

UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS Y METALÚRGICA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



MODALIDAD DE SERVICIOS COMO PROFESIONAL

INFORME:

PROCESOS Y MEJORAS EN EL ÁREA DE MOLIENDA DE
LA PLANTA CONCENTRADORA – MINERA LAS BAMBAS

PRESENTADO POR EL BACHILLER: WILSON ARENAS FARFÁN

PARA OPTAR AL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
METALÚRGICO

CUSCO - 2019

DEDICATORIA

A mis padres Walter Arenas y Marisol Farfán; quienes con su amor, paciencia y esfuerzo me han permitido llegar a cumplir hoy un sueño más. Gracias, por inculcar en mí el ejemplo de esfuerzo y valentía.

A mis hermanos Yeltsin y Siwar; por su cariño y apoyo incondicional, por estar conmigo en todo momento gracias.

A toda mi familia porque con sus oraciones, consejos y palabras de aliento hicieron de mí una mejor persona y que de alguna u otra manera me acompañan en todos mis sueños y metas.

Wilson Arenas Farfán

AGRADECIMIENTOS

A mi alma mater la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco, a la escuela profesional de Ingeniería Metalúrgica por haberme acogido e inculcado los conocimientos para una buena formación profesional.

A la empresa Minera Las Bambas – Gerencia Planta Concentradora / Superintendencia de Operaciones, por haberme brindado la oportunidad de realizar mis prácticas profesionales y luego continuar con mi desempeño profesional, para así poder conocer y desarrollar en los diferentes procesos que en la empresa se realiza dentro de los estándares nacionales e internacionales. Muchas gracias por la confianza.

Al excelente grupo de profesionales y trabajadores de la empresa Minera Las Bambas, por los consejos y guía brindada a mi persona, contribuyendo enormemente en mi formación profesional y personal.

A mis amigos, compañeros de universidad y compañeros de trabajo, quienes me apoyaron y permitieron entrar en su vida durante los años de estudio universitario, y experiencias compartidas en el trabajo. Muchas gracias por la confianza y amistad que me brindaron.

Wilson Arenas Farfán

PRESENTACIÓN

SEÑOR DECANO DE LA FACULTAD DE INGENIERÍA GEOLÓGICA, MINAS METALÚRGICA, SEÑORES CATEDRÁTICOS MIEMBROS DEL JURADO:

En cumplimiento del reglamento de Grados y Títulos vigente en la facultad, y con el objetivo de optar al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico, en la modalidad de servicios como profesional, pongo a vuestra disposición el informe de trabajo intitulado:

“PROCESOS Y MEJORAS EN EL AREA DE MOLIENDA DE LA PLANTA CONCENTRADORA – MINERA LAS BAMBAS”.

El informe ha sido elaborado en mi condición de personal nombrado de la empresa Minera Las Bambas, en cuya institución vengo laborando ininterrumpidamente, por más de 5 años consecutivos.

Esta condición me permite acogerme a optar al Título Profesional por la modalidad de servicios como profesional. Con los requisitos que exige el reglamento para esta modalidad, que contempla desarrollar alguna actividad de carácter crítico que aporte a los fines del empleador y para la sociedad en su conjunto.

Por lo anterior manifestado, señores miembros del Jurado, con el presente informe de trabajo espero cumplir las exigencias requeridas y ameritar vuestra aceptación y consideración en mi condición de aspirante al Título Profesional de Ingeniero Metalúrgico.

Cusco, julio de 2019.

Wilson Arenas Farfán

Bachiller en Ingeniería Metalúrgica

RESUMEN

El presente informe se ha esquematizado en tres capítulos los cuales paso a describir brevemente. En el primer capítulo se ha denominado Generalidades, se menciona datos relevantes de la reseña histórica desde 1911 hasta la actualidad, también se menciona la ubicación, la mineralización, sobre la empresa temas como el estándar, visión y misión; así como los objetivos que nos planteamos en este informe. En el segundo capítulo denominado Marco Teórico, inicialmente se realiza las definiciones de los distintos términos y conceptos que nos serán útiles para una mejor comprensión en el desarrollo del informe, seguidamente en el mismo capítulo se realiza la descripción de las distintas etapas del área que nos ocupamos que es molienda; los cuales son recuperación de mineral, molienda SAG y molino de bolas y chancado pebbles. Finalmente se menciona en el tercer capítulo las mejoras que se han implementado como son las etapas de molienda precisamente en la zaranda vibratoria para mejorar la clasificación y en el área de chancado pebbles haciendo una evaluación de los revestimientos; esto con la finalidad de poder aumentar la capacidad de tratamiento del área.

ABSTRACT

This report has been outlined in three chapters which I will briefly describe.

In the first chapter it has been called Generalities, relevant data from the historical review is mentioned from 1911 to the present, it also mentions the location, mineralization, about the company issues such as standard, vision and mission; as well as the objectives that we set out in this report. In the second chapter called Theoretical Framework, initially the definitions of the different terms and concepts that will be useful for a better understanding in the development of the report are made, then in the same chapter the description of the different stages of the area that we are we occupy that it is grinding; which are ore recovery, SAG grinding and pebbles crushing and ball mill. Finally, mention is made in the third chapter of the improvements that have been implemented, such as the grinding stages, precisely in the vibrating railing to improve the classification and in the area of pebbles crushing, making an evaluation of the coatings; this in order to increase the treatment capacity of the area.

ÍNDICE

| | |
|---|-----|
| DEDICATORIA | ii |
| AGRADECIMIENTOS | iii |
| PRESENTACIÓN..... | iv |
| RESUMEN | v |
| ABSTRACT..... | vi |
| ABREVIATURAS..... | ix |
| CAPÍTULO 1 GENERALIDADES | 1 |
| 1.1. Reseña histórica de Las Bambas..... | 1 |
| 1.2. Ubicación | 3 |
| 1.3. Mineralización | 4 |
| 1.4. MMG operador de Las Bambas..... | 4 |
| 1.5. Estrategia y estándares de MMG..... | 4 |
| 1.6. Visión y misión de MMG | 5 |
| 1.7. Objetivo general..... | 5 |
| 1.8. Objetivo específico | 5 |
| CAPÍTULO 2 MARCO TEÓRICO..... | 6 |
| 2.1. Conminución de minerales | 6 |
| 2.2. Mecanismos de reducción de tamaños de partículas | 6 |
| 2.2.1 Impacto | 6 |
| 2.2.2 Atrición o frotación..... | 7 |
| 2.2.3 Corte o presión..... | 7 |
| 2.2.4 Compresión..... | 7 |
| 2.3. Tamaño característico | 7 |
| 2.4. Finalidad de la reducción de tamaño | 7 |
| 2.5. Consumo específico de energía | 8 |
| 2.6. Molienda de minerales..... | 8 |
| 2.7. Velocidad crítica..... | 9 |

| | |
|--|-----------|
| 2.8. Movimiento de catarata y cascada | 9 |
| 2.9. Volumen de carga | 10 |
| 2.10. Molino semiautogeno..... | 10 |
| 2.11. Partes del molino SAG..... | 11 |
| 2.12. Molino de bolas..... | 13 |
| 2.13. Partes del molino de bolas | 14 |
| 2.14. Zaranda. | 16 |
| 2.15. Chancado de pebbles..... | 17 |
| 2.16. Partes de chancadora de pebbles..... | 17 |
| 2.17. Ciclón..... | 19 |
| 2.18. Descripción de la planta concentradora Las Bambas | 20 |
| 2.19. Descripción general del área de molienda | 21 |
| 2.20. Recuperación de mineral grueso..... | 22 |
| 2.21. Proceso de molienda | 23 |
| 2.22. Chancado pebbles | 24 |
| CAPÍTULO 3 IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS EN EL ÁREA DE MOLIENDA | 26 |
| 3.1. Implementación de mejora en la zaranda vibratoria | 26 |
| 3.2. Evaluación de zaranda vibratoria..... | 26 |
| 3.3. Evaluación de revestimientos de chancadoras de pebbles..... | 36 |
| 3.4. Antecedentes | 37 |
| 3.5. Desarrollo de la evaluación..... | 37 |
| 3.6. Tiempo de asentamiento de revestimientos. | 38 |
| 3.7. Tiempo de duración de revestimientos | 39 |
| 3.8. Ratio de reducción – muestreos | 39 |
| 3.9. Evaluación económica | 40 |
| CONCLUSIONES | 42 |
| BIBLIOGRAFIA | 44 |
| ANEXOS | 45 |

ABREVIATURAS

| | |
|-------|--|
| µm: | Micrometros o micras, unidad de longitud. |
| ASTM: | Por sus siglas en ingles, sociedad americana para pruebas y materiales. |
| CSS: | Close size setting por sus siglas en ingles, abertura por el que pasa el producto de las chancadoras. |
| EGL: | Por sus siglas en ingles, diametro efectivo de molienda. |
| EIA: | Estudio de impacto ambiental. |
| F80: | Es el tamaño de tamiz que deja pasar el 80% de particulas de alimentación del circuito. |
| HP: | Caballo de fuerza por sus siglas en ingles, unidad de media de potencia. |
| KW: | Kilowatt, unidad de potencia. |
| MMG: | Por sus siglas en Ingles, minerals and metals group. |
| MW: | Megawatts, unidad de potencia. |
| O/F: | Sobre flujo o rebose cuando se refiere a pulpas. |
| O/S: | Sobre tamaño de zaranda . |
| P80: | Es el tamaño de tamiz que deja pasar el 80% de particulas producto del circuito. |
| pies: | Unidad de longitud basado en el sistema ingles. |
| PSI: | Libra por pulgada cuadrada, unidad de presion en el sistema ingles. |
| RPM: | Revolución por minuto, unidad de frecuencia que se usa tambien para expresar velocidad angular. |
| SAG: | De sus siglas semiautógeno, referido a un tipo de molienda y por tanto molino. |
| t/d: | Toneladas por día, flujo masico. |
| t/h: | Toneladas por hora, flujo masico. |
| T80: | Es el tamaño del tamiz que deja pasar el 80% de las particulas de transferencia de un circuito a otro. |
| U/S: | Bajo tamaño o pasante de zaranda. |

LISTA DE TABLAS

| | |
|---|----|
| Tabla 1. Capítulo 3: Resultados de Parámetros | 30 |
| Tabla 2. Capítulo 3: Tiempo de asentamiento – pebbles 2 y pebbles 3..... | 38 |
| Tabla 3. Capítulo 3: Tiempo de duración promedio pebbles 2 y pebbles 3..... | 39 |
| Tabla 4. Capítulo 3: Resumen de muestras de chancadoras de pebbles..... | 40 |
| Tabla 5. Capítulo 3: Cálculo de ingreso por mayor tratamiento..... | 41 |

LISTA DE FIGURAS

| | |
|---|----|
| Figura 1. Mecanismos de reducción de tamaño | 6 |
| Figura 2. Característica de la carga interna de un Molino | 10 |
| Figura 3: Vista perfil de revestimientos de molino (elevadores)..... | 12 |
| Figura 4. Partes del molino SAG | 12 |
| Figura 5. Fotografía de descarga de molino de bolas | 13 |
| Figura 6. Fotografía de descarga de molino bolas. | 14 |
| Figura 7. Partes del molino de bolas..... | 15 |
| Figura 8. Partes de zaranda | 17 |
| Figura 9. Partes de chancadora cónica de pebbles..... | 19 |
| Figura 10. Corte transversal de ciclón. | 20 |
| Figura 11. Fotografía panorámica del área de Molienda. | 21 |
| Figura 12. Diagrama del área de molienda. | 22 |
| Figura 13. Diagrama del chancado de pebbles. | 25 |
| Figura 14. Diagrama del circuito molino y zaranda. | 27 |
| Figura 15. Comparación de tonelaje alimentado y tamaño fino -1 pulg. de línea N° 1..... | 28 |
| Figura 16. Comparación de tonelaje alimentado y tamaño fino -1 pulgada de la línea N° 2 | 29 |
| Figura 17. Comparación de carga circulante y sobretamaño de la línea N° 1..... | 31 |
| Figura 18. Comparación de carga circulante y over screen de la línea N°2. | 32 |
| Figura 19. Comparación de tamaño pasante de 13mm en over screen de línea N° 1 y 2. | 33 |
| Figura 20. Comparación de over flow de ciclones en la línea N°1..... | 35 |
| Figura 21. Comparación de over flow de ciclones en la línea N° 2..... | 36 |
| Figura 22. Esquema de tipos de revestimientos de chancadora pebbles..... | 37 |

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1. Reseña histórica de Las Bambas

La concesión minera Las Bambas fue descubierta en 1911 por la empresa Ferrobamba Limited Company, quien lleva a cabo estudios geológicos y perforaciones iniciales, abandonando las concesiones en 1934.

En 1942 la empresa Cerro de Pasco Corporation, obtiene los derechos sobre las concesiones y durante los siguientes años continuó la exploración y perforación. Esta empresa realiza el primer estudio de estimación de reservas del prospecto Chalcobamba en 1966, reportando 27.8 millones de toneladas de mineral prospectivo con leyes de 2.1% de cobre.

En octubre de 1970, las concesiones revierten al Estado Peruano, manteniéndose así por más de 30 años.

En 1972, los Derechos Estatales Especiales de Ferrobamba y Chalcobamba fueron asignados a la empresa estatal Minero Perú.

En 1977 se asigna también a esta empresa los Derechos Estatales Especiales del “Área de influencia de las Unidades Económicas Administrativas Ferrobamba - Chalcobamba”.

En 1991 los Derechos Especiales se convierten en 21 concesiones mineras.

Entre 1996 y 1997, Minero Perú firma acuerdos de exploración con Minera Antacori Corp. (Cyprus), Minera Phelps Dodge del Perú, Minera Teck Peru y BHP Tintaya Exploration Inc., bajo tales acuerdos, se completaron 25 perforaciones diamantinas (DDH), con avance de 4223 metros, en Chalcobamba y Ferrobamba.

En el año 2000, Minero Perú se integra a Centromin Perú (otra empresa estatal). Como parte de la política de privatización del Gobierno Peruano, la Agencia de Promoción de la Inversión (Pro-inversión) somete a licitación para exploración minera, al complejo minero Las Bambas que

comprende los yacimientos de Chalcobamba, FerroBamba, Sulfobamba y Charcas, con un área de concesión minera de 35000 hectáreas. Como parte de este concurso, Pro-inversión programa en la segunda mitad del 2003, una nueva campaña de perforaciones con el propósito de proveer de información a las partes pre-calificadas que no exploraron el área entre los años 1996 y 1997.

En esta campaña de perforación se realizaron 11 perforaciones (2328 metros) para actualizar información. Asimismo, en el mes de setiembre se realizó la suscripción al convenio de Promoción de la Inversión privada en Apurímac (Gobierno Regional – Ministerio de Energía y Minas – Pro-inversión).

Es así que de 14 postulantes precalificados y en subasta pública el 31 de agosto de 2004, se adjudicó la buena pro a Xstrata Copper S.A. para desarrollar el Proyecto de Exploración Minera Las Bambas ofreciendo 121 millones de dólares americanos, el triple del precio base.

El año de 2010 se realiza la audiencia pública del Estudio de Impacto Ambiental (EIA) en el distrito de Challhuahuacho, provincia de Cotabambas, Región Apurímac. El 2 de setiembre del mismo año, culminada ya la fase exploratoria, se suscribió el contrato que se le transfiere la titularidad de las concesiones mineras del proyecto, entre el Estado Peruano y Xstrata Copper S.A. con una inversión de 4200 millones de dólares americanos.

En el año 2011 el estado aprueba el EIA, luego de un amplio proceso de participación ciudadana. Se informa el incremento del recurso mineral de Las Bambas en 10 %, equivalente a 1.710 millones de toneladas con una ley de cobre de 0,60 %.

En el año 2012 se desarrolla la ingeniería de caminos y componentes principales para el arranque de la futura operación. Se inicia el mejoramiento de la carretera Las Bambas – Espinar y se tiene comprometido más del 60 % de la inversión en construcción.

En el año 2013 Glencore se convierte en propietaria de Las Bambas en el marco de la adquisición de Xstrata. En el proyecto el avance de construcción es del 65% de los caminos pioneros, 40% de la planta concentradora y 95 % del mejoramiento de la carretera Las Bambas - Espinar.

En el año 2014 se presenta la modificación del EIA para permitir el transporte de cobre por carretera. El consorcio compuesto por MMG Limited, Guoxin International Investment Co. Ltd. y CITIC Metal Co. Ltd. adquiere Las Bambas.

En el año de 2015 se logra la primera producción de concentrado de cobre como parte de las actividades de comisionamiento. Se llevan a cabo las etapas de comisionamiento e incremento gradual de la producción para alcanzar el nivel de producción plena. Así mismo en el año 2016 se realiza el primer embarque de concentrado y se da inicio a la operación comercial.

En el año 2017 se tiene el primer año completo de producción comercial. La producción supera 450 000 toneladas de cobre en concentrado.

En el año 2018 se presenta y logra la aprobación de la tercera modificatoria del EIA y se da inicio de estudios exploratorios de la zona oeste de la concesión.

1.2. Ubicación

La Unidad Minera Las Bambas, se ubica a aproximadamente a 75 kilómetros al Suroeste de la ciudad de Cusco y 300 kilómetros al noroeste de la ciudad de Arequipa, como se puede visualizar en el mapa que se tiene en el Anexo A.

En el área de Las Bambas se ubican los tres yacimientos que serán explotados por el método a cielo abierto, la planta concentradora, los botaderos de material estéril, el depósito de relaves, los campamentos y demás instalaciones auxiliares.

Políticamente el área Las Bambas se ubica entre los distritos de Challhuahuacho, Tambobamba y Coyllurqui, provincia de Cotabambas, y el distrito de Progreso, provincia de Grau, en el departamento de Apurímac.

