CAPÍTULO I: Introducción	10
CAPÍTULO II: Desarrollo del informe	11
2.1. Generalidades	11
2.1.1. Antecedentes y justificación.....	11
2.1.2. Objetivo general	11
2.2. Ubicación de la Unidad Minera Toquepala.....	12
2.3. Características de la mina Toquepala	13
2.3.1. Formación ígnea de la mina Toquepala.....	14
2.4. Planta Concentradora Toquepala.....	15
2.5. Planta concentradora- área de chancado primario	16
2.6. Chancado secundario.....	18
2.7. Chancado terciario	19
2.8. Chancado cuaternario	21
2.9. Molienda.....	22
2.10. Flotación y remolienda	24
2.11. Planta de procesamiento para molibdeno	26
2.12. Planta de filtros para el concentrado de cobre	28

2.13.	Espesamiento de los relaves y recuperación de agua	29
2.14.	Mejora en la sección de molienda	31
2.14.1.	Condiciones actuales en la sección de molienda primaria.....	31
2.14.2.	Cálculo para la conversión de molino de barras a bolas..	33
2.14.3.	Evaluación de la conversión de molinos de barras a molinos de bolas	35
2.14.4.	Potencia Absorbida total del molino de barras.....	36
2.14.5.	Velocidad crítica.....	37
2.14.6.	Porcentaje de velocidad crítica	37
2.14.7.	Diámetro máximo de barras	38
2.14.8.	Potencia del motor del molino de barras	38
2.14.9.	Diámetro máximo de bolas.....	42
2.14.10.	Consumo teórico de potencia para molino de bolas.....	42
2.14.11.	Velocidad crítica.....	43
2.14.12.	Velocidad angular del motor de molino de barras.....	43
2.14.13.	Evaluación del Piñón del molino instalado	44
CAPÍTULO III:		49
Conclusiones.....		49
CAPÍTULO IV:		50
Recomendaciones		50
CAPÍTULO VI: Referencias Bibliográficas.....		51
CAPÍTULO VII: Anexos		53

DEDICATORIA

Dedico este informe a mis padres, Jesús Soto Talaverano y Cirila Castro Martínez, y a mis hermanos, Wilder Adolfo Soto Castro y Reina Elizabeth Soto Castro que siempre me apoyaron para cumplir mis metas.

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar, a mi alma mater, La Universidad Nacional Mayor de San Marcos, a través de la Escuela Profesional de Ingeniería Metalúrgica. Y, a la empresa **Southern Cooper Corporation – UM. Toquepala** por brindarme la oportunidad de desarrollarme como profesional.

RESUMEN

Southern Copper Corporation (subsidiaria del grupo Mexico) es la gestora responsable de la mina de Toquepala, Cujaone y la fundición de Ilo. Estas unidades, representan los recursos principales de la empresa en el sur del Perú, centrando su principal labor en la producción de cobre y molibdeno.

El yacimiento de la Mina Toquepala es de tipo pórfido de cobre – molibdeno que se explota a cielo abierto, ubicada en el distrito de Ilabaya, Tacna, a una distancia de 95 Km. de la ciudad de Tacna y a una altitud de 3200 metros sobre el nivel del mar.

La concentradora Toquepala, consta de 2 plantas concentradoras denominadas Concentradora 1 y Concentradora 2. El presente informe está orientado a la Concentradora 1

La Concentradora 1 procesa 60,000 TMSD y centra sus operaciones en la etapa de chancado, molienda y flotación de minerales sulfurados para la obtención de concentrado de cobre y molibdeno.

El rendimiento de la molienda se obtiene por el incremento de la cantidad de tonelaje molido fino obtenido. Esto permite procesar un tonelaje mayor y obtener un producto final con granulometría más fina. Por ello, la oportunidad de mejora se encontró convirtiendo los molinos de barras a molinos de bolas, logrando así, eliminar las paradas de los molinos barras durante el agregado de medio moledor (barras). Esta conversión permite pasar de un tonelaje molido anual de 16,453,136 TM a 17,257,200 TM, logrando un incremento de 80,064 TM. Este incremento de tonelaje molido permitirá obtener 1667 TM de concentrado de cobre y 32 TM de concentrado de Molibdeno.

Actualmente se tiene 2 paradas semanales de los molinos barras por agregado de medios moledores (barras), que consta de 25 minutos a cada molino por día, de un total de 8 molinos de barras en la planta Concentradora 1.

La conversión de los molinos de barras a bolas eliminará los tiempos de parada e incrementará el tonelaje molido anual. Optimizando el tiempo y horas efectivas de operación de cada molino.

NOMENCLATURA

- KW : Kilo watts medición de potencia.
- HP : Caballos de fuerza (Horse Power).
- TC : Tonelada Corta.
- μm : Micrómetros.
- ft : Unidad de medida en pies.
- $pulg$: Unidad de medida en pulgadas.
- ND : Número de días por mes.
- NM : Número de meses.
- R : Diámetro máximo de barra (pulg.).
- W_i : Índice de trabajo.
- ρ_s : Gravedad específica del sólido.
- $KW\text{-}h/TC$: Kilo watts hora por tonelada corta.
- $THRSD$: Tiempo en horas detenido.
- TM : Toneladas métricas
- TMH : Toneladas métricas horas.
- $TMPD$: Toneladas métricas día.
- $TMPA$: Toneladas métricas año.
- $TMPM$: Toneladas métricas meses.
- $TMNA$: Toneladas métricas no molidas anuales.
- $TMSD$: Toneladas métricas secas por día
- $THRSD$: Tiempo en horas detenido.
- $Pot. abs_{total}$: Potencia absorbida total (Kilo Watts)
- Wi_{prom} : Work Index promedio.
- F_{80} : Tamaño de partícula de la alimentación, donde el 80% a pasado ese número de malla.
- P_{80} : Tamaño de partícula del producto, donde el 80% a pasado ese número de malla.

- m : Unidad de medida en metros.
- RPM : Revoluciones por minuto, número de vueltas del minuto
- P_e : Potencia eléctrica requerida por el motor (HP).
- K_R : Constante de proporcionalidad.
- D : Diámetro interno del molino.
- L : Longitud interna del molino.
- $\%V_p$: Volumen interno del molino cargado.
- $\%V_s$: Velocidad crítica del molino
- K : Factor para tipo de molienda y circuito

CAPÍTULO I: Introducción

Actualmente la minería es un sector que genera grandes ganancias. Es por ello que las compañías del sector invierten cantidades considerables de dinero para incrementar la capacidad de tratamiento de mineral en la molienda para evaluar distintas alternativas.

La necesidad de mejorar la capacidad de molienda resulta del crecimiento de la industria y la demanda de minerales. La eficiencia de la molienda impacta directamente que tan rentable y competitiva de una operación minera, así como en la calidad del producto final. La conversión de molinos de barras a bolas se presenta como una mejora beneficiosa para incrementar el tonelaje procesado, eliminando el tiempo de parada de los molinos de barras durante el agregado de medios moledores (barras). La conversión de los molinos se basa en cambiar los medios moledores actuales (barras) a bolas, manteniendo las dimensiones del molino, forro, sistema de transmisión, granulometría actual de la descarga, porcentaje de sólidos y permitir incrementar de la capacidad de procesamiento.

El presente informe muestra los resultados de viabilidad de la conversión de los molinos de barras a bolas.

Las conclusiones obtenidas se darán a conocer de acuerdo con los resultados obtenidos, demostrando los beneficios potenciales que se obtiene luego de la conversión.

CAPÍTULO II: Desarrollo del informe

2.1. Generalidades

2.1.1. Antecedentes y justificación

La capacidad de molienda tiende a reducirse cuando la dureza del mineral supera el valor del Work index de 15.5 KW-h/TC y por el agregado de medios de molienda (barras) a los molinos de barras, generando alcanzar tonelajes por debajo de la capacidad de tratamiento de los 60,000 TMSD

Con la finalidad de alcanzar e incrementar la capacidad de molienda diaria, se desarrolló una evaluación para determinar la viabilidad de la conversión de los molinos de barras a molinos de bolas. Con esto, se busca eliminar el tiempo de parada del molino de barras por el agregado del medio de molienda (barras) que se realiza dos veces por semana.

La conversión se realizará a los 8 molinos de Barras 10'x14' que operan actualmente. Además, está planeada para continuar operando en circuito abierto sin producción de carga circulante.

2.1.2. Objetivo general

Conocer las operaciones y procesos del tratamiento del mineral sulfurado de cobre y molibdeno que se realiza en la empresa U.M Toquepala - Concentradora 1, resaltando la sección de molienda.