La Operación considera el transporte de concentrado vía terrestre por camiones desde Las Bambas hacia una estación de transferencia ubicada en Pillones (a cargo de un tercero), a través de una

carretera de uso público, y luego será transportado por vía férrea hasta el puerto de Matarani. (SNC-Lavalin Perú, 2018)

1.3. Mineralización

La mineralización que se tiene en Las Bambas es del tipo pórfido de cobre – molibdeno (Cu-Mo), el mineral más común es la calcopirita que es un sulfuro cuya fórmula química es: $CuFeS_2$, además se tiene presencia de oro y plata asociados con cobre, además de bornita (formula química: Cu_5FeS_4), pirita (formula química: FeS_2) y presencia de molibdenita (formula química: MoS_2).

Los minerales que se presentan en los yacimientos identificados son:

Ferrobamba: bornita, calcopirita y molibdenita.

Chalcobamba: calcopirita.

Sulfobamba: calcopirita y molibdenita.

La mineralización de sulfuros de cobre y molibdeno en estos yacimientos, aparecen diseminados, en venillas de cuarzo.

1.4. MMG operador de Las Bambas

Desde el 2014, Las Bambas forma parte de un consorcio que reúne a las empresas MMG Limited, Guoxin International Investment y CITIC Metal cuya participación mayoritaria del más del 62% del consorcio es de MMG.

MMG es una empresa global de recursos del nivel medio que opera y desarrolla proyectos de cobre, zinc y metales base; Cuenta con operaciones en Australia, República Democrática del Congo, República Democrática de Lao y La Republica del Peru. También cuenta con proyectos de exploración y alianzas en Australia, África y América. (MMG-Lasbambas, 2016)

1.5. Estrategia y estándares de MMG.

La empresa define de la siguiente manera las estrategias y estándares: “En Las Bambas, operamos de acuerdo con los estándares, procesos y sistemas de MMG, además de procedimientos

específicos de cada sitio adecuados a nuestro contexto operativo y entorno regulatorio. Asimismo, el cumplimiento de la legislación nacional es fundamental en nuestra actuación y toma de decisiones”. (Las Bambas, 2019)

1.6. Visión y misión de MMG

La empresa ha definido su visión de la siguiente manera:

Construir la empresa diversificada de metales base más respetada del mundo.

Y como Misión de la siguiente manera:

Hacemos minería con el fin generar riqueza para nuestra gente, las comunidades en las que desarrollamos nuestras operaciones y nuestros accionistas.

1.7. Objetivo general

Determinar cómo influye la implementación de mejoras en los equipos a los parámetros del área de molienda.

1.8. Objetivo específico

- Dar a conocer cada una de las etapas que comprende el área de molienda.
- Determinar la relación entre la carga circulante de pebbles y de molienda secundaria con el cambio de mallas de las zarandas.
- Determinar la relación entre la eficiencia de clasificación y el cambio de mallas de la zaranda.
- Determinar la relación entre el tamaño de producto de las chancadoras de pebbles y sus revestimientos.
- Reducir el tamaño del producto de las chancadoras de pebbles.
- Determinar la relación entre los nuevos revestimientos de las chancadoras de pebbles y respecto al aumento de tratamiento que se refleja en un beneficio económico.

CAPÍTULO 2

MARCO TEÓRICO

2.1. Conminución de minerales

Conminución es un término general utilizado para indicar la reducción de tamaño de un material y que puede ser aplicado sin importar el mecanismo de fractura involucrado. El rol de la conminución y de las operaciones unitarias relacionadas a ella es de gran importancia. Esto es especialmente cierto en términos de los costos de operación, ya que estos procesos unitarios representan la mayor fracción de los costos totales en el procesamiento de minerales. Además, son procesos caros desde el punto de vista de capital. (Magne & Titichoca, 2015)

2.2. Mecanismos de reducción de tamaños de partículas

Los mecanismos de reducción de tamaños de partículas como se puede ver en la figura 1 son:

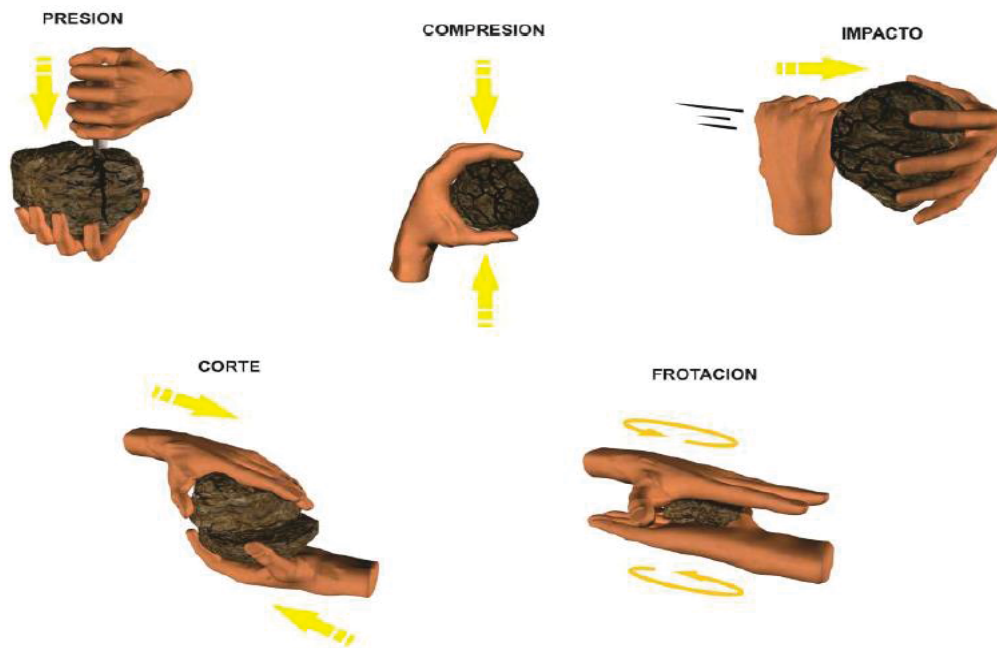


Figura 1. Mecanismos de reducción de tamaño

Fuente: (Jesmin, 2015)

2.2.1 Impacto

El material es fragmentado debido a un golpe instantáneo y seco de un material sólido y duro sobre la partícula de mineral o por choques entre partículas.

2.2.2 Atrición o frotación

El material se descompone en partículas debido a fuerzas de fricción que se generan entre dos superficies duras o entre partículas. Como resultado de esas fuerzas se producen partículas bastante pequeñas.

2.2.3 Corte o presión

El material se fragmenta debido a una fuerza cortante la cual genera la separación del material.

2.2.4 Compresión

El material es fragmentado por acción de una fuerza de compresión la cual es generada por acción de dos superficies duras.

2.3. Tamaño característico

Por norma general, la denominación de F80, P80, T80 se utiliza para caracterizar el tamaño representativo de una muestra por el cual representa el 80% del material. Pudiéndose referir a la alimentación (F80), producto (P80) y transferencia (T80) en un proceso de reducción de tamaño de minerales.

2.4. Finalidad de la reducción de tamaño

Una vez que el mineral ha sido extraído desde la mina, este puede presentar diferentes tamaños, los cuales pueden ir desde metros de diámetro a micrones.

Se hace necesario reducir el tamaño de las rocas obtenidas, por las siguientes razones:

Liberar la parte de interés de los minerales.

Promover reacciones físico-químicas rápidas, a través de la exposición de una gran área superficial.

Producir un mineral con características de tamaño deseable para su posterior procesamiento, manejo y/o almacenamiento.

Para desintegrar una partícula mineral se necesita aplicar energía, debido a que todos los materiales presentan fallas que pueden ser macroscópicas (grietas) o microscópicas. Logrando que esta energía se propague por las grietas, generando el rompimiento de los enlaces atómicos. (Jesmin, 2015)

2.5. Consumo específico de energía

En términos generales, el consumo de energía se encuentra estrechamente relacionada con la reducción de tamaño de partículas para nuestro caso en la etapa de molienda.

Bond, en 1952 indica que: “La energía consumida para reducir el tamaño 80% de un material, es inversamente proporcional a la raíz cuadrada de este tamaño, definiéndose el tamaño 80% como la abertura del tamiz (en micrones) que deja pasar el 80% en peso de las partículas”. Para lo cual se tiene la siguiente ecuación:

$$\hat{E} = W_i \left[\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right]$$

Donde:

\hat{E} : es el consumo de energía en kWh/t corta.

W_i : es el índice de trabajo o Work Index.

F_{80} y P_{80} : representa el 80% del tamaño de alimentación y producto respectivamente.

2.6. Molienda de minerales

La molienda es un proceso de reducción del tamaño del mineral utilizando las fuerzas mecánicas de impacto, compresión, corte y frotamiento de la roca. (Metso Minerals, 2004)

Las dos finalidades principales para un proceso de molienda son:

Producir finos desde tamaños de mineral más gruesos.

Liberar el mineral valioso del material estéril.

La molienda se realiza habitualmente en cilindros rotatorios que utilizan diferentes medios moledores, los que son levantados por la rotación del cilindro, para fracturar las partículas de minerales. (Magne & Titichoca, 2015)

Cabe mencionar, que los medios moledores se refieren a las bolas de acero que se utilizan para la reducción de los minerales al interior de un molino, en el caso de molinos SAG también se considera medios moledores a las rocas que por su tamaño actúan como bolas de acero que apoyan en reducir el tamaño de los minerales.

2.7. Velocidad crítica.

La velocidad crítica es la velocidad mínima a la cual los medios moledores (bolas de acero y rocas) centrifugan, es decir no tienen un movimiento relativo entre sí, en esta condición no se produce la molienda por lo tanto los molinos operan a velocidades que van entre 60% y 80% de su velocidad crítica.

Para determinar la velocidad crítica se tiene la siguiente ecuación:

$$V_c = 76.6 \sqrt{\frac{1}{D}}$$

Donde:

V_c : Velocidad crítica expresada en RPM.

D : Diámetro de molino expresado en pies.

2.8. Movimiento de catarata y cascada.

El movimiento de la carga de un molino rotatorio horizontal se caracteriza por una acción de volteo, como se muestra en la figura 2. Dependiendo de la velocidad de giro y la posición de los medios que componen la carga durante el ascenso, la caída puede ocurrir por desmoronamiento sobre la carga o por caída libre; la usanza ha denominado a ambos modos “cascada” y “catarata” respectivamente. (Magne & Titichoca, 2015)

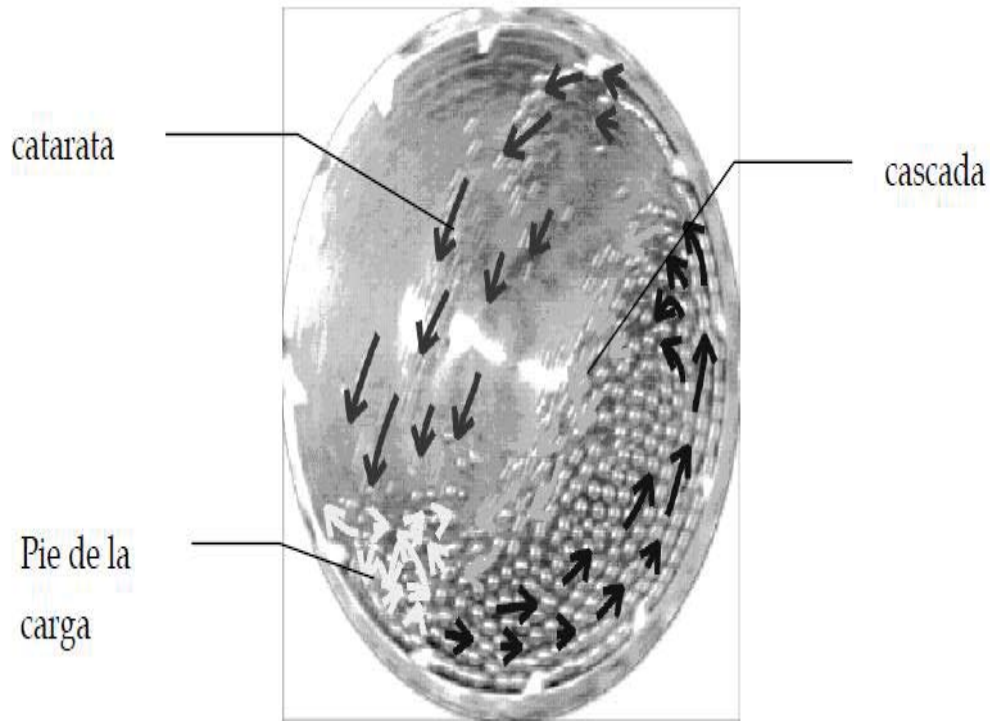


Figura 2. Característica de la carga interna de un Molino

Fuente: (Magne & Titichoca, 2015)

En el movimiento de “catarata” se produce la reducción de tamaño por impacto, mientras que en el movimiento de “cascada” se produce la reducción de tamaño por corte y atrición.

2.9. Volumen de carga

Los molinos SAG y bolas no trabajan totalmente llenos. El volumen ocupado por los elementos molidores y el material a moler referido al total del cilindro del molino, es lo que se denomina Volumen de Carga que habitualmente es del 30% a 40% del equipo.

2.10. Molino semiautogeno

En la molienda semiautogena actual (SAG), rocas de hasta 8 pulg. O más son alimentadas a un molino cilíndrico, cuya característica física principal es que el diámetro es dos a tres veces su longitud. (Magne & Titichoca, 2015)

Los molinos SAG se caracterizan por el uso de una parrilla de descarga, cuyo objetivo es retener al interior los medios moledores y mineral. De esta forma, la carga alimentada al molino puede ser descargada solo una vez que ha sido molido a un tamaño menor que las aberturas de la parrilla. (Jesmin, 2015)

2.11. Partes del molino SAG

Los molinos SAG o semiautógenos son accionados mediante la corriente eléctrica por un motor periférico de anillo síncrono de 24 MW, denominado así porque el rotor se acopla directamente al cuerpo o casco del molino y el estator toma la forma de anillo periférico.

Para poder detener el movimiento del molino, éste consta de un sistema de frenos, el cual está formado por dos estaciones de frenado (del lado izquierdo y del lado derecho) y una unidad de accionamiento hidráulico. Cada estación de frenado tiene uno o más pastillas del freno de disco flotante.

Los molinos SAG tienen un diámetro de 40 pies y una longitud de 25 pies (12.2m x 6.7m EGL). Los molinos son del tipo de trituración húmeda y descarga por trommel, fabricados por FLSmidth, modelo Fuller-Traylor, estos molinos están compuestos por el cuerpo o casco de acero al carbono (ASTM A36), el cual tiene una forma de cilindro en posición horizontal, con un espesor de 105 mm. En el lado de alimentación se encuentra el chute de alimentación, a continuación se ubica el trunnion (parte del molino de montaje y pivote, se puede ubicar en la figura 4) del lado de alimentación el cual se encuentra emperrado a unas bridas que son de acero al carbono (ASTM A36 Z25), las cuales a su vez están emperradas a la tapa del lado de alimentación del molino, el trunnion del lado de descarga está unido al trommel por medio del adaptador del trommel, mediante bridas emperradas a la tapa del lado de descarga. Los trunnions tienen un diámetro interior de 3,390 mm y son de hierro dúctil (ASTM A536).

El cuerpo (casco) y las tapas del molino constan de revestimientos interiores de acero de cromo-molibdeno. Los revestimientos se encuentran emperrados al interior del molino, éstos cuentan con “elevadores” que permiten levantar la carga durante la rotación del molino para producir la molienda; como se puede ver en la siguiente figura 3.

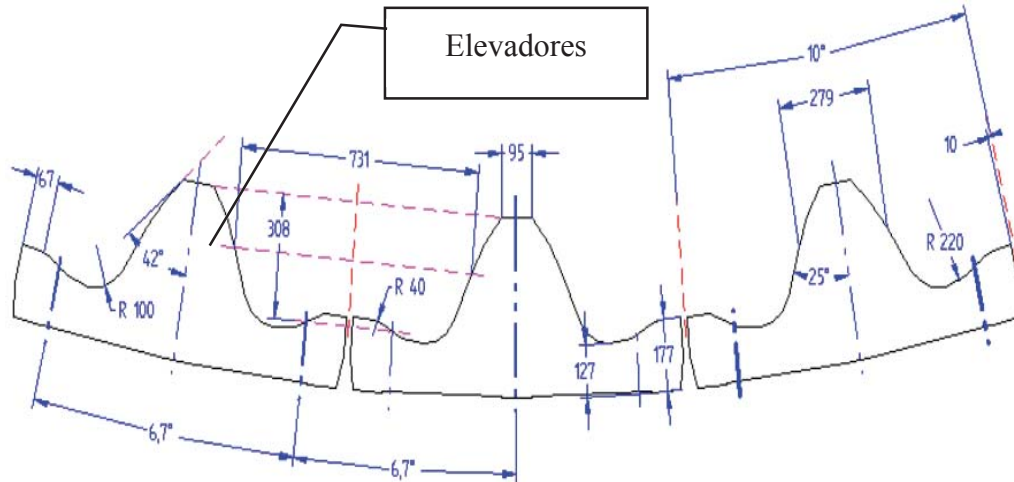


Figura 3: Vista perfil de revestimientos de molino (elevadores).

Fuente: (Las Bambas, 2019)

El cuerpo del molino es soportado por trunnions que giran sobre dos conjuntos de chumaceras principales, uno fijo y la otra libre. Cada conjunto de chumaceras consta de cuatro almohadillas de levantamiento ajustables, lubricadas hidrostáticamente, sobre las cuales gira el molino. Además, la chumacera fija tiene dos conjuntos de empuje lubricados hidrostáticamente que localizan el molino axialmente y resisten las fuerzas de empuje.

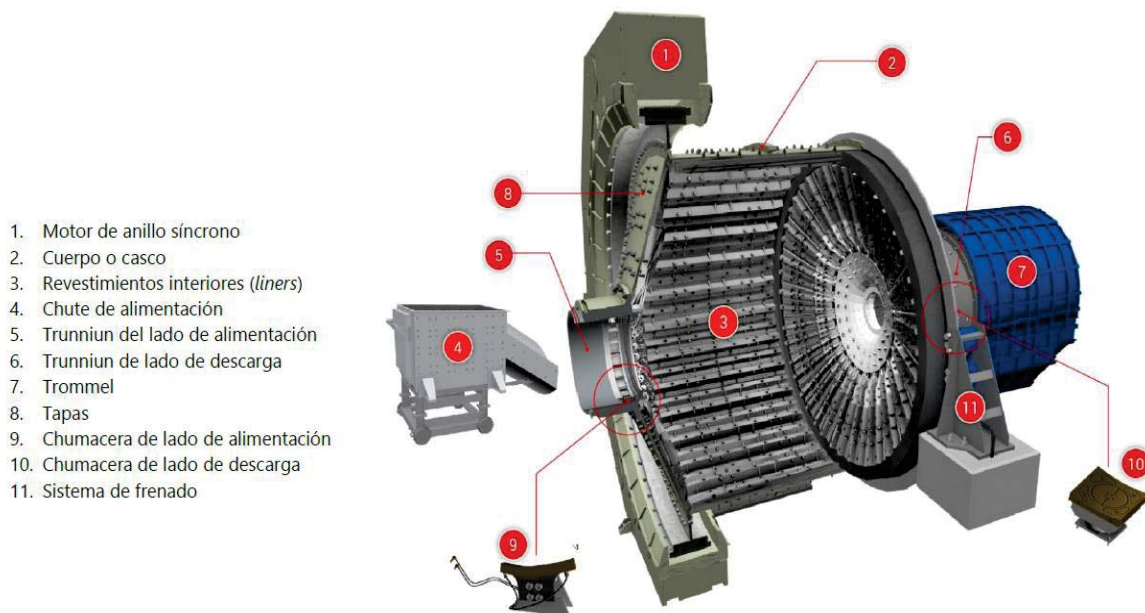


Figura 4. Partes del molino SAG

Fuente: (Jesmin, 2015)

2.12. Molino de bolas

Denominado así al molino que se encarga de la molienda secundaria, es decir posterior a la molienda SAG; este molino se caracteriza por tener casi el doble de longitud que su diámetro; la reducción de tamaño se realiza mediante el movimiento de “cascada” actuando como mecanismos de compresión y corte.

La descarga de pulpa se realiza mediante el rebose, empleando anillos como retenedores de carga que retengan los medios de molienda al interior del molino que están unidos al trunnion de descarga ver figura 5 y 6; salvo los que estén gastados los cuales también son desechados por rebose y recuperado por un electroimán acoplado al costado de la descarga del Molino; en la figura 6 se puede observar el Molino detenido y lavado para poder visualizar el nivel de bolas.



Figura 5. Fotografía de descarga de molino de bolas

Fuente: (Magne & Titichoca, 2015)



Figura 6. Fotografía de descarga de molino bolas.

Fuente: (Magne & Titichoca, 2015)

2.13. Partes del molino de bolas

Los molinos de bolas, son accionados por un motor periférico de anillo síncrono de 16.4 MW, denominado así porque el rotor se acopla directamente al cuerpo o casco del molino y el estator toma la forma de anillo periférico.

Para poder detener el movimiento del molino, éste consta de un sistema de frenos, el cual está formado por dos estaciones de frenado (del lado izquierdo y del lado derecho) y una unidad de accionamiento hidráulico. Cada estación de frenado tiene uno o más pastillas del freno de disco flotante.

Los molinos de bolas tienen un diámetro de 26 pies (7,93 m.) de diámetro y una longitud de 40,5 pies (12,34 m.), con un diámetro interior de 7.925 m. y una longitud eficaz de trituración (EGL) de 12.19 m.

Los molinos son del tipo de molienda húmeda y descarga por desbordamiento (rebose), fabricados por FLSmidth, estos molinos están compuestos por el cuerpo o casco de acero al carbono (ASTM A36) el cual tiene una forma cilíndrica, posición horizontal y con un espesor de 90 mm. En el lado

de alimentación se encuentra el chute de alimentación, a continuación se ubica el trunniun del lado de alimentación el cual se encuentra empernado a unas bridas que son de acero al carbono (ASTM A36 Z25), las cuales a su vez están empernadas a la tapa del lado de alimentación del molino, sobre el trunniun del lado de descarga está instalado el trunniun magnético el cual consta de un magneto. Los trunniun tienen un diámetro interior de 3,010 mm. Y son de hierro dúctil (ASTM A 536).

El cuerpo y las tapas del molino constan de revestimientos interiores de acero de cromo-molibdeno. Los revestimientos se encuentran empernados al interior del molino, éstos cuentan con “elevadores” que permiten levantar la carga durante la rotación del molino para producir la molienda.

El cuerpo del molino es soportado por trunniuns que giran sobre dos conjuntos de chumaceras principales, un fijo y la otra libre. Cada conjunto de chumaceras consta de cuatro almohadillas de levantamiento ajustables (pads), lubricadas hidrostáticamente, sobre las cuales gira el molino. Además, la chumacera fija tiene dos conjuntos de empuje lubricados hidrostáticamente que localizan el molino axialmente y resisten las fuerzas de empuje.

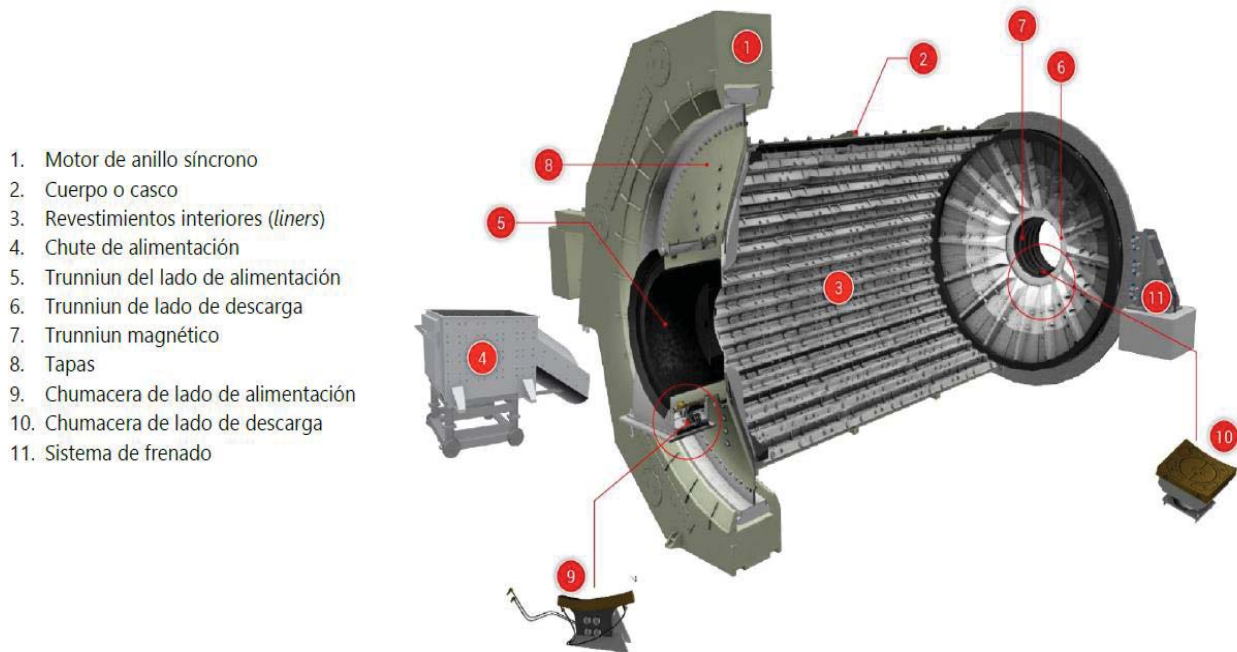


Figura 7. Partes del molino de bolas

Fuente: (Jesmin, 2015)

2.14. Zaranda.

Las zarandas son equipos empleados para la clasificación de mineral grueso, que separan la alimentación en dos flujos, cada uno conteniendo partículas de un rango de tamaños diferentes. La separación ocurre al permitir que partículas finas pasen a través de las mallas de la zaranda.

La zaranda es del tipo lineal, modelo R-MD, fabricada por Haver & Boecker Latinoamericana y sus dimensiones son 12 pies (3.7 m.) de ancho por 24 pies (7.3 m.) de largo.

Cuenta con dos superficies denominadas pisos: piso superior y piso inferior con mallas de poliuretano en cada uno. Las mallas del piso superior tienen aberturas de 35x57 mm y las del piso inferior, de 13 mm. Cada piso está soportado por un conjunto de ocho bastidores dispuestos transversalmente y once largueros dispuestos longitudinalmente. Este conjunto está fijado por dos placas laterales de construcción empernada en su totalidad, formando la estructura de la zaranda. Las placas laterales, los bastidores y los largueros están forrados con caucho para evitar su desgaste prematuro. Así mismo, las zonas de mayor desgaste sobre las placas laterales (costado de los pisos) están protegidas con revestimientos de caucho.

El accionamiento motriz es transmitido por un motor eléctrico que a través de una transmisión de poleas y correas, proporciona el giro a los excitadores. Dichos excitadores están montados linealmente, unidos por ejes cardanes, sobre la viga principal.

La zaranda se encuentra apoyada sobre una base móvil, denominado carro (trolley) mediante un conjunto de resortes helicoidales en cada esquina. La base móvil tiene cuatro ruedas que permiten el desplazamiento lateral de la zaranda sobre los rieles.

Para el lavado de las partículas y para la supresión del polvo, la zaranda cuenta con un conjunto de tuberías que suministran agua a presión en ambos decks, la cual sale por las toberas de las tuberías de distribución.

1. Motor eléctrico
2. Transmisión de poleas y correas
3. Excitadores
4. Deck superior (mallas)
5. Deck inferior (mallas)
6. Mallas
7. Sistema de lavado
8. Resortes
9. Carro (trolley)
10. Placas laterales
11. Bastidores
12. Largueros

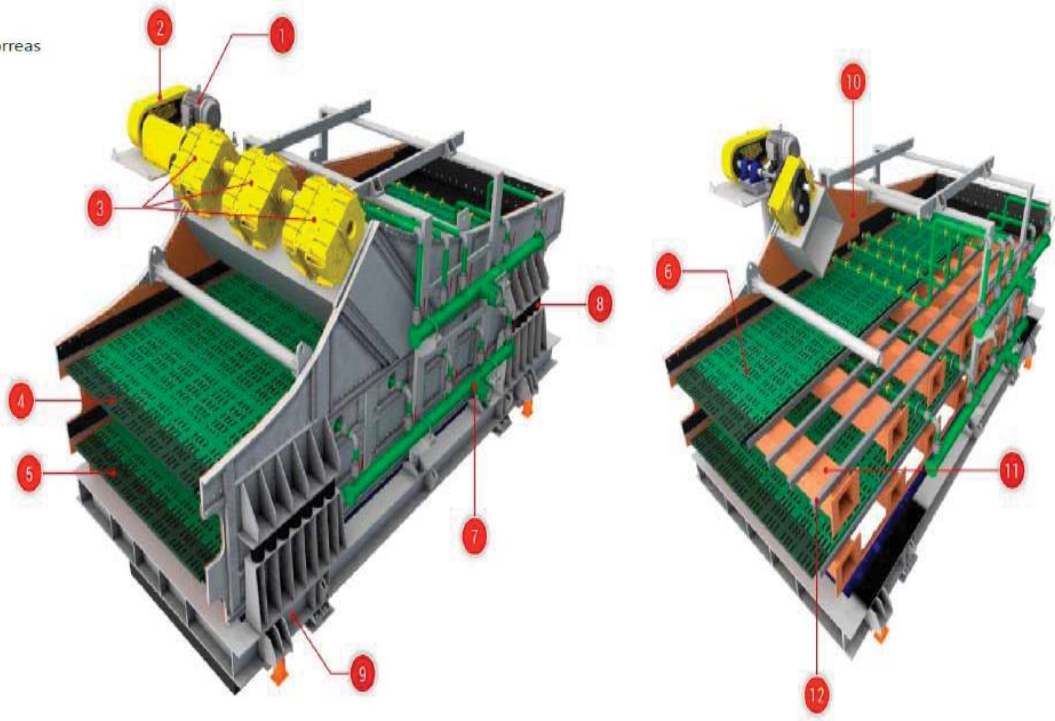


Figura 8. Partes de zaranda

Fuente: (Jesmin, 2015)

2.15. Chancado de pebbles

Los pebbles cuyo significado en inglés es guijarros, se trata de un material duro y difícil de ser reducido a menor tamaño en el molino SAG; los cuales son descargados, también vienen a ser el sobre tamaño de la zaranda instalada después del molino SAG.

Este material es recuperado y alimentado a las chancadoras del tipo cónico de cabeza corta, el cual se encarga de reducir de tamaño para reingresar a la alimentación del molino SAG. (Jesmin, 2015)

2.16. Partes de chancadora de pebbles

Las chancadoras cónicas son equipos diseñados para la reducción de tamaño de los pebbles. Son del tipo cónicas, modelo MP1000 cabeza corta, fabricadas por Metso Minerals. Las chancadoras cónicas están conformadas principalmente por tres secciones: sección fija, sección rotatoria y sección de sistemas auxiliares.

La sección fija está formada por el cuerpo principal ubicado en la parte externa de la chancadora sobre la que se soportan todos los demás componentes del equipo, fabricado en acero fundido al carbono grado 80-50 revestido interiormente con planchas de acero al manganeso fijadas al bastidor principal con pernos para facilitar su reemplazo.

También en el cuerpo principal se encuentra el eje principal tipo pedestal ubicado rígidamente en el centro del cuerpo de la chancadora, fabricado en acero forjado ASTM A668/A668M, el cual, internamente tiene unos canales mediante los cuales se distribuye el aceite hacia los bujes.

Y finalmente se encuentra el conjunto del contra eje que contiene básicamente los bujes de bronce que sostienen al contra eje.

La sección rotatoria, compuesta por la excéntrica instalada sobre el eje principal, la corona fijada a la excéntrica, el piñón mediante el cual es transmitido el giro del motor eléctrico (1000HP/746KW), el contra eje de acero fundido donde se fija el piñón y el manto de acero al manganeso que reviste a la cabeza y tiene una superficie esférica para ayudar a soportar las cargas del chancado.

La sección de sistemas auxiliares está compuesta por los sistemas de ajuste (anillo de ajuste), fijación, limpieza y liberación de la cámara que actúan directamente sobre el tazón. El tazón está protegido interiormente por un revestimiento de acero al manganeso.

1. Tolva de alimentación
2. Anillo de ajuste
3. Motor de ajuste hidráulico
4. Tazón (bowl)
5. Cilindro de liberación de la cámara
6. Cilindro de limpieza de la cámara
7. Eje principal (mainshaft)
8. Contraeje
9. Excéntrica
10. Cuerpo principal (main frame)
11. Socket
12. Cabeza (head)
13. Manto
14. Placa de alimentación

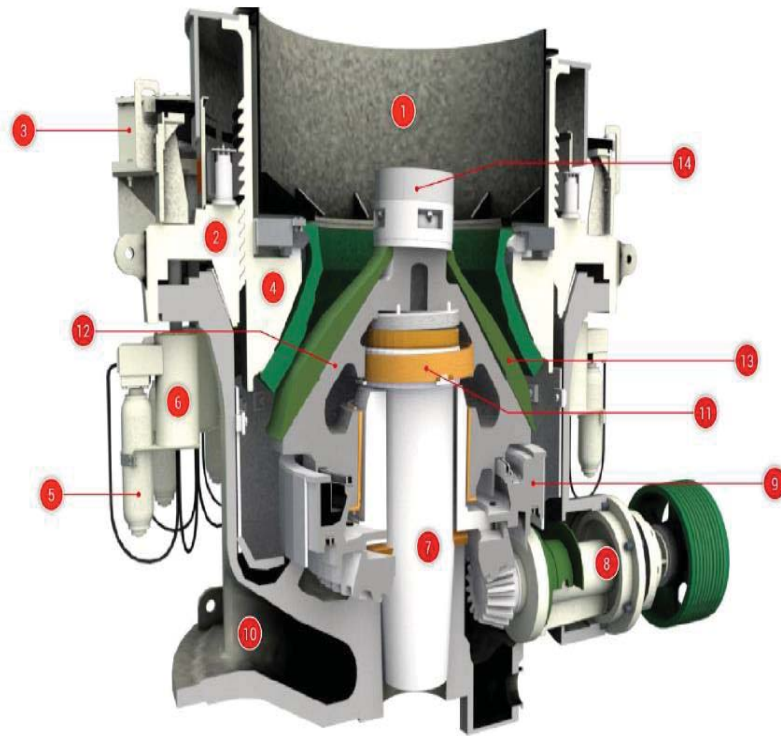


Figura 9. Partes de chancadora cónica de pebbles.

Fuente: (Jesmin, 2015)

2.17. Ciclón

Es un equipo que tiene como función separar un determinado caudal de pulpa en dos fracciones; una llamada Descarga (underflow) que lleva en suspensión los sólidos más gruesos de un determinado tamaño de corte y otra llamada Rebose (overflow) que lleva en suspensión los sólidos más finos (Jesmin, 2015), como se observa en la figura 10.