Evaluar la conversión de molino de barras a bolas para incrementar la capacidad de tratamiento en la U.M Toquepala – Concentradora 1, y reducir el radio de concentración de cobre - molibdeno

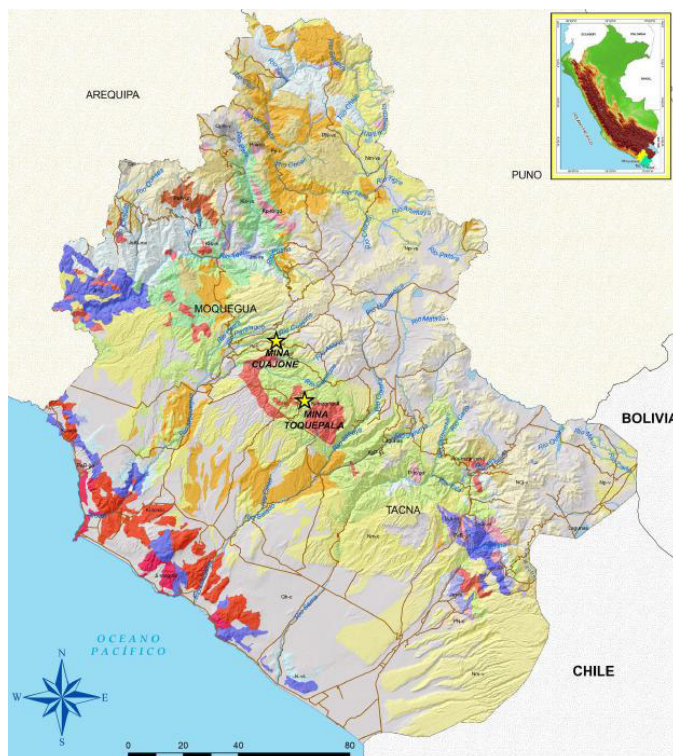
2.2. Ubicación de la Unidad Minera Toquepala

La unidad minera de Toquepala se ubica en el sur del Perú, en el distrito de Ilabaya ubicada en la provincia de Jorge Basadre en el departamento de Tacna.

Su localización geográfica se encuentra en una posición de 17° 14' 44" de latitud sur, 70° 36' 49" de longitud oeste y a una altitud de 3,200 sobre el nivel del mar. La mina Toquepala se encuentra a una distancia de 95 Km. de la ciudad de Tacna, 76 Km. de Moquegua y 365 Km. de Ilo. Para llegar a la mina desde la ciudad, se puede tomar la carretera Panamericana Sur, vía Tacna – Arequipa – Lima hasta el pueblo de Camiara, y desde ahí se toma una vía semiasfaltada que conduce directamente a la mina.

Figura 1

Ubicación de la Unidad Minera Toquepala



Nota: Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) (2018).

2.3. Características de la mina Toquepala

La mina Toquepala constituye un yacimiento porfídico de cobre y molibdeno. La mineralización está sujeta a una chimenea de brecha y a un intrusivo de dacita producto de la actividad intrusiva hidrotermal.

Los minerales se encuentran dispersos en fracturas angostas y poco tradicionales de aproximadamente de 1 – 2 mm. de espesor.

La zona mineralizada manifiesta la forma semejante a un hongo. Esta zona enriquecida se extiende de manera horizontal, compuesta principalmente por calcopirita, calcosita molibdenita y pirita. Se encuentran diseminada a través de toda la cadena de rocas alternadas, en pequeñas venillas relleno vacíos tanto en las profundidades como también alrededor de la chimenea.

Molibdenita, pequeños cristales en forma de hojuelas en los hilos de cuarzo, con el cual tiene una definitiva preferencia a asociarse. La mineralización de Molibdeno en Toquepala se localiza en las brechas angulares y pórfido de dacita.

Figura 2

Modelo geológico esquemático de un sistema de pórfido de cobre



Nota: Ministerio de Energía y Minas (MINEM) – Instituto Geológico, Minero y Metalúrgico (INGEMMET) (2011).

2.3.1. Formación ígnea de la mina Toquepala

El yacimiento está situado en una zona que estuvo expuesta a una intensa actividad volcánica de magmas riolíticos y andesíticos que ocurrió hace 70 millones de años. Estos eventos ocurridos, produjeron enormes cantidades de material magmático formado capas de lava con un espesor de 1500 metros.

Este material rocoso está compuesto por rocas riolitas, andesitas y aglomerados que están ligeramente inclinados al oeste constituyendo la mina Toquepala.

Figura 3

Tipo de rocas magmáticas



Nota: Geoenciclopedia (2007).

2.4. Planta Concentradora Toquepala

Las operaciones de la planta Concentradora Toquepala comenzaron en el año de 1959 con la operación de la Planta de Cobre con una capacidad de procesamiento de 32,660 TMSD. En el año 1997 tuvo un incremento de capacidad hasta 43,000 TMSD de y, por último, en el año 2002 alcanzó un nuevo incremento de capacidad hasta 60,000 TMSD que se mantiene en la actualidad.

La Planta de Molibdeno entra en operación en el año 1962 con una capacidad de operación de 1,090 T/día de concentrados Cu-Mo (bulk). En el año 1997 tuvo un incremento de capacidad hasta 1,400 T/día y, por último, en el año 2002 un nuevo incremento de capacidad hasta 2,000 T/día que se mantiene en la actualidad.

Figura 4

Vista satelital de la Planta Concentradora de Toquepala, Tacna, Perú



Nota: Foto satelital del aplicativo Google Maps.

2.5. Planta concentradora- área de chancado primario

Las chancadoras giratorias reciben mineral proveniente del tajo abierto que es transportado por volquetes mineros. Una vez que el mineral es descargado, este es triturado hasta alcanzar un tamaño cercano de 6 pulgadas. El mineral chancado es transportado a través de dos equipos de alimentación (apron feeder) y por un circuito de fajas (dos fajas transportadoras) que transportan el mineral hacia la primera pila de material intermedio. Luego el mineral es conducido por cuatro equipos de alimentación (apron feeder) y una faja transportadora hacia una segunda pila de material intermedio, donde se almacena para su posterior alimentación a las chancadoras secundarias.

Tabla 1*Equipos de la planta de chancado primario*

Relación de equipos de Chancado Primario	
02 chancadoras Primarias	
Tipo	Giratoria Fuller 60" x 113"
Motor	1000 HP - 4160 v
Capacidad	4190 TMSH
Abertura de Alimentación	60 " (1525mm)
Set de Descarga	6.5"
% Tiempo Operativo	70 - 75%
02 rompedores de rocas	
Modelo	Serie BXR 65 (Breaker Technology)
Clase de Energía	8813 Joules (6500 ft/Lbs)
	341 - 488 Carrera Larga / 454 - 649 Carrera Corta
Golpes/minuto	
Presión de trabajo	2150 - 2700 Psi (150 - 190 Bares)
02 sistema rompe rocas	
Modelo	Serie TTX45 (Breaker Technology)
Peso total	20,410 Kg
Capacidad de elevación de carga	7759 Lb (3519 Kg)
Equipos auxiliares	
02 tolva de regulación de Alimentación	350 toneladas
02 tolva compensación descarga Chancadora	720 toneladas
02 alimentador de Placas a faja de sacrificio	2 de 62" - 300 HP
Faja de Sacrificio - Área 2100	84" x 302'-8" - 8275 TMPH - 500 HP - 3.99 m/s - Polines 20°
Faja de Transferencia - Área 2200	72" x 7394'-9" - 8275 TMPH - 4.57 m/s - Polines 20°
Alimentador de Placas - Área 2300	2 motores de 1750 HP
Faja transportadora hacia pila Intermedios - Área 2300	4 de 60" - 150 HP
Pila de Intermedios 1	60" x 622'-11" - 3436 TMPH - 400 HP - 3.81 m/s - Polines 35°
Pila de Intermedios 2	140,000 TMS
	80,000 TMS

Nota: Elaboración propia (Información de los archivos SPCC).

2.6. Chancado secundario

El mineral extraído de la segunda pila de material intermedio se dirige hacia tres zarandas vibratorias a través de 6 equipos de alimentación (4 apron feeder y 2 belt feeder). Es en estas cribas donde se lleva la clasificación del mineral. El material grueso es transportado hacia 3 chancadoras cónicas MP 800. Las chancadoras secundarias trituran el mineral y entregan un producto menor a 38 mm (1.5 pulgadas). El material fino de las cribas, junto con el producto de las chancadoras secundarias cónicas, avanzan a la siguiente etapa de clasificación dentro del proceso de chancado terciario.

Tabla 2

Equipos de la planta de chancado secundario

Relación de equipos de Chancado Secundario	
03 CHANCADORAS CÓNICAS	
Tipo	Cónicas Metso MP 800
Motor	800 HP - 1180 RPM - 107 Amp - 4160v
Capacidad	750 TMSH
Set de Descarga	1 1/2"
% Tiempo Operativo	87%
Zaranda (7' x 14')	
N° Zarandas	2
Tipo	Triple Pendiente Nordberg Paneles 1'x2' abertura 76 x 100 mm
Zaranda (8' x 14')	
N° Zarandas	1
Tipo	Double Deck Nordberg aberturas 1 50 x 104 y 2 14 x 14 mm
Tipo de Forro	Cavidad Media
Equipos auxiliares	
Alimentador tipo oruga	4 de 48" 15 HP 2 de 54" 18.8 HP x 4.5 m 400 - 1200 t/h - 0.38 m/s - Polines
Alimentador tipo Belt Feeder	54" x 82' - 1089 TMSH - 7.5 HP - 1.33 m/s - Polines 20°
Faja Horizontal N° 3A	

Faja Horizontal N° 3B	54" x 82' - 1089 TMSH - 7.5 HP - 1.33 m/s - Polines 20°
Faja Inclinada N° 4A	54" x 592' - 1089 TMSH - 200 HP - 1.78 m/s - Polines 20° 2 motores de 1750 HP
Faja Inclinada N° 4B	54" x 597' - 1089 TMSH - 200 HP - 1.78 m/s - Polines 20°
Faja Inclinada N° 4C	54" x 592' - 1500 TMSH - 200 HP - 1.46 m/s - Polines 35°
Carro distribuidor de mineral - tolva de finos	Hewit Robins 54"

Nota: Elaboración propia (Información de los archivos SPCC).