Para medir la eficiencia de un ciclón se puede realizar mediante la relación entre el tamaño promedio de la descarga del overflow (partículas finas) y el tamaño promedio de la alimentación.

$$Eficiencia_{ciclón} = \frac{\text{Tamaño promedio de Overflow}}{\text{Tamaño promedio de Alimentación}} \times 100\%$$

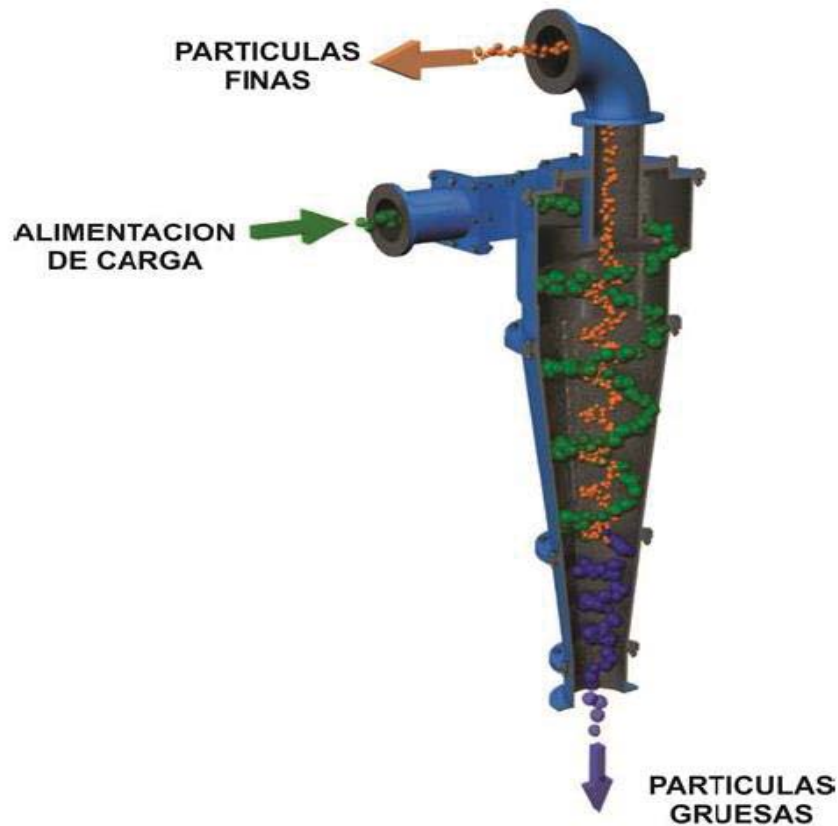


Figura 10. Corte transversal de ciclón.

Fuente: (Jesmin, 2015)

El ciclón se requiere altas velocidades de pulpa para generar las fuerzas internas necesarias para su funcionamiento.

Las altas velocidades dan como resultado una alta resistencia al flujo y requieren alimentación. Las boquillas de entrada tangenciales, favorecen la introducción libre de impactos y de alta presión; estando dirigidas a reducir la intensidad de la turbulencia para lograr bajas granulometrías de separación, así como alcanzar altos suministros de suspensiones.

2.18. Descripción de la planta concentradora Las Bambas

Las Bambas comprende una planta concentradora de 140 000 t/d (toneladas por día) de capacidad nominal para la producción de 2 835 t/d de concentrado colectivo de cobre y molibdeno.

La planta concentradora considera la extracción de mineral grueso de tres yacimientos durante el ciclo de vida del proyecto (actualmente se viene extrayendo del yacimiento ferrobamba), e incluye una sección de chancado primario; una planta de molienda con dos módulos de molinos SAG (semiautogeno), molino de bolas y chancado de pebbles; una planta de flotación colectiva de cobre-molibdeno y una planta de separación de molibdeno; espesamiento del concentrados y espesamiento de relave y disposición final de este en una relavera. (Bechtel, 2011)

2.19. Descripción general del área de molienda

En la planta concentradora de las bambas, en el proceso de molienda operará a través de dos líneas que consisten en un molino SAG y un molino de bolas.

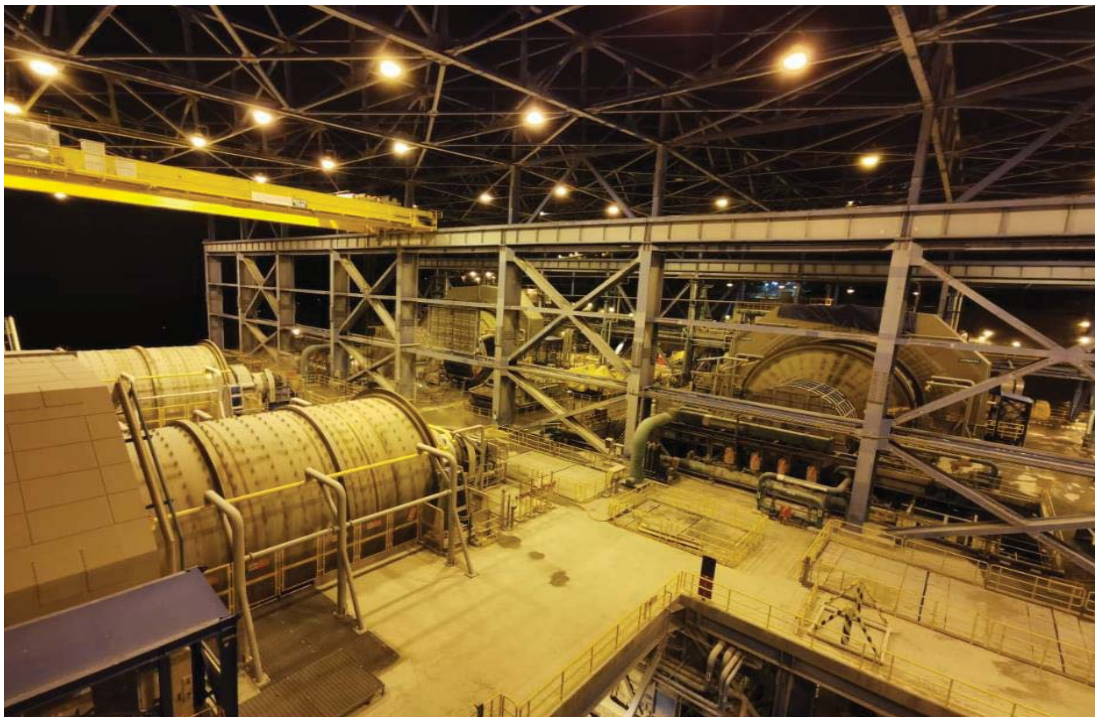


Figura 11. Fotografía panorámica del área de Molienda.

Fuente: Propia.

El proceso está conformado por tres etapas los cuales son y se encuentran dispuestos como se indica en la figura 12:

- Recuperación de mineral grueso.
- Proceso de molienda.
- Chancado pebbles.

Molienda

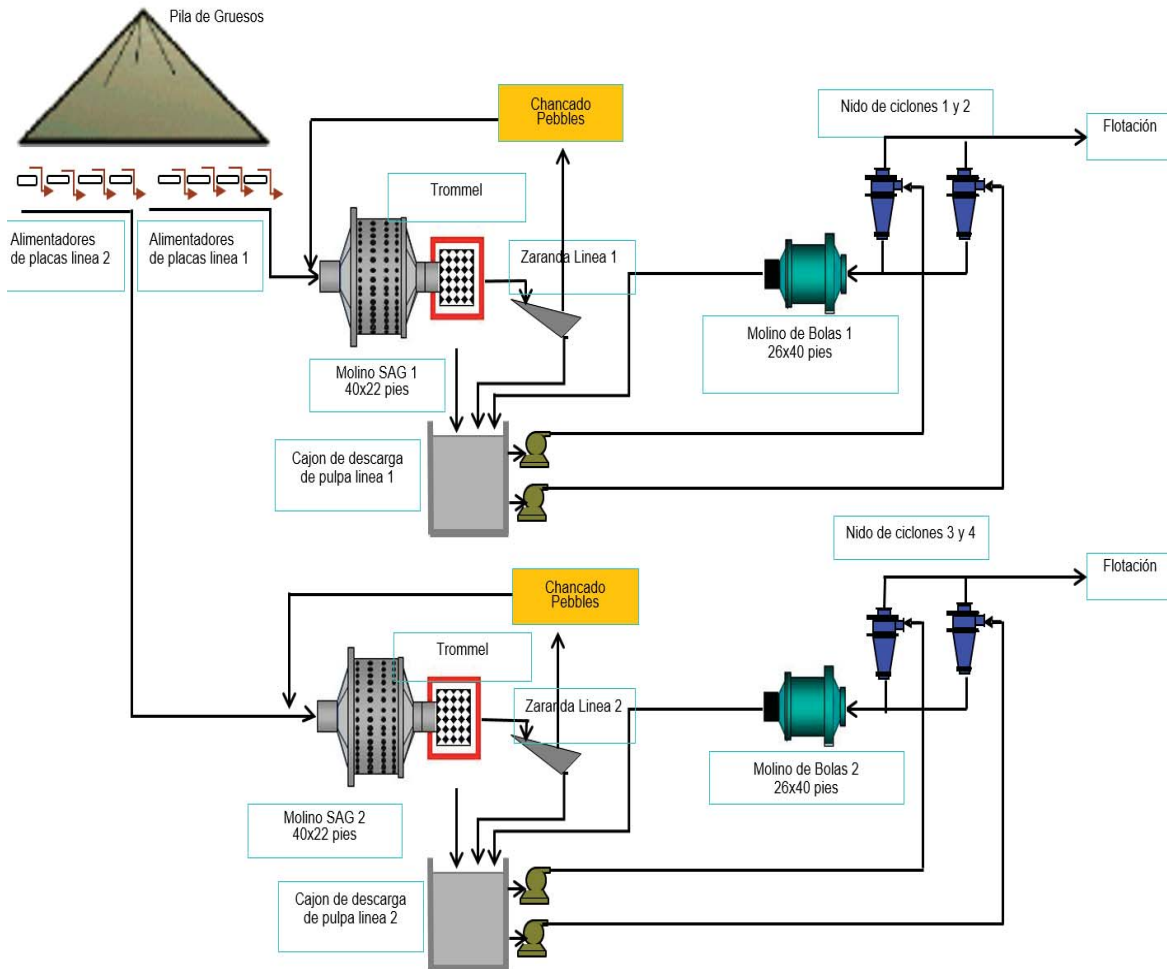


Figura 12. Diagrama del área de molienda.

Fuente: (Bechtel, 2011)

2.20. Recuperación de mineral grueso.

El mineral es extraído de la pila de almacenamiento de 105 000 t de capacidad viva mediante dos líneas de alimentadores de placas de 60 pulg. de ancho cuatro por cada línea, tres en operación y una en espera; enviando a la etapa de molienda mediante fajas transportadoras de 72 pulg. de ancho y 274 m. de longitud cada una, a razón de 3170 t/h por línea; estas fajas además de transportar el mineral grueso transportan bolas de cinco pulgadas provistas por los alimentadores rotatorios a razón de 1.3 t/h y una carga circulante de pebbles chancados. Para el control de tonelaje cada faja cuenta con una balanza; toda esta carga 3963 t/h en promedio se alimenta al molino SAG junto con la lechada de cal, diésel y agua de proceso según el requerimiento.

2.21. Proceso de molienda

La etapa de molienda consta de dos circuitos los cuales son: molienda primaria y molienda secundaria.

El mineral proveniente de la etapa anterior con tamaño medio de 150 mm. y 3 % de humedad, ingresa a los molinos mediante fajas transportadoras; se cuenta con 2 líneas operadas en paralelo cada una provista de un molino SAG de 40x22 pies con 24 MW de potencia, cada molino dispone de un sistema de velocidad variable de 9.04 RPM y está diseñado para operar con un volumen de llenado de mineral y medios de molienda de 25 a 30%; aquí la carga fresca es reducida por acción del mismo mineral y las bolas de acero, en él se realizan los movimientos de cascada y catarata; en la descarga de los molinos SAG se tiene provisto un trommel corto con mallas de 16x48 mm. de abertura que clasifica la pulpa con 70% de sólidos; que clasifica la pulpa en dos productos, el sobre tamaño del trommel es enviado a la zaranda vibratorias y el bajo tamaño a la molienda secundaria, las zarandas son del tipo lineal de doble piso de 12 pies de ancho por 24 pies de longitud con aberturas en el piso superior de 35x57 mm y en el inferior de 13 mm, que clasifican las partículas en base a su tamaño el sobre-tamaño con tamaño medio de 35 mm es enviado al proceso de chancado de pebbles, mientras que el bajo-tamaño se alimenta también a la molienda secundaria, los molinos SAG trabajan bajo el esquema de circuito cerrado directo con clasificación en zaranda y chancado de pebbles.

La pulpa proveniente de los molinos SAG a 4994 t/h, y el bajo-tamaño de las zarandas vibratorias de 1348 t/h se descarga el cajón sumidero de 473 metros cúbicos de capacidad; que mediante bombas centrifugas de velocidad variable impulsan la pulpa a una presión de bombeo de 16 a 17 PSI hacia los nidos de ciclones; se tiene cuatro nidos dos por molino de 12 ciclones cada uno, 10 en operación y dos en espera, cada ciclón con diámetro de 33 pulg.; la pulpa ingresa al nido por la parte inferior y alimenta a cada ciclón en forma tangencial por las fuerzas centrifugas; las partículas livianas (overflow) salen por la parte superior mientras que las partículas pesadas salen por la parte inferior(underflow); el overflow de cada ciclón se colecta en una canaleta que alimenta al proceso de flotación con una granulometría de 240 μm y 38% de sólidos como producto de la etapa de molienda, mientras que el underflow se colecta en otra canaleta y se alimenta a los molinos de bolas; en este punto se realiza la adición de agua de proceso, lechada de cal, colector primario, y bolas de tres pulgadas. Las bolas son provistas mediante un sistema compuesto por dos tolvas con

alimentadores rotatorios una faja de alta pendiente y dos fajas en serie los cuales alimenta bolas a razón de 1.3t/h por cada molino periódicamente.

Se cuenta con dos molinos de bolas de 26x40 pies con 16.4 MW de potencia los cuales operan en paralelo estos disponen de un sistema de velocidad variable de 11.4 RPM y trabajan con un volumen de llenado de mineral de 35%; en la descarga se cuenta con un trunnion magnético para coleccionar y eliminar los chips, la pulpa de cada molino 9511 t/h con 70% de sólidos se descarga en los cajones respectivamente formando un circuito cerrado inverso.

2.22. Chancado pebbles

La etapa de chancado de pebbles consta de 3 circuitos los cuales son: almacenamiento, chancado y transporte de pebbles.

Los pebbles producto del sobre-tamaño de las zarandas vibratorias se descargan en la faja colectora de 48 pulg. de ancho y 151 m de longitud, la cual cuenta con dos balanzas para el control operacional de tonelaje y tres electroimanes que permiten el retiro oportuno de metales; luego son descargados en otra faja de 48 pulg. de ancho y 89 m. de longitud que alimenta a la pila de almacenamiento de pebbles de 1750 t de capacidad viva; de aquí son extraídos por medio de tres fajas de 36 pulg. de ancho y 144 m. de longitud cada una las cuales alimentan a tres chancadoras cónicas, a razón de 528.6 t/h por cada una, cada faja esta provista de un detector de metales que al detectar un elemento metálico activa un mecanismo que desvía la carga hacia la faja de descarga de las chancadoras.

Las chancadoras son de tipo cónica de cabeza corta con 746 kW de potencia, los pebbles con 35mm de tamaño ingresan a la chancadora; y conforme caen se aplastan entre la cabeza que se mueve excéntricamente y la taza rompiéndose en fragmento de 13 mm., el producto triturado es recolectado en la faja de descarga de 48 pulg. de ancho y 169 m. de longitud que es alimentado a un chute de traspaso; que según el requerimiento operacional alimenta a las fajas de retorno de pebbles de 48 pulg. de ancho y 29 m. de longitud y 48 pulg. de ancho y 77 m. de longitud respectivamente, finalmente estas descargan sobre las fajas de alimentación a los molinos SAG a razón de 1586 t/h cerrando así el circuito de molienda primaria.

Chancado Pebbles

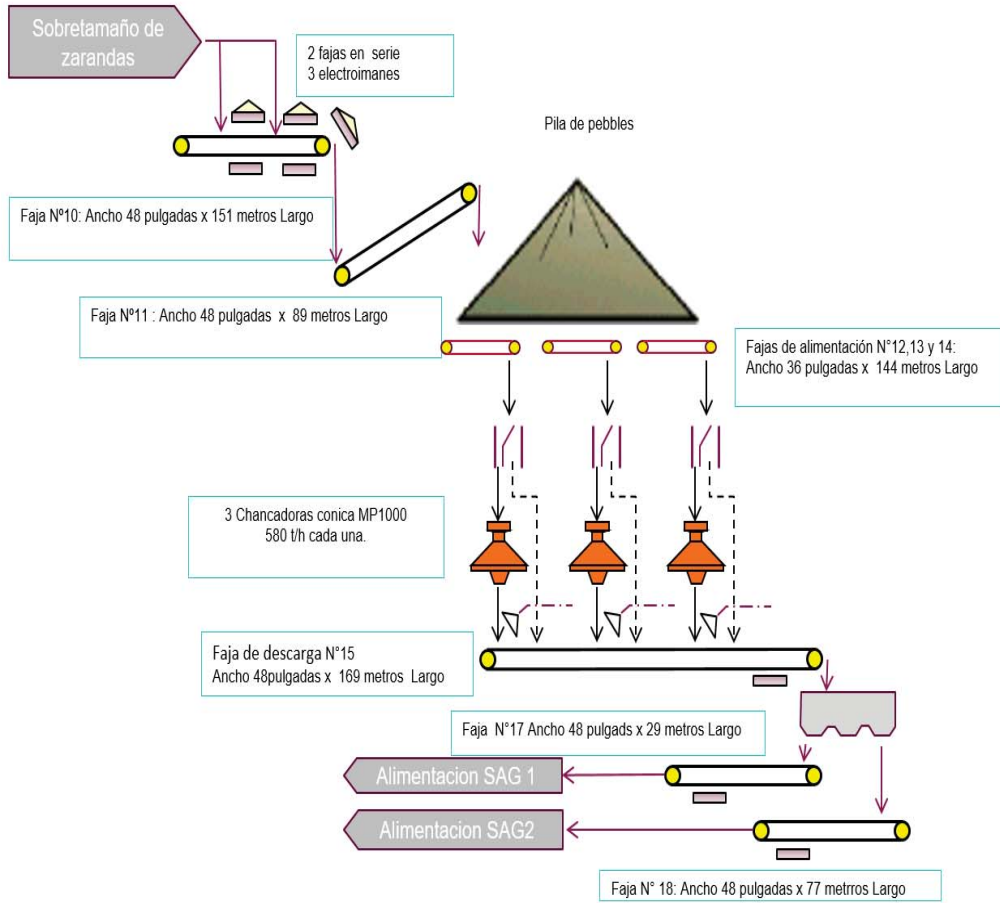


Figura 13. Diagrama del chancado de pebbles.