2.7. Chancado terciario

El mineral del proceso de chancado secundario se somete a clasificación a través de 6 cribas. El material grueso obtenido es triturado por 4 chancadoras cónicas HP-700 y dos chancadoras cónicas HP-800. El material fino obtenido de las cribas y del triturado por las chancadoras terciarias conforman el producto del proceso de chancado terciario, con un tamaño de 12 – 14 mm (0.47 - 0.55 pulgadas). El producto obtenido de esta etapa es transportado a través de un circuito de fajas como a alimentación al equipo HPGR (High Pressure Grinding Rolls) para la etapa de chancado cuaternario.

Tabla 3*Equipos de la planta de chancado terciario*

Relación de equipos de Chancado Terciario	
04 CHANCADORAS	
Tipo	Conicas Metso HP 700
Motor	700 HP - 93 Amp - 1188 rpm - 4160 Volts
Capacidad	382 TMSH
Set de Descarga	7/16"
% Tiempo Operativo	86%
02 CHANCADORAS	
Tipo	Cónicas Metso HP 800
Motor	800 HP - 100 Amp - 1180 rpm - 4160 Volts - 60Hz
Capacidad	382 TMSH
Set de Descarga	7/16"
% Tiempo Operativo	83%
Zaranda (7' x 14')	
N° Zarandas	4
Tipo	Triple Pendiente Nordberg Paneles 1'x1' abertura 14 mm Zaranda (8' x 16')
N° Zarandas	2
Tipo	Double Deck Nordberg aberturas 133 x 113 y 2 14 x 14 mm
Tipo de forro	Cavidad Fina
Equipos auxiliares	
Faja Horizontal N° 5	60" x 267' - 3700 TMSH - 2.82 - 1.41 m/s - Polines 20°
Faja Inclinada N° 6	54" x 394' - 3700 TMSH - 3.52 m/s - Polines 35°
Faja Inclinada N° 7	54" x 754'-6" - 3700 TMSH - 3.84 m/s - Polines 35° 2 motores de 1750 HP
Faja Horizontal N° 8	54" x 1670' - 3700 TMSH - 3.52 m/s - Polines 35°

Nota: Elaboración propia (Información de los archivos SPCC).

2.8. Chancado cuaternario

Todo el material proveniente de del proceso de chancado terciario es transportado por un sistema de fajas a un silo de carga fresca de 756 TN de capacidad, para que a partir de aquí alimente a través de fajas al HPGR. El HPGR tritura el mineral alimentado mediante un mecanismo de ruptura por compresión interpartículas y entrega un producto de 8 – 10 mm. El material fino es conducido mediante un sistema de fajas transportadoras hacia la tolva de finos para su almacenamiento y alimentación para la etapa de molienda.

Tabla 4

Equipos de la planta de chancado cuaternario

Relación de equipos de Chancado Cuaternario	
HPGR	
Motor	2650 KW
Capacidad	2955 TMSH
Presión Operacional	95 – 165 bar
Gap operacional (apertura de rodillos en descarga)	27 – 30 mm
Diámetro del Rodillo	2.40 m
Longitud del Rodillo	1.65 m
Velocidad Nominal del rodillo	21 RPM
Equipos auxiliares	
Faja Horizontal N°14	95 m largo x 60" ancho x 22.6 mm espesor - 3500TMSH - 2.8 m/s - 100 Kw
Faja Horizontal N°15	30m largo x 72" ancho x 35.6 mm espesor - 3500TMSH - 0.48 m/s - 100 kW
Faja Inclinada N° 16	280 m largo x 60" ancho x 22.6 mm espesor - 3500TMSH - 2.8 m/s - 300 kW
Faja Inclinada N° 17	300 m largo x 60" ancho x 22.6 mm espesor - 3500TMSH - 2.8 m/s - 450 kW
Faja Horizontal N°18	29 m largo x 60" ancho x 22.6 mm espesor- 3500TMSH - 2.8 m/s - 74.6 kW
01 silo de Carga Fresca	756 toneladas - 10.6m. Ø x 12.734m. L

Nota: Elaboración propia (Información de los archivos SPCC).

2.9. Molienda

El mineral almacenado en la tolva de finos alimenta a los molinos a través de sistemas fajas transportadoras. En esta etapa se reduce la granulometría del mineral y se genera la liberación de minerales de cobre y molibdeno. La capacidad molienda diaria es de 60,000 TMSD. La etapa de molienda primaria se realiza a través de 8 molinos de barras de la marca Marcy, con un diámetro de 10 pies y una longitud de 14 pies y un molino de bolas de la marca Fuller que tiene un diámetro de 21 pies y una longitud de 33.5 pies. La etapa de molienda secundaria se efectúa mediante se realiza en 24 molinos de bolas, de los cuales 19 molinos que son de la marca Allis Chalmers que tiene un diámetro de 10.5 pies y una longitud de 13 pies, 04 molinos de la marca Svedala que tiene un diámetro de 10.5 pies y una longitud de 13 pies y 01 molino de la marca Marcy que tiene un diámetro de 10 pies y una longitud de 14 pies. El producto obtenido es un mineral fino en forma de pulpa y con un tamaño promedio de 200 micras es alimentado a la flotación primaria.

Tabla 5

Equipos de la planta de molinos

Relación de equipos de Molienda	
Molinos de barras	
Tipo	8 molinos Marcy 10' x 14' (volumen de barras 41%)
Motor	800 HP - 4160 Volts - 107.6 Amp - 277 rpm
RPM (molino)	19 RPM
% Velocidad Crítica	78.40%
TMSD	48,000
TMSH x molino	250 TMSH
Consumo de agua	0.79 m3/ton (72 % de recuperación de agua)
Consumo general de agua	59.1 m3/min
% Disponibilidad	98.50%
Peso de la barra	205.93 Kg.
Dimensiones (barra)	3" diam. x 13'11¼" Longitud

Carga de barras	69,030 Kg.
32 fajas horizontales Nº9	48" x 109' - 31-93 TPH - 5 HP Velocidad variable Faja 9A: Velocidad fija, 2 fajas por molino Faja 9B : Velocidad variable, 2 fajas por molino
Molino de bolas	
Molino de bolas	19 molinos Allis Challmers 10.5' x 13' 04 molinos SVEDALA 10.5' x 13' 01 molino Marcy 10'x14
Motor	800 HP - 4160 Volts - 107.6 Amp - 277 rpm
TMSH x molino	84 TMSH
% Disponibilidad	98.30%
RPM (molino)	18 RPM
% velocidad crítica	76.10%
Peso Bola 2"	0.595 Kg (Promedio)
Peso Bola 2 1/2"	1.11 Kg. (Promedio)
Proporcion	40% (2") x 60% (2½")
Carga de bolas	51783 Kg Aprox.
Molino de bolas FULLER	
Carga de bolas	388 Ton.
Motor	9500 HP - 180 RPM
Dimensiones	21' de Diámetro * 33.5' Longitud
TMSH	500 TMSH
Velocidad Crítica	76.70%
RPM (molino)	13.05 RPM
Proporcion	70% (3½") 30% (4")
Recarga de bolas	8400 Kg/día aprox.
Consumo específico de bolas	0.7 Kg/TM Aprox.
Fajas 11	7,5 HP - 460V - 10.5A - 1800 RPM - 0.25 m/s - Polines 20° * 5 pulg. Diámetro
Fajas 10	5 HP - 460V - 7.5A - 1800 RPM - 1.40 m/s - Polines 20° * 5 pulg. Diámetro

Nota: Elaboración propia (Información de los archivos SPCC).

Tabla 6*Equipos de clasificación de molienda*

Relación de equipos de clasificación de los molinos de bolas	
Clasificador	
Tipo Hydrociclón	24 hidrociclones (apex 5", vortex 9.5") Krebs D26B
Bomba de alimentación	24 Denver SRL 12" x 10" x 25"
	24 Denver SRL 12" x 10" x 25"
	50 HP - 208-220/440 volt. 137-131/65.5 Amp - 885 rpm
Tipo Hydrociclón	8 hidrociclones (apex 6 1/2", vortex 12") Krebs D26B
Bomba de alimentación	2 ASH Pump 20" x 18"
	1000 HP, 1780 RPM, 4000V, 127A, 93.6% eficiencia

Nota: Elaboración propia (Información de los archivos SPCC).

2.10. Flotación y remolienda

Las leyes promedio del mineral alimentado a la flotación primaria son 0.60% de cobre y 0.030% de molibdeno.

El proceso de flotación permite recuperar los minerales valiosos de cobre y molibdeno, los cuales emergen a la superficie de las celdas de flotación en forma de espuma, formando el concentrado rougher. Los minerales que no son recuperados durante la flotación formarán la cola final o relave de la Concentradora.

El concentrado primario es transportado a través de un sistema de bombeo hacia una etapa adicional de molienda, molinos de marca Marcy que tiene un diámetro de 8 pies y una longitud de 13 pies, donde se genera la etapa de remolienda. El producto obtenido es enviado a las 15 celdas de flotación de limpieza tipo columna.

En las celdas columnas se obtendrá el concentrado final bulk presentando leyes promedio: 26.5 % de Cobre y 1 % de Molibdeno. Este concentrado será dirigido hacia un espesador de 140 pies de diámetro para su acondicionamiento e ingreso a la planta de Molibdeno.

Tabla 7*Equipos de la planta de flotación*

Relación de equipos de Flotación	
Celdas de flotación Rougher de la 1 a la 4 sección	
1 Wemco 130 m3 (motor)	200 HP - 460V - 890 rpm - 246 Amp
1 Outokumpu OK 100 m3 (motor)	180 HP - 440v - 279 Amp - 1790 rpm
6 Wemco No. 190 1500 pies3 (motor)	125 HP - 147 Amp - 1765 rpm - 440 Volts
5ta. Sección	
2 Wemco 130 m3 (motor)	200 HP - 460V - 890 rpm - 246 Amp
4 Wemco 60 m3 (motor)	100 HP - 460v - 121 Amp - 888 rpm
Circuito de Limpieza	
Celda Columna	15 celdas - 8' x 40'
Tipo de inyectoros	Minnovex y SlamJet CPT
Distribuidores de Pulpa	2 - CPT
Circuito de Scavenger	
N° Celdas	3 celdas OK-50, 1 Celda W-60
Motor	100HP-132 Amp -890 rpm -440 Volts
Celdas de 1ra y 4ta Limpieza	48 celdas Agitair N° 48 - 1.13m3, 24 celdas Agitair N° 48 - 1.13m3
Equipos auxiliares	
Tanque centralizado Rougher	1
Tanque centralizado de limpieza	1 con 4 bombas
Espesadores de Intermedios	3

Nota: Elaboración propia (Información de los archivos SPCC).

Tabla 8*Equipos de la planta de remolienda*

Relación de equipos de Remolienda	
08 MOLINOS	
Tipo	Marcy 8' x 13'
Motor	350 HP - 4160 Volts - 47,7 Amp. - 277 rpm
RPM (Molino)	18 RPM
% velocidad crítica	66.40%
% Disponibilidad	62%
Tamaño de bola	1"
Nido de Ciclones	5 (con 5 hidrociclones cada uno)
Hidrociclones	20 Krebs D10B (presión de ingreso 15-20 PSI vortex 4", apex 2", ingreso 4")
Bomba de alimentación	Denver SRL Split Case 12" x 10" x 25"
Motor (bomba)	125 HP - 1765 rpm - 230 / 460 v - 149 / 298 Amp
PRECLASIFICACIÓN	
	8 Krebs DS15 LB
Hidrociclones	Apex 2.75, Vortex 5 1/4" inlet 14 pulg2 Presión de operación: 15 - 16 PSI

Nota: Elaboración propia (Información de los archivos SPCC).

2.11. Planta de procesamiento para molibdeno

El concentrado Cobre – Molibdeno (bulk) es sedimentado en el tanque espesador de 140 pies de diámetro y luego se envía hacia la planta de molibdeno. El concentrado bulk pasa a través de una etapa de flotación selectiva (separación de los minerales de molibdeno y cobre), iniciando por la flotación rougher o primaria que está formada por tres 3 líneas y el concentrado obtenido continúa por nueve etapas de limpieza para obtener así el concentrado final de molibdeno para obtener unas leyes de 55% de Mo y 1% de Cu. La cola final de la flotación primaria se convierte en el concentrado final de cobre y este

será dirigido hacia los 2 tanques espesadores de 100 pies de diámetro, para su acondicionamiento e ingreso a la planta de filtros.

El concentrado final se dirige hacia un filtro a presión de la marca Larox, con el fin de obtener el concentrado final de molibdeno (torta) con una humedad promedio de 7.5 - 8%. Dicho concentrado final se envasa en bolsas hasta obtener un peso bruto de 1,954 Kg.

Tabla 9

Equipos de la planta para el procesamiento de molibdeno

Relación de equipos de Molibdeno	
Tanque / Espesador de concentrado Bulk	
Tanque/Espesador Cu - Mo	1
Tipo	Dorr Oliver de 140' diámetro x 16.5' altura
Motor	7.5 HP - 1750 rpm - 20.4 / 10.2 amp - 220 / 440 V
% Sólidos de Alimento	15 - 20 %
% Sólidos de Descarga	60 - 70 %
Flotación	
Celdas Rougher	30 celdas Wemco de gas inerte 66D 2.83 m3
Circuito de Limpieza	
1ra. Limpieza	5 celdas Wemco de gas inerte 66D 2.83 m3
2da. Limpieza	12 celdas Agitair No. 48 - 40 ft3
3ra. Limpieza	12 celdas Agitair No. 48 - 40 ft3
4ta. Limpieza	8 celdas Agitair No. 48 - 40 ft3
5ta. Limpieza	6 celdas Agitair No. 48 - 40 ft3
6ta. Limpieza	4 celdas Agitair No. 48 - 40 ft3
7ma. Limpieza	2 celdas Columna de 3' x 40'
8va. Limpieza	1 celda Columna de 3.5' x 40'
9va. Limpieza	1 celda Columna de 2' x 40'
Equipos auxiliares	
Filtro LAROX	1 filtro de 4 Placas
Capacidad	40 TMSD

Nota: Elaboración propia (Información de los archivos SPCC).

2.12. Planta de filtros para el concentrado de cobre

El concentrado de cobre es almacenado en 2 espesadores que tienen un diámetro de 100 pies, en los cuales la carga sedimenta para obtener una pulpa con 60% de sólidos. El concentrado espesado es enviado hacia 2 filtros a presión de la marca Larox, con el fin de obtener un concentrado final de cobre (torta) con una humedad promedio de 8.5 - 9% y una ley de cobre de 26.5%. El concentrado final es transportado a través de un sistema de fajas para ser despachados en vagones.

Tabla 10

Equipos de la Planta de filtros para el concentrado de cobre

Relación de equipos de Filtros de cobre	
Filtro Larox de Cobre	
Filtro LAROX PF 60	1 filtro de 10 Placas
Capacidad	600 TMSD
Faja	60" x 87' - 45 TPH - 3 HP - 0.11 m/s - Polines 20°
Filtro LAROX PF 96	1 filtro de 16 Placas
Capacidad	960 TMSD
% Humedad (torta o queque)	9.00%
% sólidos en alimento	60 - 65%
Tanques / Espesador de concentrado de cobre	
Tanque/Espesador Cu	2
Tipo Dorr Oliver	100' diámetro x 13' altura
Motor	5 HP - 13.2/6.6 amp - 1745 rpm 220/440 V
Bomba de Alimentación	Denver SRL - C 5" x 4"
Motor de Bomba	25 HP- 440 volts. - 32.4 amp. - 1755 r.p.m.
% Sólidos de Alimento	38 - 42 %
% Sólidos de descarga	60 - 70 %

Nota: Elaboración propia (Información de los archivos SPCC).

2.13. Espesamiento de los relaves y recuperación de agua

El relave general es enviado hacia 2 espesadores Hi - Rate de gran capacidad y 3 espesadores de alta densidad de la marca Tenova.

El agua recuperada de los espesadores fluye por gravedad hacia dos tanques de paso, y luego es bombeada mediante seis bombas centrífugas hacia dos tanques de almacenamiento que se encuentran conectados, estos tanques tienen una altura de 30 pies cada uno. Desde estos tanques el agua recuperada es reutilizada en la planta concentradora.

El relave sedimentado de los espesadores posee un 60% de sólidos. Estos son transportados hacia la presa de relaves en la planta de Quebrada Honda.