Fuente: (Bechtel, 2011)

CAPÍTULO 3

IMPLEMENTACIÓN DE MEJORAS EN EL ÁREA DE MOLIENDA

3.1. Implementación de mejora en la zaranda vibratoria

Se tenía como condición restrictiva para el tonelaje de alimentación a molienda, la generación de pebbles por lo tanto se planteó evaluar el cambio de la abertura de las mallas de la zaranda esto con la finalidad de revertir dicha condición antes mencionada y mejorar la clasificación de la zaranda.

En el circuito de clasificación trommel y zaranda, se ha implementado el cambio en la configuración de la abertura de los paneles o mallas de 13 mm a 14.5 mm (en el piso inferior de las zarandas), instalados en la parada de mantenimiento en octubre del año 2018, en cada línea de molienda.

Cabe mencionar que la carga circulante de pebbles llega a afectar en el tonelaje de alimentación de molienda, por lo tanto es necesario evaluar el efecto del cambio de las mallas en la carga circulante.

Al aperturar la malla de las zarandas también se tendrá un efecto en la molienda secundaria el cual es necesario evaluar.

3.2. Evaluación de zaranda vibratoria

Entre el 28 de agosto y el 29 de noviembre del año 2018, se efectuaron muestreos puntuales en el circuito de clasificación trommel y zaranda, esto es antes y después de la parada del 11 al 17 de octubre, en los puntos indicados en el siguiente diagrama (ver figura 14).

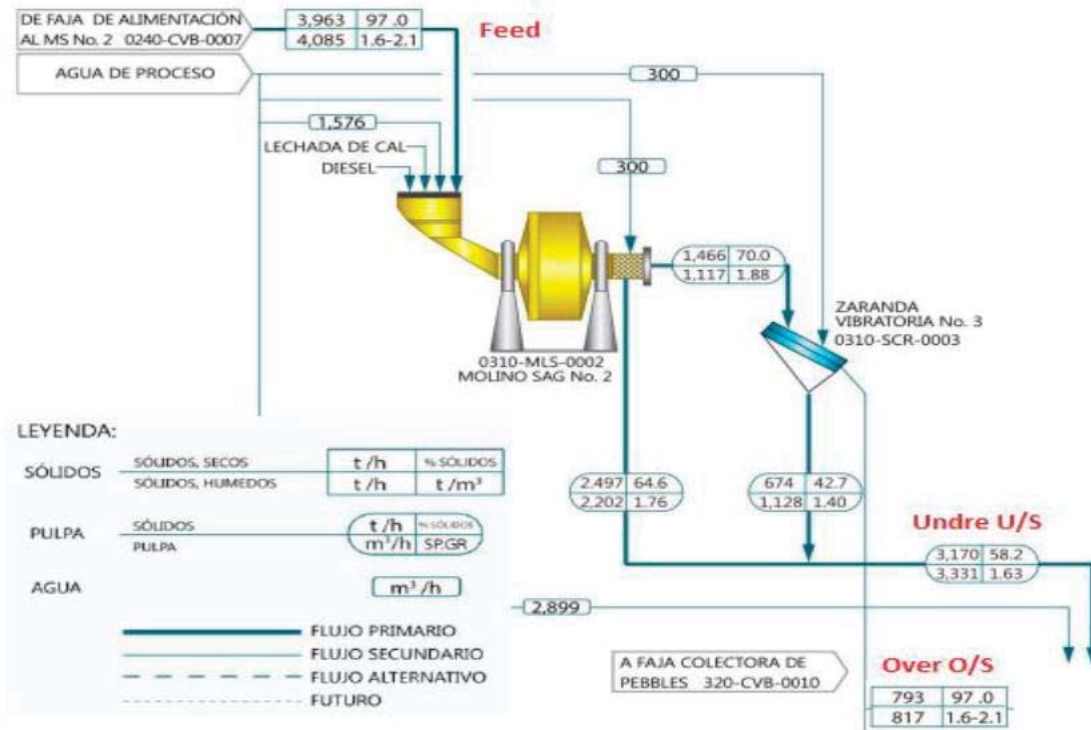


Figura 14. Diagrama del circuito molino y zaranda.

Fuente: (Metalurgia MMG , 2019)

Para la evaluación se tomaron los parámetros de mayor influencia en la operación:

Parámetros de control:

- a) Tonelaje y tamaño fino de - 1 pulgada del alimento.

Parámetros objetivo:

- b) Carga circulante de pebbles.
- c) Tamaño pasante 13 milímetros del sobretamaño de zaranda.
- d) Eficiencia de clasificación.

Parámetros de efecto:

- e) Tamaño T80 del bajo tamaño de zaranda.
- f) Carga circulante en la molienda secundaria.
- g) Tamaño P80 del sobretamaño de los ciclones.

a) Tonelaje y tamaño fino del Alimento

De los datos en ambas líneas de molienda se aprecia la relación directa promedio entre el tonelaje y el tamaño fino - 1 pulgada (pasante).

Línea N° 1

Como se puede observar en la figura 15.

Antes (13.0 mm) se procesó 3,297 t/h de mineral con 33.5% -1 pulgada en promedio.

Después (14.5 mm) se procesó 3,194 t/h de mineral con 32.2% -1 pulgada en promedio.

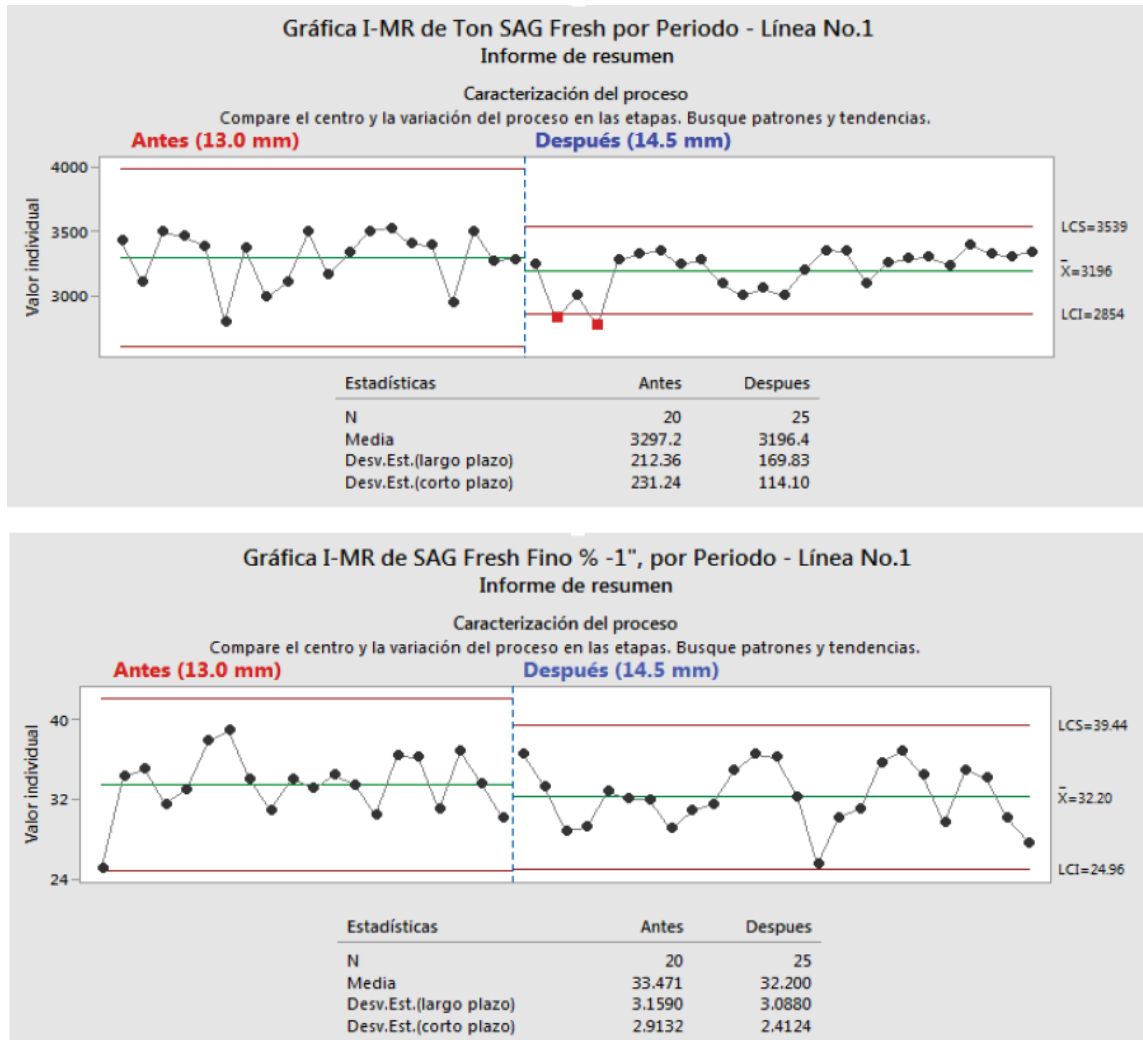


Figura 15. Comparación de tonelaje alimentado y tamaño fino -1 pulg. de línea N° 1.

Fuente: (Metalurgia MMG, 2018)

Línea N° 2

En la figura 16 se puede observar la comparación de:

Antes (13.0 mm) se procesó 2,987 t/h de mineral con 29.9% -1 pulg en promedio.

Después (14.5 mm) se procesó 3,163 t/h de mineral con 31.1% -1 pulg en promedio.

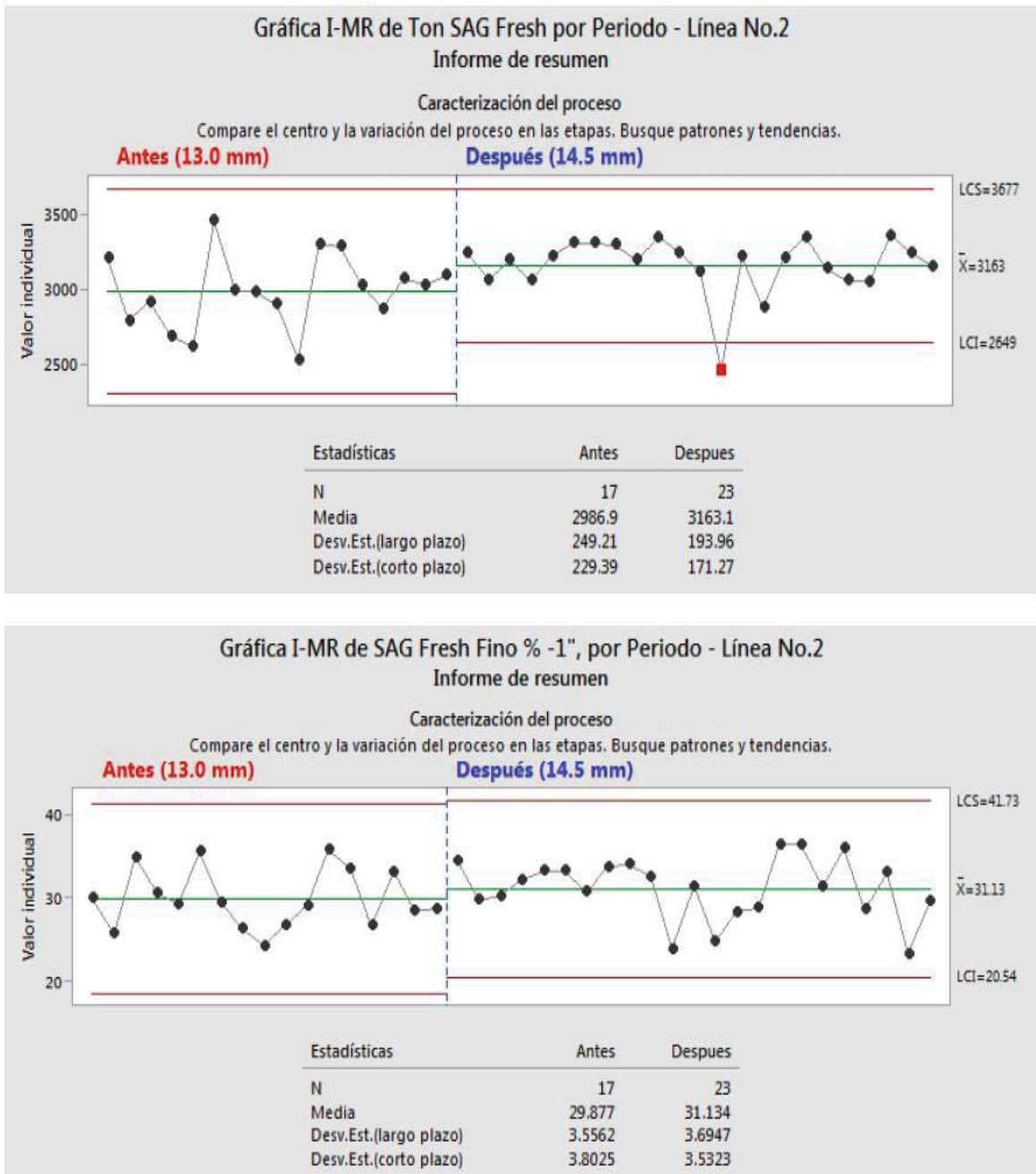


Figura 16. Comparación de tonelaje alimentado y tamaño fino -1 pulgada de la línea N° 2

Fuente: (Metalurgia MMG , 2019)

Para el análisis de los datos de cada parámetro objetivo y de efecto, se realizó un resumen en ambas líneas de molienda como se muestra en la tabla 1.

Del análisis se obtuvieron los siguientes resultados:

Tabla 1. Resultados de Parámetros

| Parámetros | Línea molienda N° 1 | | Línea molienda N° 2 | |
|--|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | Antes (13mm) | Después (14.5mm) | Antes (13mm) | Después (14.5mm) |
| Carga Circulante (%) | 21.7 | 17.6 | 23.2 | 15.7 |
| Tamaño Pasante 13mm a Sobre tamaño (%) | 7.9 | 7.9 | 3.8 | 7.3 |
| Eficiencia Clasificación (%) | 98 | 97.4 | 97.9 | 97.7 |
| Tamaño T80 bajo tamaño (µm) | 4564 | 4881 | 4241 | 4103 |
| Carga circulante molienda secundaria (%) | 333 | 330 | 226 | 248 |
| Tamaño P80 overflow (µm) | 268 | 294 | 255 | 280 |

b) Carga circulante de Pebbles

Los resultados indican una disminución muy significativa de la carga circulante de pebbles en ambas líneas de molienda.

Línea N° 1

En la figura 17 se puede observar:

Antes (13.0 mm) en 21.7% versus Después (14.5 mm) en 17.6%.

Decremento del 19% de la carga circulante.