Tabla 11

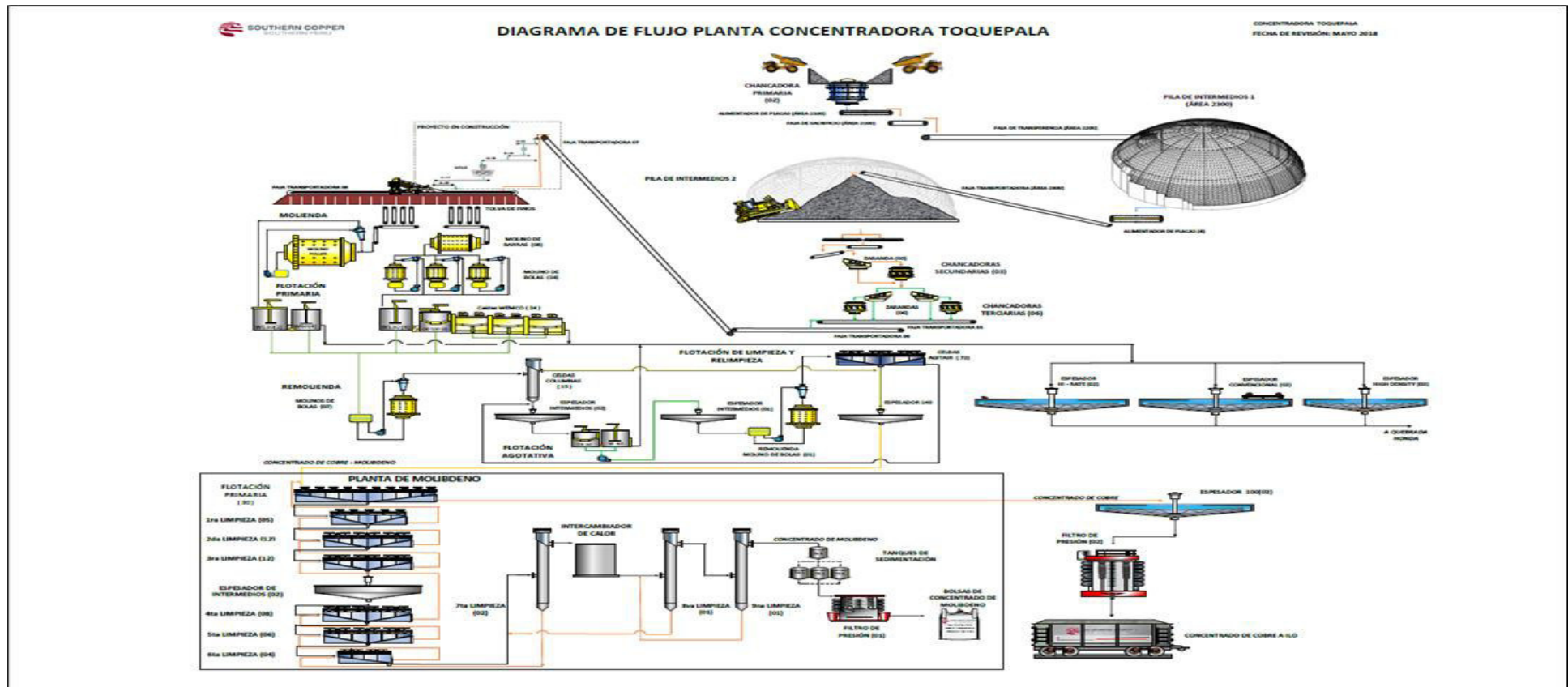
Equipos de la planta de relaves

Relación de equipos de espesadores de Relaves	
Tanques / Espesador de relaves	
	1
Hi Rate Outokumpu	14.5 HP, Suplafo 35 m espesador de alta capacidad 2.8 m de altura
	1
Hi Rate Delkor	43 m diámetro, espesador de alta capacidad
	3
High Density	46 m diámetro, espesador de alta densidad
	2 SH 12" x 10" - 600 HP - 4160v - 70.5Amp - 1785rpm - 18.9m ³ /min
Bombas de agua recuperada	3 SH 14" x 10" - 600 HP - 18.9m ³ /min
	1 Goulds pump

Nota: Elaboración propia (Información de los archivos SPCC).

Figura 5

Diagrama de flujo de la concentradora Toquepala C1



Nota: Archivos SPCC UM. Toquepala.

2.14. Mejora en la sección de molienda

2.14.1. Condiciones actuales en la sección de molienda primaria

Actualmente la adición de barras al molino primario 10'x14' en la Concentradora 1 se realiza a través de los siguientes pasos:

- Se corta la alimentación de mineral fresco al molino, por la parada de los alimentadores de faja. Posteriormente se detiene el sistema de fajas de transporte y cierre de válvulas de agua al molino de barras desde el cuarto de control.
- Parada del molino y sistema de lubricación del molino de barras desde cuarto de control.
- Desenergización y bloqueo del molino desde sala eléctrica.
- Ingreso del cargador de barras por el trunnion de descarga del molino de barras.

Seguidamente, se hacen ingresar los medios moledores (barras) al molino.

Figura 6

Trunnion de descarga de molino



Nota: Southern Perú Copper Corporation (SPCC) (2015).

Figura 7

Cargador de barras.



Nota: Southern Perú Copper Corporation (SPCC)

- Una vez concluido, se retira el cargado de barras del trunnion de descarga del molino de barras.
- Desbloqueo y energización del molino desde sala eléctrica.
- Arranque del molino de barras y sistema de lubricación desde cuarto de control.
- Arranque del sistema de fajas, apertura de válvulas de agua y alimentadores para la alimentación de mineral fresco e ingreso de agua al molino desde el cuarto de control. A continuación, se normalización la operación.

Los pasos en mención se realizan dos veces a la semana a cada uno de los 8 molinos de barras. El tiempo efectivo que toma desde la parada, arranque y normalización de la operación de los molinos es de 25 minutos.

En busca de eliminar el uso de barras, el trabajo de investigación busca cambiar los medios moledores a bolas e incrementar la capacidad de procesamiento del mineral.

2.14.2. Cálculo para la conversión de molino de barras a bolas

Capacidad de procesamiento

Los molinos de barras 10'x14' instalados en la Concentradora 1 tienen una capacidad de diseño de 250 toneladas métricas por hora, por lo tanto, la capacidad por día, mes y por año es el siguiente:

- Para un día de operación.

$$\text{TMPD}=\text{TMPH}*24$$

Donde:

TMPD: Toneladas métricas por día.

TMPH: Toneladas métricas por hora = 250 TM/h.

Remplazando los valores en la fórmula se obtiene el siguiente valor:

$$\text{TMPD}=6,000 \text{ TM/día}$$

- Para un mes de operación.

$$\text{TMPM}=\text{TMPD}*30*\text{Util}$$

Donde:

TMPM: Toneladas métricas por mes.

TMPD: Toneladas métricas por día.

UTIL: Utilización = 98.5%

Remplazando los valores en la fórmula se obtiene el siguiente valor:

$$\text{TMPM} = 177,330 \text{ TM/mes}$$

- Para un año de operación.

$$\text{TMPA} = \text{TMPD} * \text{N} * \text{Util}$$

Donde:

TMPA: Toneladas métricas por año por molino (TM/año)

TMPD: Toneladas métricas por día = 6,000 TMD.

N: Número de días por año = 365 días

UTIL: Utilización = 98.5%

Remplazando los valores en la fórmula se obtiene el siguiente valor:

$$\text{TMPA} = 2,157,150 \text{ TM/año}$$

En 8 molinos sería un total de: 17, 257,200 TM /año. Este tonelaje solo considera el tiempo perdido por el mantenimiento realizado a los molinos, pero no el tiempo perdido durante los agregados de barras que se realizan semanalmente.

El agregado de barras se realiza 2 veces a la semana para cada uno de los 8 molinos de barras. El tiempo que el molino de barras queda parado por cada día de carguío es de 25 minutos.

- Las toneladas métricas anuales que no se muelen para un molino de barras sería:

$$TMNA = TMPH * THRSD * ND * NM$$

Donde:

TMNA: Toneladas Métricas no molidas anuales (TM/año)

TMPH: Toneladas Métricas por Hora = 250 TM/h

THRSD: Tiempo en horas detenido = 0.417 hr/día

ND: Número de días por mes = 8 días/mes

NM: Meses = 12 meses/año

$$TMNA = 10,008 \text{ TM/año}$$

En 8 molinos sería un total de: 80,064 TM /año.

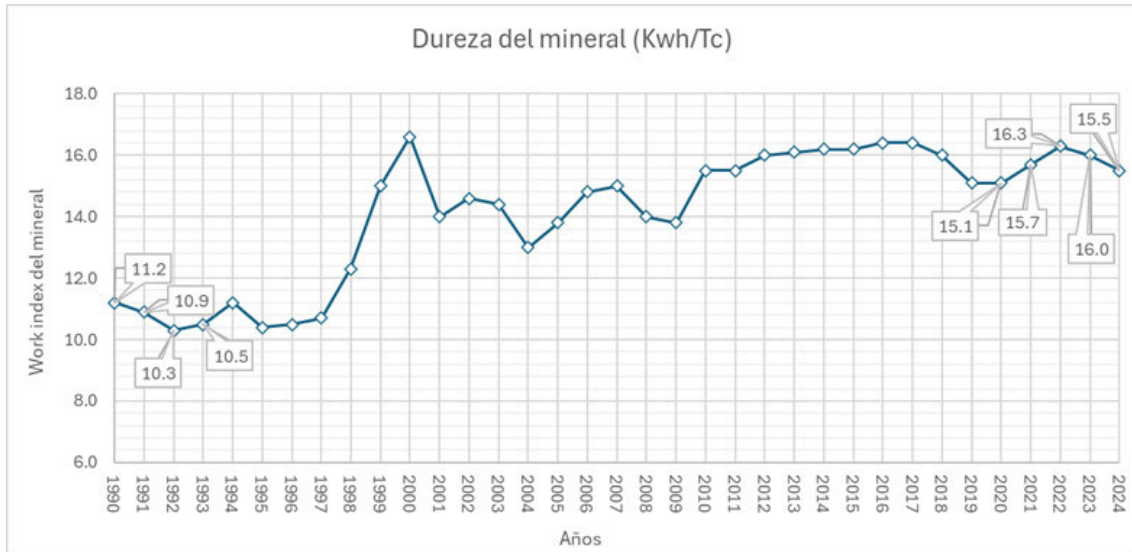
Se concluye que el tonelaje molido anual real que se tiene por los 8 molinos de barras es de: 17,177,136 TM.

2.14.3. Evaluación de la conversión de molinos de barras a molinos de bolas

Para la conversión de los molinos de barras a bolas se evaluará si la potencia del motor instalado y la velocidad crítica del molino son las adecuadas para reducir el tamaño de mineral alimentado utilizando bolas como medios moledores.

Figura 8

Dureza del mineral en el transcurso de los años (U.M Toquepala)



Nota: Elaboración propia (Información de los archivos SPCC).

2.14.4. Potencia Absorbida total del molino de barras

Para calcular la potencia absorbida para reducir el tamaño del mineral nos basaremos en la ley de Bond. El Work Index promedio del mineral de acuerdo con los inicios de operación es de aproximadamente 11.5 KW-h/TC.

$$Pot. Abs. Tol = 10 * Wi prom. * \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) * (TMH) * 1.102311$$

Donde:

$Pot. abs_{total}$: Potencia absorbida total (KW).

Wi_{prom} : Work Index promedio = 11.5 KW-h/TC.

P_{80} : Tamaño de producto = 1,600 μm .

F_{80} : Tamaño de alimentación = 14,500 μm .

$TMPH$: Toneladas procesadas por hora = 250 TM/h.

Remplazando los valores en la fórmula se obtiene el siguiente valor:

$$\text{Pot.Abs.Total}=529.10 \text{ KW.}$$

La potencia instalada del motor del molino debe ser mayor a 529.10 KW o 709 HP.