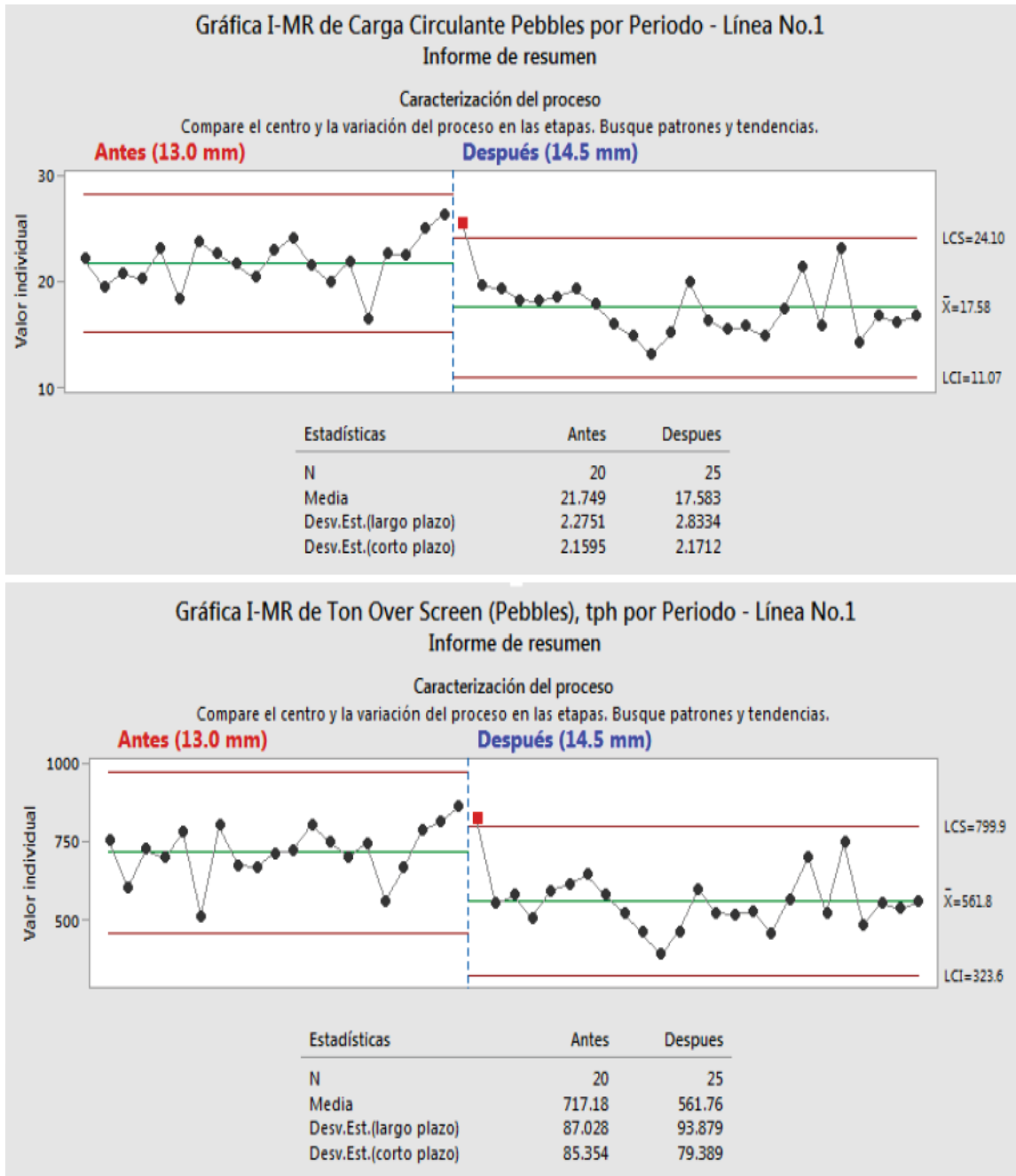


Figura 17. Comparación de carga circulante y sobretamaño de la línea N° 1.

Fuente: (Metalurgia MMG , 2019)

Línea N° 2

En la figura 18 se puede observar:

Antes (13.0 mm) en 23.2% versus Después (14.5 mm) en 15.7%.

Decremento del 32% de la carga circulante.

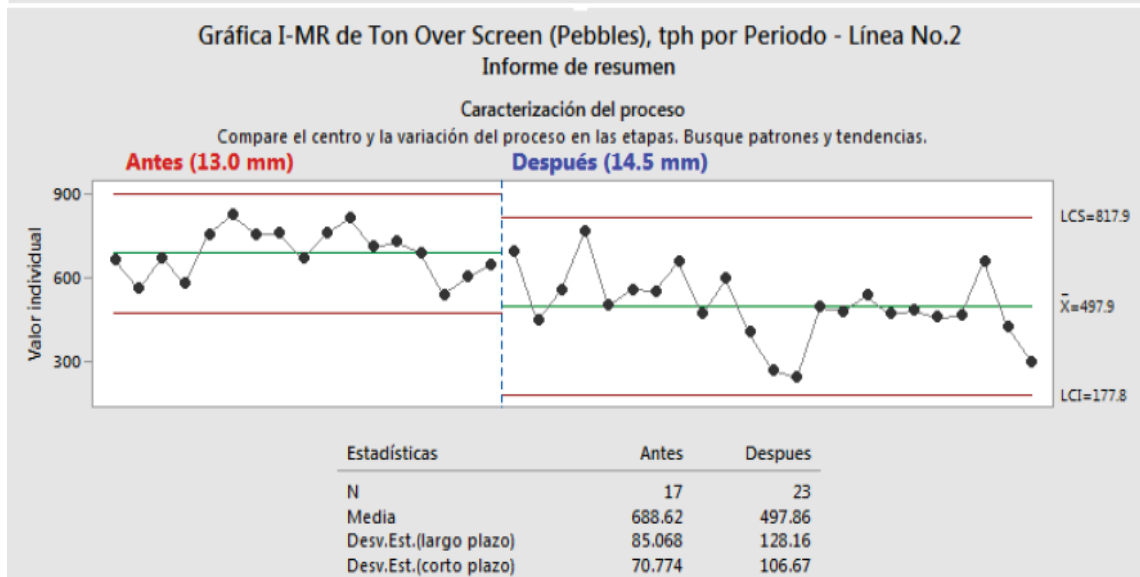
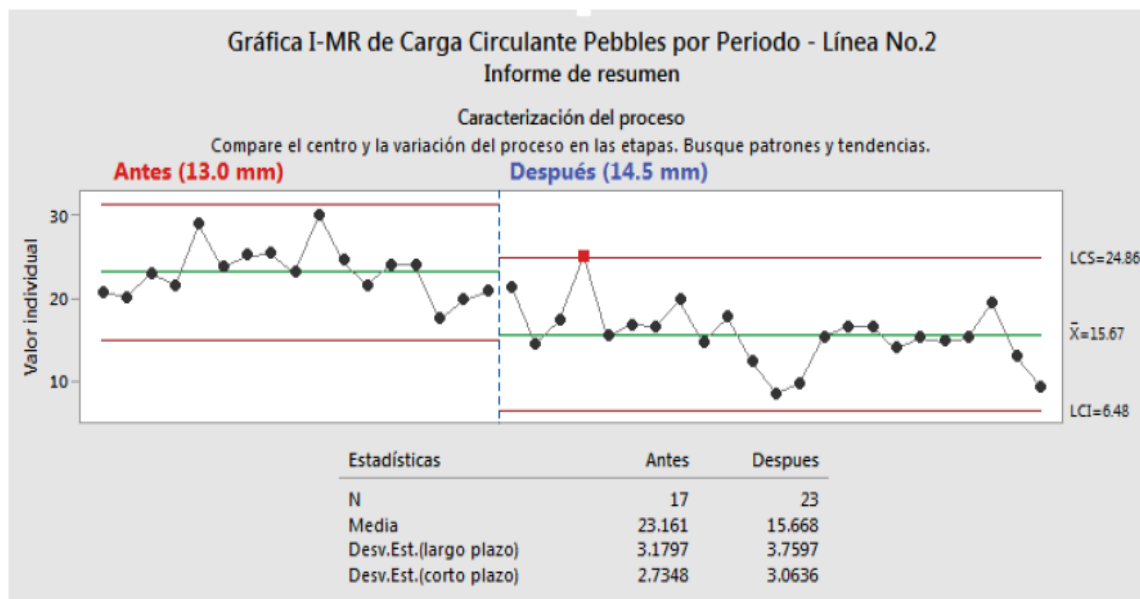


Figura 18. Comparación de carga circulante y over screen de la línea N^o2.

Fuente: (Metalurgia MMG , 2019)

c) Tamaño pasante 13 mm del over screen (O/S)

Los resultados en la línea N^o1, indicaron un contenido similar de tamaño pasante de 13 mm en ambos periodos, mientras que en la línea No.2 los resultados indican un incremento significativo del tamaño pasante de 13 mm en el over screen.

Línea N^o 1

Antes (13.0 mm) en 7.9% versus Después (14.5 mm) en 7.9%.

Ambos contenidos del tamaño pasante de 13 mm son iguales.

Línea N° 2

Antes (13.0 mm) en 3.8% versus Después (14.5 mm) en 7.3%.

Incremento en promedio del 90% del tamaño pasante de 13 mm.

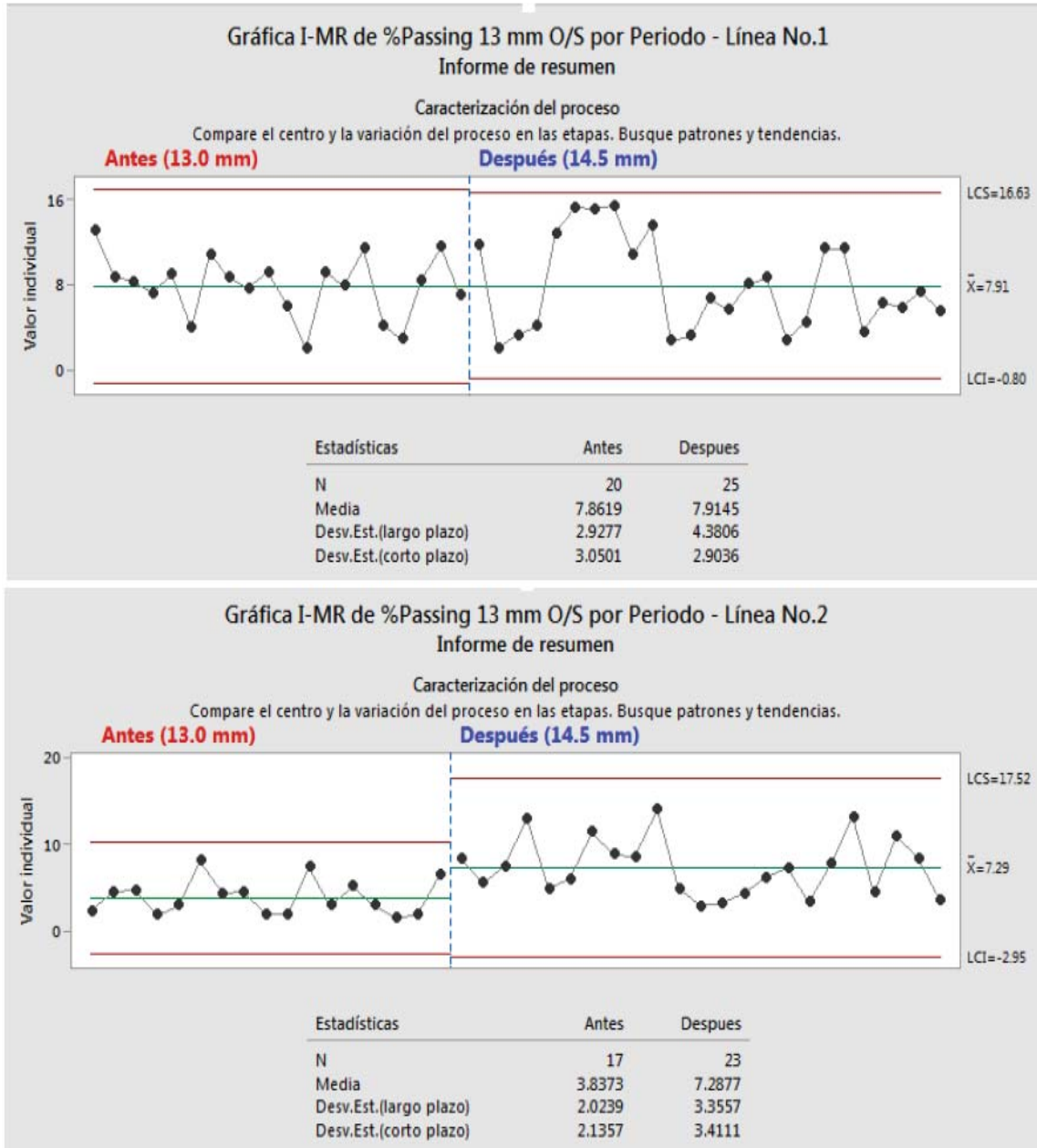


Figura 19. Comparación de tamaño pasante de 13mm en over screen de línea N° 1 y 2.

Fuente: (Metalurgia MMG , 2019)

d) Eficiencia de clasificación

Los resultados indican que en la línea N°1 se presenta una disminución ligeramente significativa de la eficiencia, mientras que en la Línea N°2 se presenta una similar eficiencia de clasificación.

Línea N° 1

Antes (13.0 mm) en 98.0% versus Después (14.5 mm) en 97.4%.

Ambas eficiencias de clasificación se podría decir que son iguales.

Línea N° 2

Antes (13.0 mm) en 97.9% versus Después (14.5 mm) en 97.7%.

Ambas eficiencias de clasificación son iguales.

e) Tamaño T80 del under screen (U/S)

Los resultados presentan un similar tamaño T80 en el under screen, en ambos periodos para cada línea de molienda.

Línea N° 1

Antes (13.0 mm) en 4,564 micras versus Después (14.5 mm) en 4,881 micras.

Ambos tamaños de T80 son iguales.

Línea N° 2

Antes (13.0 mm) en 4,241 micras versus Después (14.5 mm) en 4,103 micras.

Ambos tamaños de T80 son iguales.

f) Carga circulante en la molienda secundaria

Los resultados presentan una similar carga circulante en la molienda secundaria, en ambos periodos para cada línea de molienda.

Línea N° 1

Antes (13.0 mm) en 333% versus Después (14.5 mm) en 330%.

Ambas cargas circulantes son iguales.

Línea N° 2

Antes (13.0 mm) en 226% versus Después (14.5 mm) en 248%.

Ambas cargas circulantes son iguales.

g) Tamaño P80 del over flow de ciclones

Los resultados indican un incremento significativo del tamaño P80 del over flow (O/F) de los ciclones en ambas líneas de molienda.

Línea N° 1

En la figura 20 se puede observar:

Antes (13.0 mm) en 268 micras versus después (14.5 mm) en 294 micras.

Incremento en promedio del 9% del tamaño P80.

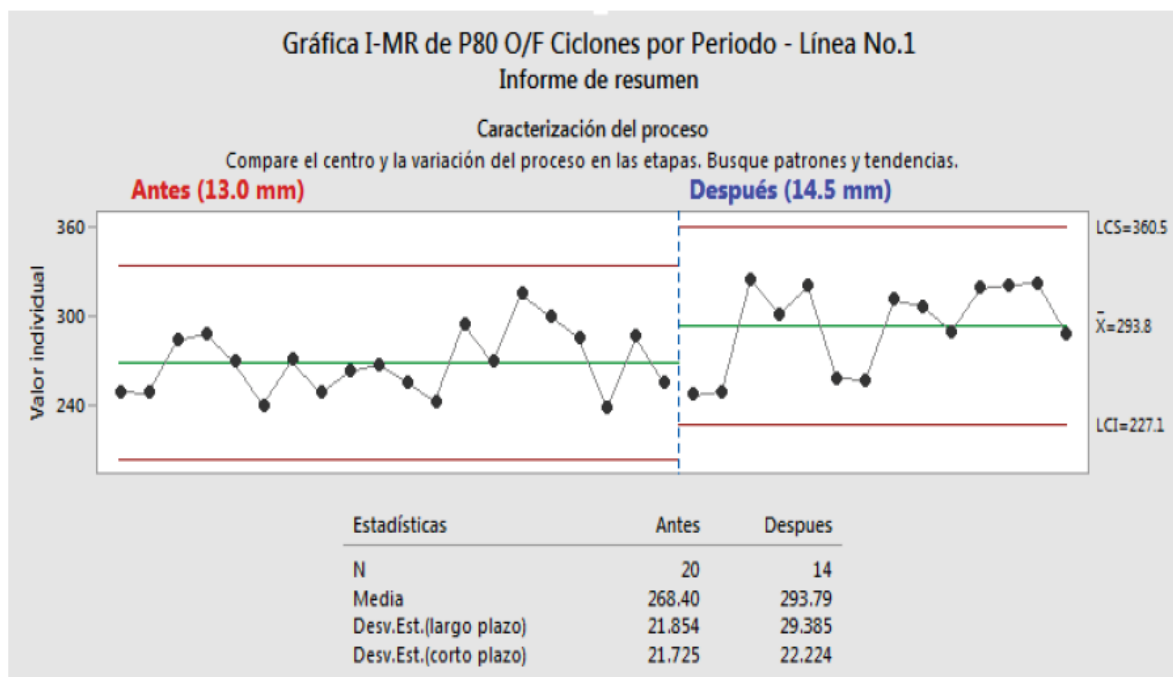


Figura 20. Comparación de over flow de ciclones en la línea N°1.

Fuente: (Metalurgia MMG , 2019)

Línea N° 2

En la figura 21 se puede observar:

Antes (13.0 mm) en 255 μm versus Después (14.5 mm) en 280 μm .

Incremento en promedio del 10% del tamaño P80.

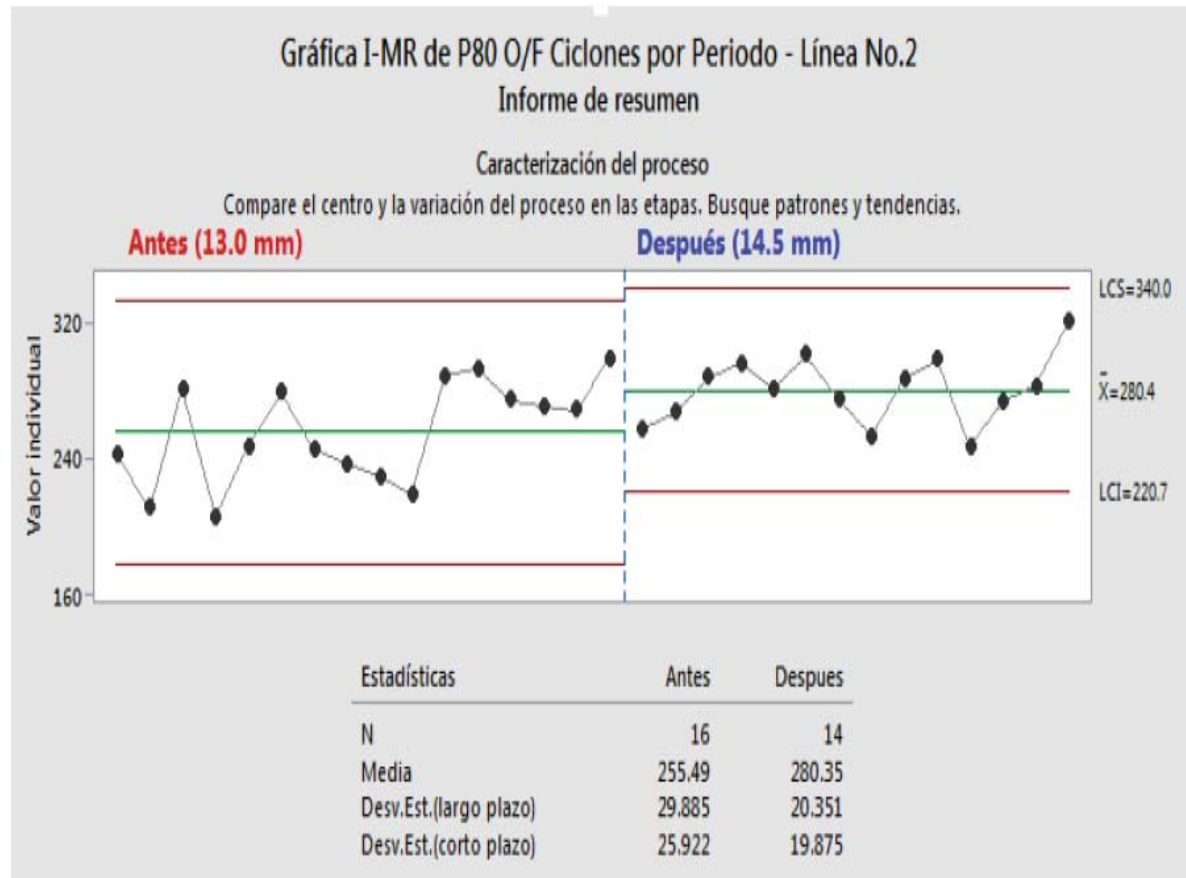


Figura 21. Comparación de over flow de ciclones en la línea N° 2.

Fuente: (Metalurgia MMG , 2019)

3.3. Evaluación de revestimientos de chancadoras de pebbles

Se requiere evaluar la eficiencia de las chancadoras de Pebbles usando revestimientos (también denominados forros) maquinados (mecanizados) y doble maquinado en reemplazo de los revestimientos estándar, considerando en el análisis parámetros y variables de operación.

Esta prueba se desarrolló durante los meses de junio a diciembre del año 2018, para lo cual se analizó el “tiempo de asentamiento” y su “impacto en la capacidad de procesamiento en Molienda”.

3.4. Antecedentes

Las chancadoras utilizadas en el circuito Pebbles son de Tipo Cono MP-1000 SH. Los forros utilizados desde el inicio de operación son originales según diseño de Metso.

- En el mes de junio 2018 se inició pruebas con forros maquinado (mecanizado) y doble maquinado instalado en las chancadoras de pebbles 02 y 03, orientado a obtener un producto fino en el circuito; asimismo reducir tiempos de asentamiento que permitan alcanzar un setting menor a 15 mm en periodos reducidos.

- Los revestimientos o forros maquinado (mecanizado) se refiere al diseño del manto donde se realizó un aligeramiento en la zona superior, “joroba de camello”. El forro con doble maquinado presenta la misma configuración considerando una mayor reducción en la parte maquinada, como se muestra en la figura 22.

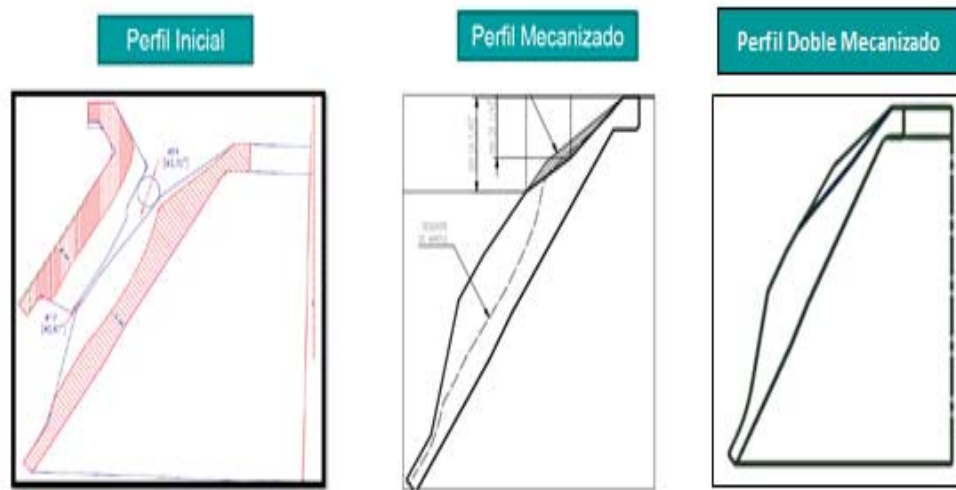


Figura 22. Esquema de tipos de revestimientos de chancadora pebbles.

Fuente: (Metso Minerals, 2004)

3.5. Desarrollo de la evaluación

Para realizar la evaluación se tiene las siguientes consideraciones:

- Para términos de evaluación de setting se considera registros a partir del 14 de mayo 2018, fecha en que se implementa la medición del setting desde campo conjuntamente con el área de mantenimiento.

- La evaluación no considera diferencia de tipo mineralógico, ni características físicas como la dureza, entre otros.
- Los análisis granulométricos, tonelajes y potencias considerados en la evaluación corresponden a datos experimentales.
- Para términos de evaluación del tiempo de asentamiento se considera desde el cambio de revestimiento hasta llegar a un setting menor a 15 mm. De acuerdo a los registros del setting medido en campo se puede indicar que operar con valores de 13 a 15 mm de setting puede ser sostenible hasta finalizar el tiempo de vida del forro (las fechas de cambio se presentan en Anexo I).

3.6. Tiempo de asentamiento de revestimientos.

De acuerdo a los datos se observa que el tiempo de asentamiento promedio de la chancadora N° 2 utilizando forros de doble maquinado se reduce en 7 días respecto al forro maquinado, en el caso de la chancadora pebbles 3 la disminución fue de 3 días como se observa en la tabla 2.

Considerando que la eficiencia de reducción de la chancadora es controlada a través del setting, para términos de evaluación se calcula el “setting promedio” del período de uso del revestimiento, que considera CSS durante el tiempo de asentamiento y CSS de operación normal.

Se muestra claramente una reducción de setting alcanzado con los forros de doble maquinado que va de 16.1 a 14.1 mm en la chancadora 02 y de 15.2 a 14.5 mm en la chancadora 03 (ver Anexo I).

Tabla 2. Tiempo de asentamiento – pebbles 2 y pebbles 3.

| Tiempo Asentamiento (días) | Maquinado | Doble Mecanizado |
|---------------------------------------|------------------|-------------------------|
| Pebbles 2 | 15 | 8 |
| Pebbles 3 | 10 | 7 |
| Promedio | 12.5 | 7.5 |

3.7. Tiempo de duración de revestimientos

Los tiempos de duración de los revestimientos promedios durante la evaluación fueron los siguientes:

Tabla 3. Tiempo de duración promedio pebbles 2 y pebbles 3.

| Duración (horas) | Estándar | Maquinado | Doble Mecanizado |
|-------------------------|-----------------|------------------|-------------------------|
| Pebbles 2 | 1144 | 1042 | 1040 |
| Pebbles 3 | 1271 | 1021 | 902 |
| Promedio | 1207 | 1032 | 971 |

Para realizar el análisis de tiempo de duración se considera los revestimientos usados durante el 2018 que considera revestimiento estándar, maquinado y doble maquinado.

Respecto a los revestimientos instalados en la chancadora pebbles 2, se observa que la duración de revestimientos con perfil maquinado y doble maquinado son menores respecto a los forros originales o estándar que van entre 100 a 102 horas menos, como se observa en la tabla 3.

En el caso de los revestimiento para la chancadora chancadora pebbles 3 se muestra una menor duración entre el estándar y maquinado de 250 horas (aproximadamente 10 días) y la diferencia entre el maquinado y doble maquinado de 119 horas (aproximadamente de 05 días), lo cual se deduce en una mayor frecuencia de cambio para los forros propuestos.

3.8. Ratio de reducción – muestreos

En la evaluación se considera muestreos realizados desde el mes de junio del año 2018 fecha en que inicia pruebas con los revestimientos.

Tabla 4. Resumen de muestras de chancadoras de pebbles.

| Fecha Muestreo | Chancadora Pebbles 1 | | | | Chancadora Pebbles 2 | | | | Chancadora Pebbles 3 | | | |
|----------------|----------------------|----------------|------------|-----------------|----------------------|----------------|------------|-----------------|----------------------|----------------|------------|-----------------|
| | Abertura (mm) | Tonelaje (t/h) | Tipo Forro | Ratio Reducción | Abertura (mm) | Tonelaje (t/h) | Tipo Forro | Ratio Reducción | Abertura (mm) | Tonelaje (t/h) | Tipo Forro | Ratio Reducción |
| 13/06/2018 | 13.9 | 549 | Estándar | 2.7 | 13.5 | 540 | Estándar | 3.2 | 19.1 | 537 | Mecanizado | 3.4 |
| 9/09/2018 | 18.8 | 660 | Estándar | 3.2 | 13 | 570 | Mecanizado | 4.3 | 13 | 616 | Mecanizado | 4.7 |
| 21/10/2018 | 13.5 | 690 | Estándar | 2.1 | 13 | 592 | Doble Mec. | 3.4 | 13.7 | 511 | Doble Mec. | 3.4 |
| 24/10/2018 | 13.4 | 616 | Estándar | 3.3 | 13.1 | 522 | Doble Mec. | 4.6 | 13.1 | 536 | Doble Mec. | 4.2 |

Del resumen de muestreos se puede deducir el siguiente análisis:

- Se observa que el ratio de reducción de las chancadoras pebbles 2 y 3 mantienen valores mayores respecto a la chancadora pebbles 1, ya sea cuando se opera con forros maquinados o doble maquinado, lo cual indica que esta variable se ha mantenido.
- Respecto a la alimentación granulométrica se observa que la chancadora pebbles 1 presenta una distribución ligeramente fina comparado con la alimentación a las chancadoras pebbles 2 y 3 que es atribuido a la segregación del mineral en el stock pile. Ver Anexo J.
- Por otra parte si bien se demuestra que el ratio de reducción en las chancadoras alcanza valores mayores a 3, que son condiciones normales de reducción para estos equipos, los valores del P80 no guardan relación con los datos del setting y no llega actualmente a los valores del criterio de diseño producto 80% pasante de 13 mm.

3.9. Evaluación económica

La evaluación considera el incremento de tratamiento por un mayor % de finos (% -1 pulg.) debido a la reducción del tiempo de asentamiento en las chancadoras utilizando forros de doble maquinado respecto al forro maquinado. El porcentaje de finos se ve incrementado en 1% por un período de 33 días durante el año (Esto considera 5 días de disminución de tiempo de asentamiento en 6.6

cambios de forros al año en promedio), que equivale a un incremento de tratamiento de 82000 toneladas al año, utilizando el modelo de tonelaje en función al porcentaje de finos siguiente:

$$\text{TMSD} = (109.9 * \% \text{finos} - 1) + 2946.7 * (1 - \text{Hum.}) * \text{Hrs. Ope.} / 1000.$$

Para los cálculos se considera el incremento de cobre fino originado por un mayor tratamiento, utilizando los valores reales de ley y recuperación alcanzando en el 2018, según se observa que la tabla 5.

Tabla 5. Cálculo de ingreso por mayor tratamiento

| Cálculo de Ingresos Total por Mayor Tratamiento | |
|--|----------------|
| Tonelaje Anual Incrementado | 82171 |
| Ley Promedio (%Cu) | 0.91 |
| Recuperación Promedio (%) | 86.41 |
| Cu Finos (toneladas Cu) | 647 |
| Cu Finos Pagables (toneladas Cu) | 628 |
| Ingreso: | |
| Precio Cu (\$/tonelada) | 5920 |
| Ingreso por Incremento de Finos (\$) | 3717409 |
| Costo Operativo (\$/tonelada) | 5.5 |
| Costo Operación (\$) por Mayor Tonelaje | 451939 |
| Ingreso Total (\$) | 3265470 |

El ingreso total registra valores de 3265470 \$ anuales, al cual se resta el costo adicional de los forros de doble maquinado debido a su menor tiempo de duración que equivale a 16,628 dólares, generando finalmente un ingreso neto de 3248842 \$ al año utilizando forros doble maquinado.

CONCLUSIONES

Se determinó que la implementación de las mejoras en los equipos de la zaranda y la chancadora de pebbles fue de influencia directa, aumentando el tonelaje procesado de 2987 t/h a 3163 t/h en la segunda línea de molienda; y en el cambio de los revestimientos de las chancadoras de pebbles se determinó que existe una mayor tendencia de cierre del setting que se traduce en la reducción del tamaño del producto de las chancadoras de pebbles N°2 y N°3 operando con los revestimientos de doble maquinado, lo cual indicaría un beneficio con este revestimiento propuesto.

Respecto a los objetivos específicos se concluyó de la siguiente manera:

- Se realizó la descripción de cada uno de las etapas que componen el área de molienda; como son recuperación de mineral de grueso, proceso de molienda y chancado pebbles.
- Se determinó una disminución de la carga circulante en la molienda secundaria de la línea N°1 de 333% con 13 mm de abertura de malla; a 330% con 14.5 mm de abertura de malla y aumento de la carga circulante en la molienda secundaria de la línea N°2 que inicialmente fue de 226% con 13mm de abertura de malla; a 248% con 14.5 mm de abertura de malla.
- La eficiencia de clasificación en la zaranda presenta un ligero decremento, de 98.0% a 97.4% en la línea N°1, se podría indicar que no presento cambio significativo; mientras que en la línea N°2 no presenta cambio, 97.9% vs 97.7%.
- Los revestimientos de doble maquinado han presentado un mejor performance para reducción del producto de chancadoras, por otro lado el uso de un manto adicional al año, es pagado sin problemas por el beneficio obtenido en molienda.
- Por otra parte si bien se demuestra que el ratio de reducción en las chancadoras alcanza valores mayores a 3, que son condiciones normales de reducción para estos equipos, los valores del P80 no guardan relación con los datos del setting y no llega actualmente a los valores del criterio de diseño Producto 80% pasante de 13 mm.

- Respecto a la evaluación económica se concluye que utilizando revestimientos de doble maquinado se obtiene un ingreso anual de 3248842 \$ debido a un mayor tratamiento en Molienda por menor tiempo de asentamiento (mayor porcentaje de finos alimentado al molino SAG durante el menor tiempo de asentamiento), esto equivale a un beneficio de tonelaje del orden de 10 t/h.

BIBLIOGRAFIA

Bechtel. (2011). *Filosofía de Operación Concentrador Colectivo Proyecto Las Bambas Xstrata S.A.* Tecnico.

Jesmin. (2015). Manual de Operaciones de Planta Concentradora Las Bambas. Perú. Obtenido de www.jesmin.com/manuallasbambas

Las Bambas. (01 de Julio de 2019). Obtenido de <http://www.lasbambas.com/excelencia-operativa>

Magne, L., & Titichoca, G. (2015). Conminución de Minerales.

Metalurgia MMG . (2019). *Evaluación de Circuito de Molienda SAG de la Planta Concentradora Las Bambas.* Tecnico, Unidad Minera Las Bambas.

Metalurgia MMG. (2018). *Caracterización de Pebbles Generados.* técnico.