2.14.5. Velocidad crítica

$$C_s = \frac{76.6}{\sqrt{D}}$$

Donde:

Cs: Velocidad crítica (RPM).

D: Diámetro interno del molino= 10 ft

Remplazando los valores en la fórmula se obtiene el siguiente valor:

$$C_s=24.23 \text{ RPM}$$

2.14.6. Porcentaje de velocidad crítica

$$V_s = \frac{V_o}{C_s} \times 100\%$$

Donde:

Vs: Porcentaje de velocidad crítica (%).

Vo: Velocidad de operación = 19 RPM.

Cs: Velocidad crítica = 24.23 RPM.

Remplazando los valores en la fórmula se obtiene el siguiente valor:

$$V_s=78.41 \%$$

2.14.7. Diámetro máximo de barras

$$R = \frac{(F_{80})^{0.75}}{160} * \left(\frac{W_i * \rho_s}{\%V_s * D^{0.5}} \right)^{0.5}$$

Donde:

R : Diámetro máximo de barra (pulg.).

F_{80} : Tamaño 80% pasante de alimentación = 14,500 μm .

W_i : Índice de trabajo = 11.5 KW-h/TC.

ρ_s : Gravedad específica del sólido = 2.75.

$\%V_s$: Fracción de velocidad crítica = 78.41%.

Remplazando los valores en la fórmula se obtiene el siguiente valor:

$$R=3.0''$$

2.14.8. Potencia del motor del molino de barras

$$P_e = K_R (D)^{3.5} * (\%V_p)^{0.555} * (\%V_s)^{1.505} * (L/D) * E$$

Donde:

P_e : Potencia eléctrica requerida por el motor (HP).

K_B : Constante de proporcionalidad = $3.590 * 10^{-5}$.

D : Diámetro interno del molino = 10 ft.

L : Longitud interna del molino = 14 ft.

$\%V_p$: Volumen interno del molino cargado con barras = 41%.

$\%V_s$: Velocidad crítica del molino = 78.41%.

E: Reducción de potencia por acumulación de barras quebradas = 10 %

Remplazando los valores en la fórmula se obtiene el siguiente valor:

Pe=800 HP

Pe=597 KW

Tabla 12

Parámetros utilizados en el dimensionamiento de los molinos de Barras

Parámetros actuales de los Molinos de Barras		
Utilización	%	98.5
Toneladas métricas por hora	T/h	250
Work Index, Promedio	KW- h/TC	11.5
Gravedad específica del sólido		2.75
F80, Tamaño de Alimentación	µm	14,500
P80, Tamaño de Producto	µm	1,600
Diámetro Interior del Molino	ft	10
Longitud Interior del Molino	ft	14
L/D		1.4
Velocidad crítica	Rpm	24.23
Velocidad de operación	Rpm	19
Fracción de Vel. Crítica	%	0.78
Volumen de carga	%	0.41
Potencia del motor calculado	KW	597
Potencia del motor instalado	HP	800

Nota: Elaboración propia.

Con el Work Index actual se calculará la potencia absorbida por el molino de barras, para ello utilizaremos nuevamente la ley de bond.

El Work Index del mineral se ha incrementado con el pasar de los años en comparación a sus inicios de operación de la Concentradora, siendo el promedio actual de 15.5 KW-h/TC y el F80 del molino de barras se ha reducido por la implementación de los rodillos HPGR que opera en la actualidad. A pesar de ello, se sigue manteniendo el mismo P80 en la descarga del molino.

Tabla 13

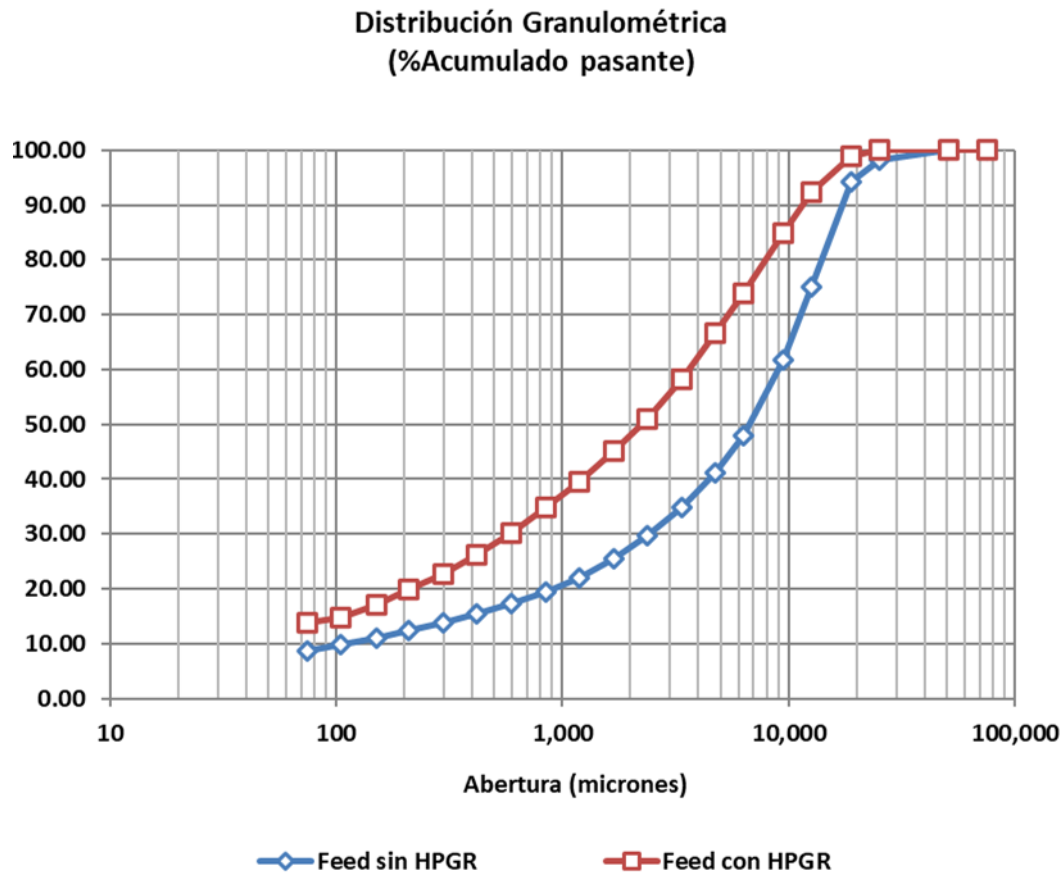
Análisis granulométrico de la alimentación a los molinos de barras con y sin operación del HPGR

Distribución granulométrica (% Acumulado pasante)				
Malla	Abertura (um)	Feed sin HPGR	Feed con HPGR	
3"	76,100	100.00	100.00	
2"	50,800	100.00	100.00	
1"	25,400	98.28	100.00	
3/4"	19,050	94.26	98.94	
1/2"	12,700	75.02	92.27	
3/8"	9,525	61.78	84.95	
1/4"	6,350	47.92	73.83	
4	4,750	41.26	66.71	
6	3,360	34.81	58.28	
8	2,380	29.59	51.01	
10	1,700	25.54	45.01	
14	1,180	22.02	39.47	
20	840	19.48	34.76	
28	595	17.32	30.27	
35	420	15.46	26.19	
48	297	13.82	22.79	
65	210	12.39	19.92	
100	150	11.08	17.13	
150	105	9.80	14.76	
200	74	8.72	13.78	
D80, micras		14,236	8,008	

Nota: Elaboración propia.

Figura 9

Distribución granulométrica de alimentación a los molinos de barras con y sin operación del HPGR



Nota: Elaboración propia.

$$Pot. Abs. Tol = 10 * Wi * \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right) * (TMH) * 1.102311$$

Donde:

$Pot. abs_{total}$: Potencia Absorbida Total (KW).

Wi : Work Index = 15.5 KW-h/TC.

P_{80} : Tamaño de Producto = 1,600 μm .

F_{80} : Tamaño de Alimentación = 8,000 μm .

$TMPH$: Toneladas Procesadas por hora = 250 TM/h.

Remplazando los valores en la fórmula se obtiene el siguiente valor:

Pot.Abs.Tol=590 KW o 791 HP

2.14.9. Diámetro máximo de bolas

$$B = \left(\frac{F_{80}}{K} \right)^{0.5} * \left(\frac{\rho_s * W_i}{\%V_s * D^{0.5}} \right)^{0.34}$$

Donde:

B : Diámetro máximo de bolas (pulg.).

K : Factor para tipo de molienda y circuito = 350.

F_{80} : Tamaño de Alimentación con HPGR = 8,000 μm .

ρ_s : Gravedad específica del sólido = 2.75

W_i : Work Index = 15.5 KW-h/TC.

V_s : Fracción de velocidad crítica = 78.41%.

D : Diámetro interno del molino = 10 ft.

Remplazando los valores en la fórmula se obtiene el siguiente valor:

B=3.0"

2.14.10. Consumo teórico de potencia para molino de bolas

$$P = K_B * D^{3.5} * \%V_p^{0.461} * \%V_s^{1.505} * \left(\frac{L}{D} \right)$$

Donde:

P_e : Potencia eléctrica requerida por el motor (HP).

K_B : Constante de proporcionalidad = $4.365 * 10^{-5}$

V_p : Volumen interno cargado de bolas = 41%.

V_s : Fracción de velocidad crítica = 78.41%.

D : Diámetro interno del molino = 10 ft.

L: Longitud interna del molino = 14 ft.

Remplazando los valores en la fórmula se obtiene el siguiente valor:

Pe=698 HP o 521KW

El molino de Bolas de 10'x14' manteniendo los mismos parámetros de nivel de carga interna y velocidad crítica requiere 698 HP de potencia para moler el mineral, este valor con respecto al consumo de potencia del molino de Barras corresponda dentro del valor operativo actual.

2.14.11. Velocidad crítica

La velocidad crítica de los molinos de barras instalados es de 24.23 RPM y su velocidad de operación es de 19 RPM dando un porcentaje de velocidad crítica de 78.41%. Teóricamente la velocidad crítica de un molino de Bolas debe encontrarse en el rango de 70 – 80% del porcentaje de velocidad crítica; por lo tanto, la velocidad operacional del molino de Barras no necesita modificación para operar como molino de Bolas.

2.14.12. Velocidad angular del motor de molino de barras

Las características del motor eléctrico empleados en los molinos de Barras son las siguientes: Potencia instalada es de 800 HP, voltaje de 4160 V, 60 HZ y 277 RPM. Además, el motor tiene un sistema de transmisión síncrono (motor – acople – piñón).

Figura 10

Característica del motor eléctrico del molino de barras

TECO-WESTINGHOUSE MOTOR COMPANY				ALTITUDE: UP TO 3200 METERS			
CALCULATED MOTOR PERFORMANCE				AMBIENT: 0 C TO 40 C			
SHOP ORDER: 3463AA				CUSTOMER: TWMM			
EXCITATION: SLIP RINGS				APPLICATION: BALL MILL			
HP	800	P.F. 0.80	RPM	277	POLES	26	
VOLTS	4160	PHASES 3	HZ	60	AMPS	110	SF 1.00

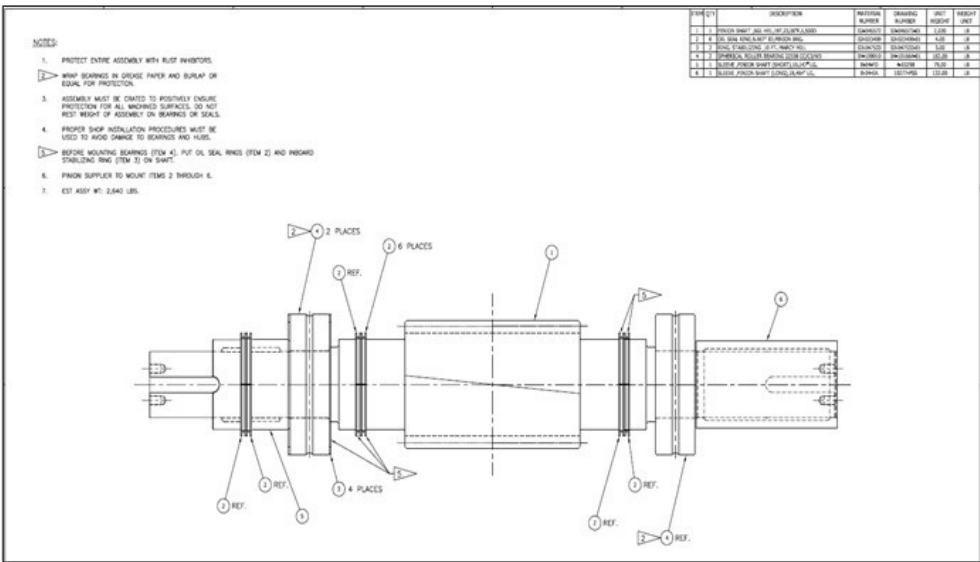
Nota: Archivos SPCC UM Toquepala.

2.14.13.Evaluación del Piñón del molino instalado

El piñón del molino de barras tiene 19 dientes y la catalina o corona tiene 275 dientes, para determinar si el piñón instalado es el adecuado para obtener la velocidad de operación requerida para el molino de bolas evaluaremos la velocidad angular de la catalina.

Figura 11

Piñón y acople del molino de barras



Nota: Archivos SPCC UM Toquepala.

$$w_c * N_c = w_p * N_p$$

Donde:

W_c : Velocidad angular de la catalina (Velocidad operacional RPM).

N_c : Número de dientes de la catalina = 275 dientes

W_p : Velocidad angular del motor síncrono (RPM) = 277 RPM.

N_p : Número de dientes del Piñón = 19 dientes.

Remplazando los valores en la fórmula se obtiene el siguiente valor:

$$W_c \times N_c = W_p \times N_p$$

$$W_c \times 275 = 277 \times 19$$

$$W_c = 19.13 \text{ RPM.}$$

Por lo tanto, la velocidad angular de la catalina o velocidad de operacional del molino es 19 RPM, valor que se encuentra dentro del rango de velocidad crítica para la molienda.

Tabla 14

Resumen comparativo de velocidades críticas de molino de barras y bolas 10'X14'

Parámetro	Molino de barras	Molino de bolas
Velocidad operacional	19 RPM	19 RPM
Velocidad crítica	78.41%	78.41%

Nota: Elaboración propia.

En la siguiente tabla se resume la comparación de los parámetros para molienda con barras y molienda con bolas.

Tabla 15*Resumen comparativo de parámetros del molino de barras y bolas 10'X14'*

Parámetros	Unidad	Molienda con Barras	Molienda con Bolas
Utilización	%	98.5	98.5
Toneladas métricas por hora	t/h	250	250
Work Index, Promedio	Kw-h/Tc	15.5	15.5
Gravedad específica del sólido		2.75	2.75
F80, Tamaño de Alimentación	µm	8,000	8,000
P80, Tamaño de Producto	µm	1,600	1,600
Diámetro Interior del Molino	ft	10	10
Longitud Interior del Molino	ft	14	14
L/D		1.4	1.4
Velocidad crítica	rpm	24.23	24.23
Velocidad de operación	rpm	19	19
Fracción de Vel. Crítica	%	0.78	0.78
Volumen de carga	%	0.41	0.41
Potencia del motor calculada	KW	597	521
Diámetro medio moledor	pulg.	3.0	3.0

Nota: Elaboración propia.

Con los datos de muestreo que se tomaron, se realizó una simulación de la molienda primaria para la conversión de los molinos de barras a bolas con el software JK SIMMET obteniéndose los siguientes resultados.

Tabla 16

Resumen comparativo de parámetros metalúrgicos con la conversión de molino de barras y bolas 10'X14'

Descripción	Unidad	M. Barras SIM	M. Bolas SIM
Alimentación fresca de mineral	ton/hr	249.8	249.8
% Solidos descarga	%	79.6	79.6
F80 Alimentación molino	μm	8008	8008
P80 Descarga molino	μm	1522	1750
Ratio de reducción del D80		5.3	4.6
WIo, KWh/TC		15.5	15.5

Nota: Elaboración propia.

Tabla 17

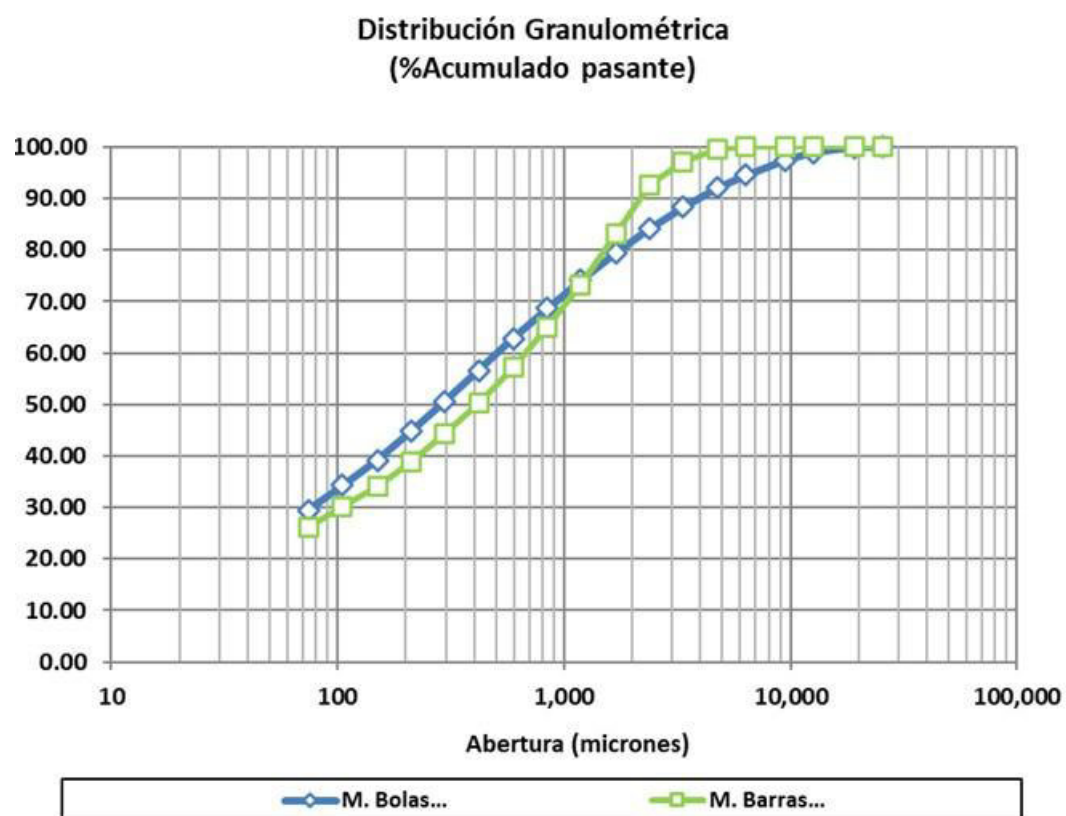
Análisis granulométrico comparativo de la descarga del molino de barras y bolas 10'X14'

Distribución granulométrica (% Acumulado pasante)			
Malla	Abertura (um)	M. Bolas SIM	M. Barras SIM
1"	25,400	100.00	100.00
3/4"	19,050	99.87	100.00
1/2"	12,700	98.86	100.00
3/8"	9,525	97.44	100.00
1/4"	6,350	94.55	99.99
4	4,750	92.04	99.60
6	3,360	88.33	97.06
8	2,380	84.10	92.68
10	1,700	79.55	83.14
14	1,180	74.19	73.23
20	840	68.72	64.91
28	595	62.86	57.34
35	420	56.56	50.25
48	297	50.63	44.29
65	210	44.72	38.85
100	150	39.14	34.09
150	105	34.24	30.12
200	74	29.45	26.13
D80, micras		1,750	1,522

Nota: Elaboración propia.

Figura 12

Curva granulométrica comparativo del molino de barras y el molino de bolas 10'X14'



Nota: Elaboración propia.

CAPÍTULO III:

Conclusiones

- Se incrementa 80,064 TM el tonelaje procesado anual en la etapa de molienda primaria, cambiando los molinos de barras a bolas.
- Se puede reemplazar los medios moledores de los molinos de barras por bolas de 3.0” manteniendo el %velocidad crítica actual y el volumen de carga.
- De acuerdo con la evaluación realizada al piñón y catalina de los molinos de barras, no se requiere realizar ninguna modificación.
- El incremento del tonelaje molido anual permite incrementar la producción de concentrado de cobre en 1667 TM y 32 TM de molibdeno.
- Con el incremento de la producción de concentrado de cobre y molibdeno anual, se estima una ganancia adicional de \$4539028 por cobre y de \$1032564 por molibdeno.

CAPÍTULO IV:

Recomendaciones

- Realizar un estudio mecánico del estado de los componentes y sistema de transmisión de los molinos primarios, para la conversión del molino de barras a bolas.
- Evaluar el estado de la clasificación de los hidrociclones de los molinos secundarios después de la conversión de los molinos de barras a bolas.
- Diseñar un chute de transferencia, para el ingreso de los nuevos medios moledores (bolas 3" Ø) luego de la conversión de molino de barras a bolas.

CAPÍTULO VI: Referencias Bibliográficas

- King, R. P. (2001). *Modeling and Simulation of Mineral Processing Systems*. Oxford: Butterworth-Heinemann.
- Lynch, A. J. (2015). *Mineral Crushing and Grinding Circuits: Their Simulation, Optimisation, Design and Control*. Amsterdam: Elsevier.
- Ministerio de Energía y Minas del Perú (MINEM). (2022). *Anuario Minero 2022*. Lima: Dirección General de Promoción y Sostenibilidad Minera.
- Oswaldo, C., & Peres, A. E. C. (2020). *Principios de flotación de minerales sulfurados de cobre*. *Revista Latinoamericana de Metalurgia y Materiales*, 40(3), 123–137.
- Pérez, L., & Gutiérrez, M. (2021). *Optimización energética en plantas concentradoras de cobre del sur del Perú*. *Revista Peruana de Ingeniería Metalúrgica*, 28(1), 31–47.
- Society for Mining, Metallurgy and Exploration (SME). (2022). *SME Mining Engineering Handbook* (3rd ed.). Colorado: SME Publishing.
- Southern Copper Corporation. (2023). *Informe anual 2023: Operaciones de la mina y planta concentradora Toquepala*. Lima: Southern Peru Copper Corporation. Recuperado de <https://www.southernperu.com>
- Taggart, A. F. (2011). *Handbook of Mineral Dressing: Ores and Industrial Minerals*. New York: John Wiley & Sons.
- Tavera, R., & Huamán, J. (2019). *Evaluación metalúrgica del circuito de molienda y flotación en la planta concentradora Toquepala*. *Revista Ingeniería y Desarrollo Minero*, 5(2), 45–59.

Wills, B. A., & Finch, J. (2016). *Wills' Mineral Processing Technology: An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery* (8th ed.). Oxford: Butterworth-Heinemann.

CAPÍTULO VII: Anexos

Figura 13

Punto de descarga a las chancadoras giratorias 1 y 2



Nota: Archivos SPCC UM Toquepala C1.

Figura 14

Ubicación del volquete para la descarga hacia las chancadoras



Nota: Imagen extraída de internet.

Figura 15

Rompedor de rocas



Nota: Imagen extraída de internet.

Figura 16

Pila de intermedios 1 y 2



Nota: Archivos SPCC UM Toquepala C1.

Figura 17

Rodillos HPGR



Nota: Archivos SPCC UM Toquepala C1.

Figura 18

Sección de molienda primaria y secundaria



Nota: Archivos SPCC UM Toquepala C1.

Figura 19

Celdas de flotación Rougher



Nota: Archivos SPCC UM Toquepala C1.

Figura 20

Molinos de Remolienda



Nota: Archivos SPCC UM Toquepala C1.

Figura 21

Celdas de flotación



Nota: Archivos SPCC UM Toquepala C1.

Figura 22

Llenado de bolsas de molibdeno



Nota: Archivos SPCC UM Toquepala C1.

Figura 23

Planta de filtros de cobre



Nota: Archivos SPCC UM Toquepala C1.

Figura 24

Filtro Larox PF-96



Nota: Archivos SPCC UM Toquepala C1.

Figura 25

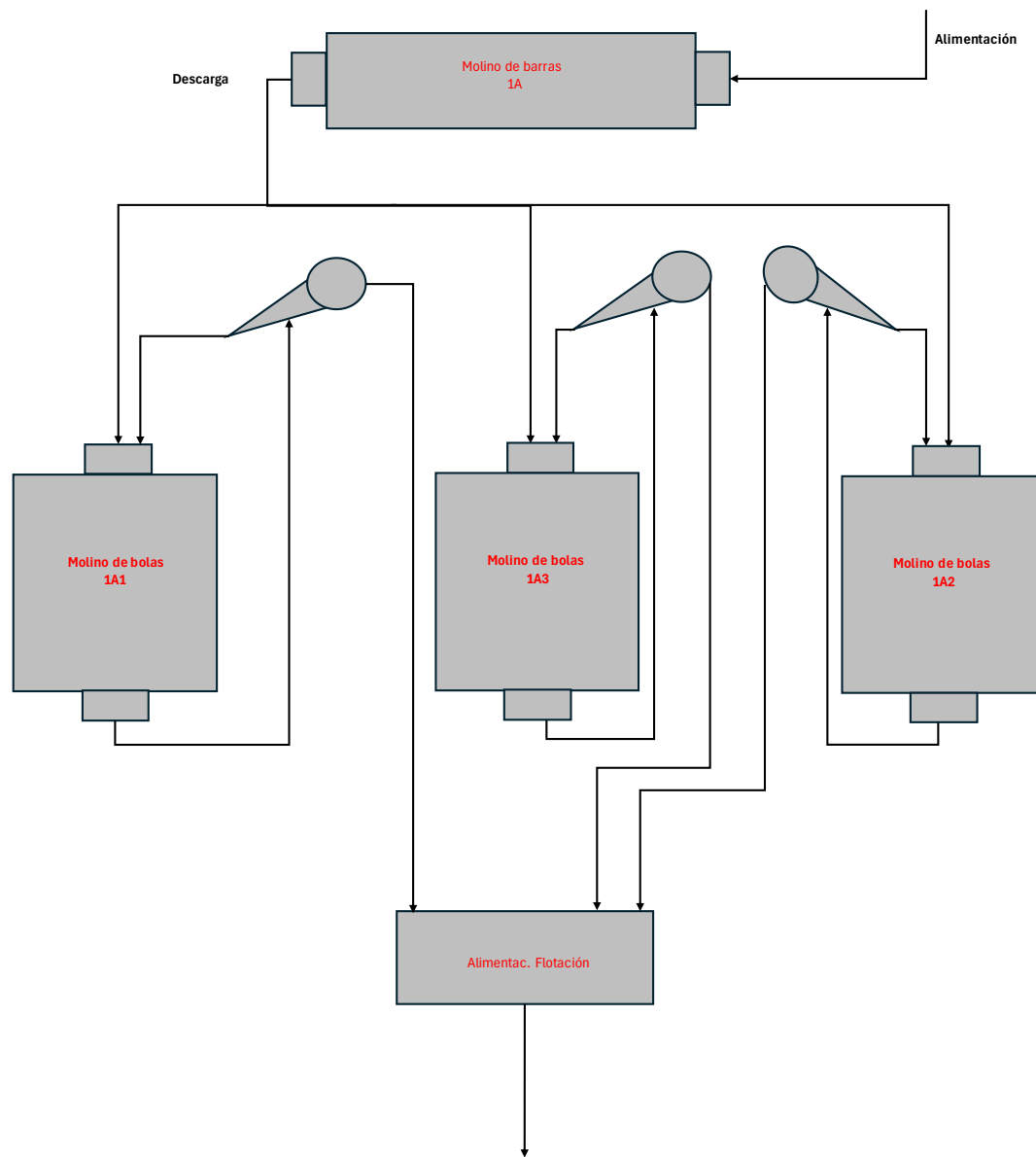
Planta de relaves



Nota: Archivos SPCC UM Toquepala C1.

Figura 26

Sección 1A de molienda Primaria y Secundaria C1



Nota: Elaboración propia (Información de los archivos SPCC).