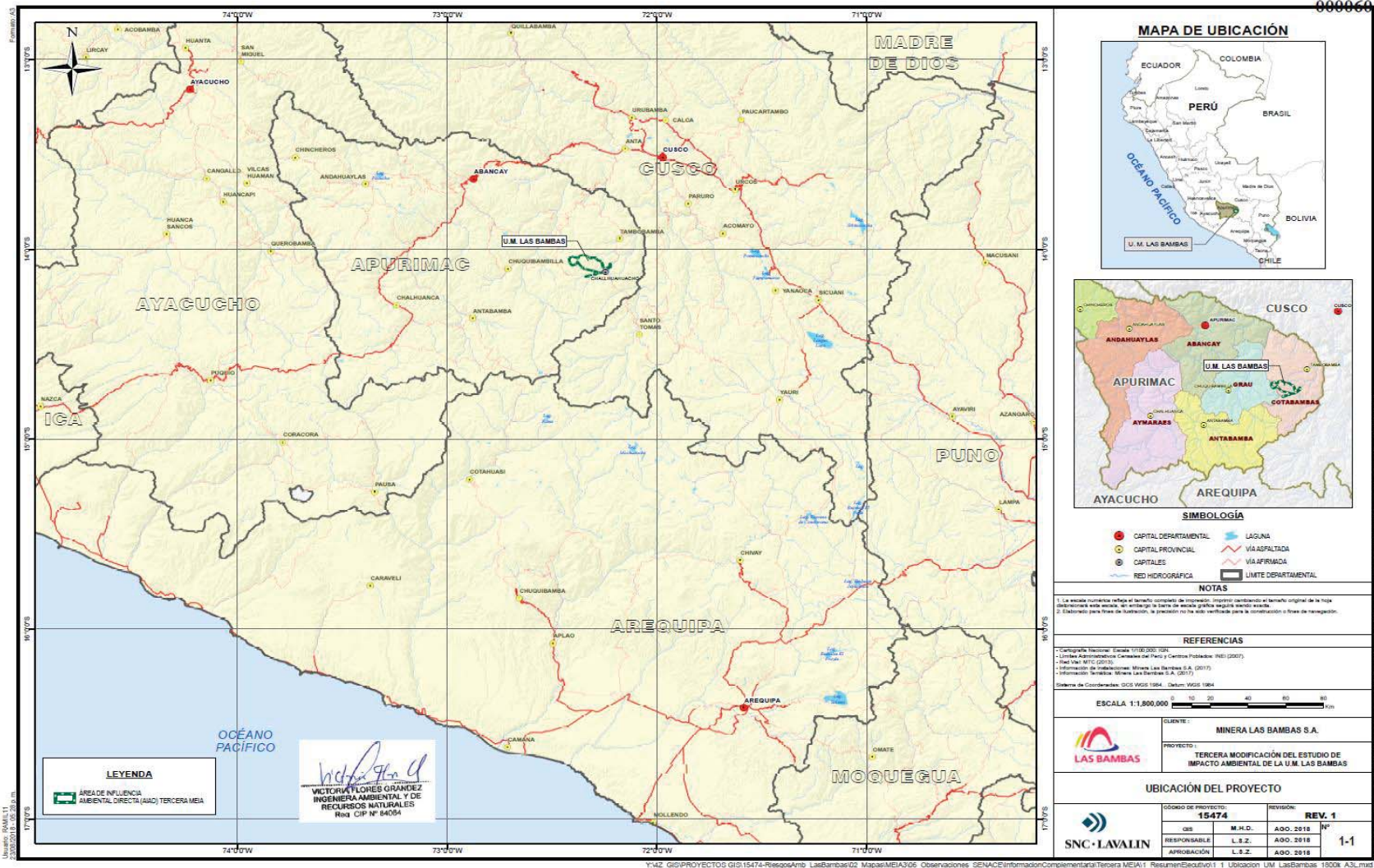
Metso Minerals. (2004). *Conocimientos Basicos en el Procesamiento de Minerales.*

MMG-Lasbambas. (2016). *Informe de Sostenibilidad 2016.* Obtenido de http://www.lasbambas.com/informe-de-sostenibilidad-2016/pdf/INFORME_DE_SOSTENIBILIDAD_2016.pdf

SNC-Lavalin Perú. (2018). *Resumen Ejecutivo de la Tercera Modificación del Estudio de Impacto Ambiental de la Unidad Minera Las Bambas.*

ANEXOS

A: Ubicación de Las Bambas



B: Matriz de Consistencia

“PROCESOS Y MEJORAS EN EL AREA DE MOLIENDA DE LA PLANTA CONCENTRADORA – MINERA LAS BAMBAS”

| PROBLEMA GENERAL | OBJETIVO GENERAL | HIPOTESIS PRINCIPAL | DISEÑO METODOLOGICO |
|---|---|--|---|
| ¿Cómo influyen las mejoras implementadas en los equipos a los parámetros del área de molienda? | Determinar cómo influye la implementación de mejoras en los equipos a los parámetros de molienda. | Existe influencia entre la implementación de mejoras de los equipos y los parámetros del área de molienda. | <p>Tipo de estudio</p> <p>Analítico - descriptivo</p> <p>Diseño: Experimental</p> <p>Área de estudio: Área de molienda de la planta concentradora – minera Las Bambas.</p> |
| PROBLEMAS ESPECIFICOS | OBJETIVOS ESPECIFICOS | HIPOTESIS ESPECIFICOS | |
| ¿Cuál es la relación entre la carga circulante de pebbles y de molienda secundaria con el cambio de mallas de las zarandas? | Determinar la relación entre la carga circulante de pebbles y de molienda secundaria con el cambio de mallas de las zarandas. | Existe influencia del cambio de mallas en la carga circulante de pebbles y molienda secundaria. | |
| ¿Cuál es la relación entre la eficiencia de clasificación y el cambio de mallas de la zaranda? | Determinar la relación entre la eficiencia de clasificación y el cambio de mallas de la zaranda. | Existe influencia del cambio de mallas en la eficiencia de clasificación de las zarandas. | |
| ¿Cuál es la relación entre el tamaño de producto de las chancadoras de pebbles y sus revestimientos? | Determinar la relación entre el tamaño de producto de las chancadoras de pebbles y sus revestimientos. | Existe relación entre los revestimientos nuevos y el producto de las chancadoras de pebbles. | |
| ¿Cuál es la relación entre los nuevos revestimientos de las chancadoras de pebbles y respecto al aumento de tratamiento que se refleja en un beneficio económico? | Determinar la relación entre los nuevos revestimientos de las chancadoras de pebbles y respecto al aumento de tratamiento que se refleja en un beneficio económico. | El cambio de revestimientos nuevos de la chancadora está relacionada directamente con el aumento de tratamiento de la planta que a su vez es un aumento en el beneficio económico. | |

C. Prueba Hipotesis – Carga Circulante de Pebbles.

Prueba t de 2 muestras para Carga Circulante Pebbles, % por Periodo - Línea No.1 Informe de resumen

¿Difieren las medias?



La media de Antes es significativamente diferente de la media de Despues ($p < 0.05$).

Muestras individuales

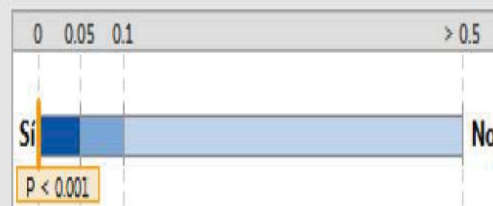
| Estadísticas | Antes (13.0 mm) | Después (14.5 mm) |
|----------------------|-----------------|-------------------|
| Tamaño de la muestra | 20 | 25 |
| Media | 21.749 | 17.583 |
| IC de 95% | (20.68, 22.81) | (16.414, 18.753) |
| Desviación estándar | 2.2751 | 2.8334 |

Diferencia entre muestras

| Estadísticas | *Diferencia |
|-------------------------------|------------------|
| Diferencia | 4.1652 |
| IC de 95% | (2.6284, 5.7021) |
| *Diferencia = Antes - Despues | |

Prueba t de 2 muestras para Carga Circulante Pebbles, % por Periodo - Línea No.2 Informe de resumen

¿Difieren las medias?



La media de Antes es significativamente diferente de la media de Despues ($p < 0.05$).

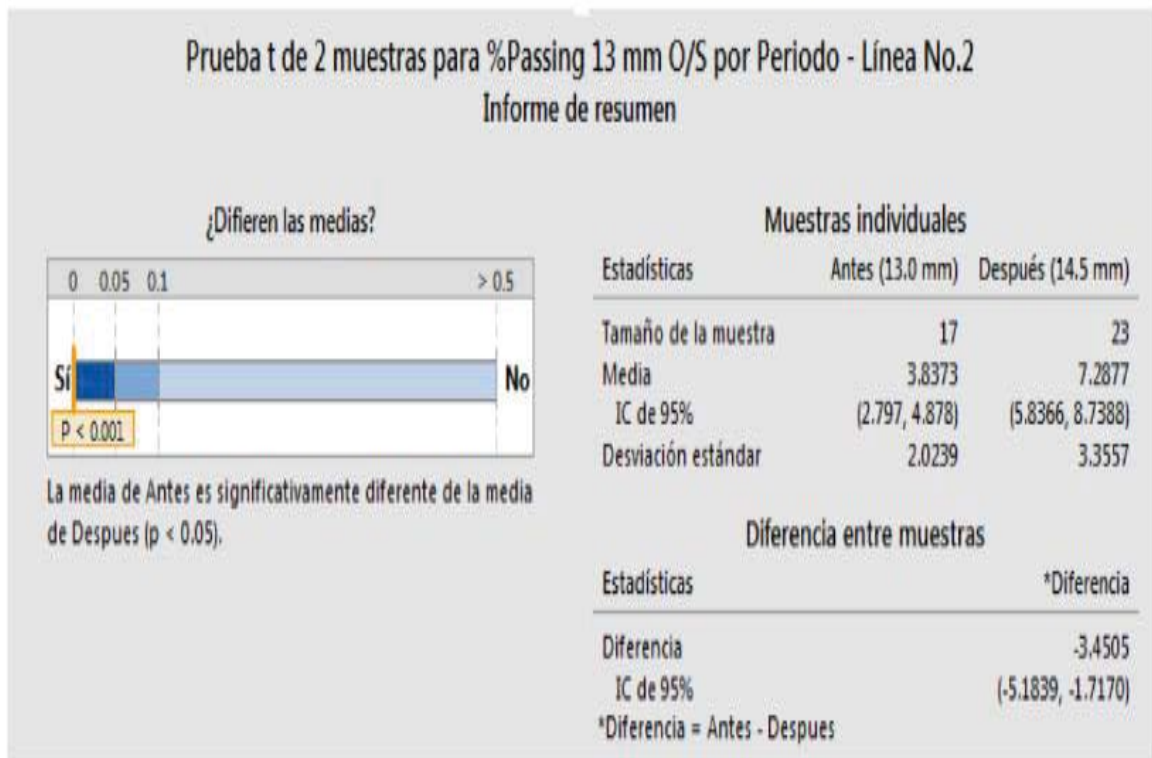
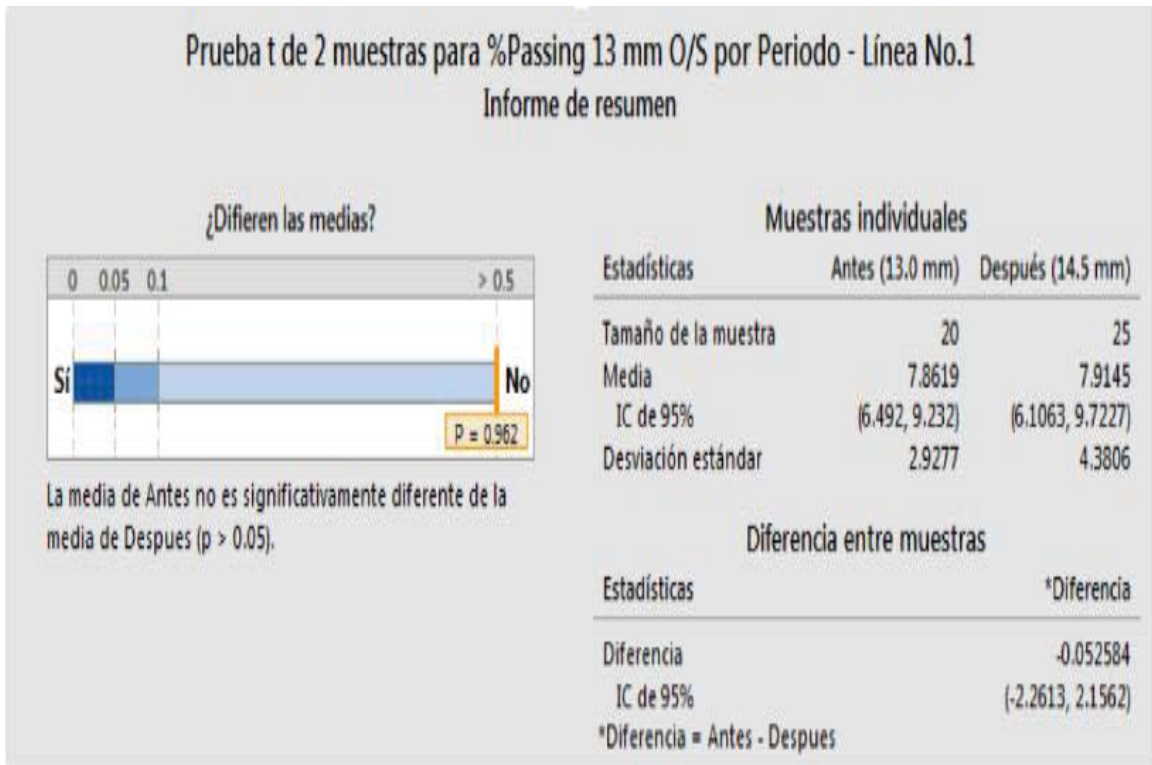
Muestras individuales

| Estadísticas | Antes (13.0 mm) | Después (14.5 mm) |
|----------------------|-----------------|-------------------|
| Tamaño de la muestra | 17 | 23 |
| Media | 23.161 | 15.668 |
| IC de 95% | (21.53, 24.80) | (14.042, 17.294) |
| Desviación estándar | 3.1797 | 3.7597 |

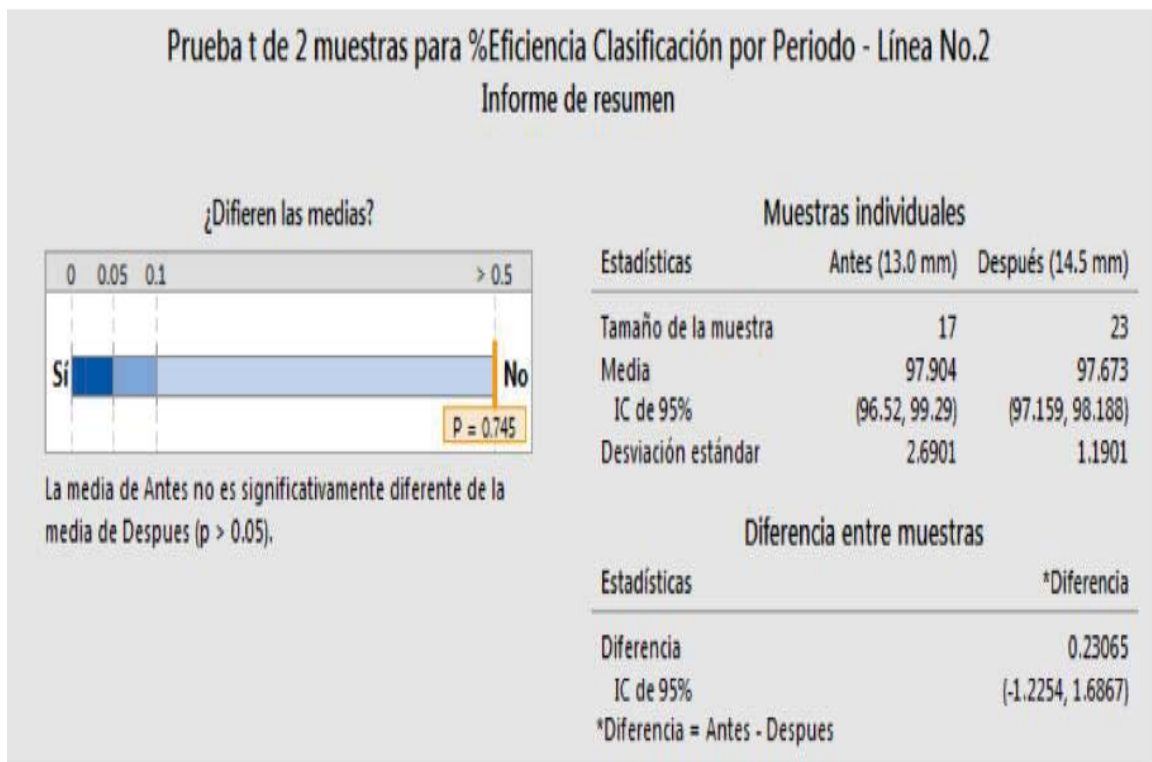
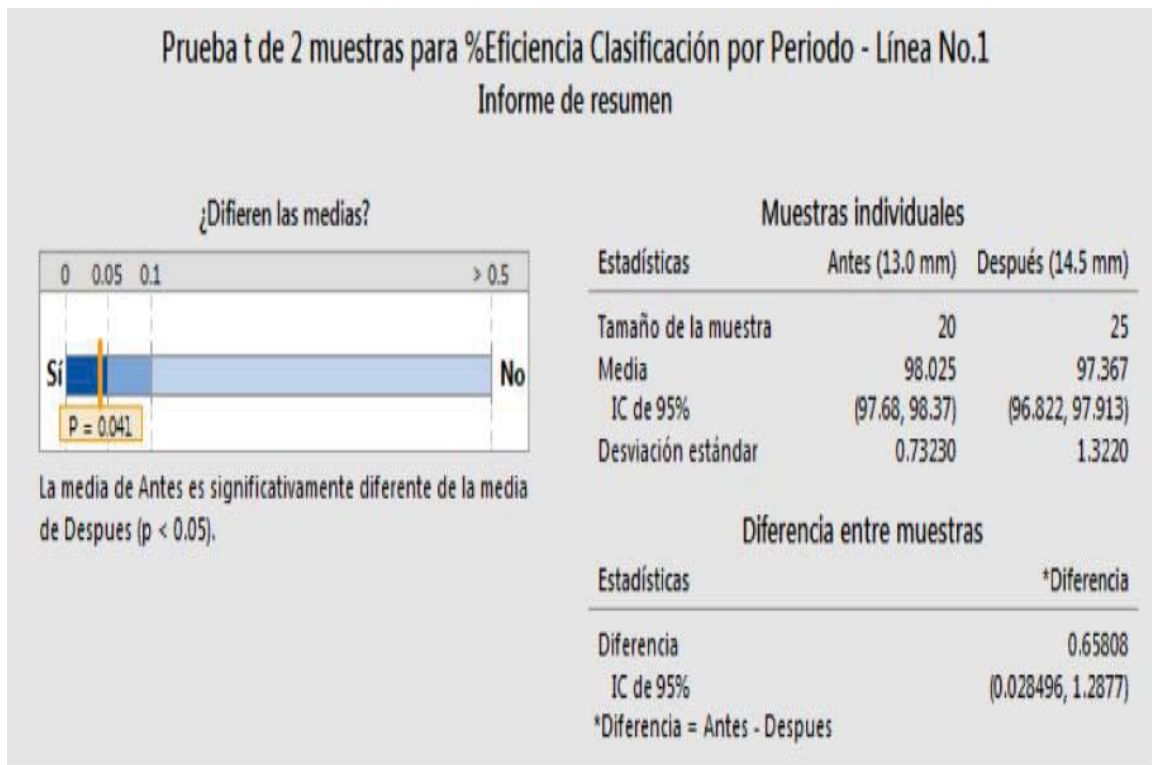
Diferencia entre muestras

| Estadísticas | *Diferencia |
|-------------------------------|------------------|
| Diferencia | 7.4932 |
| IC de 95% | (5.2650, 9.7214) |
| *Diferencia = Antes - Despues | |

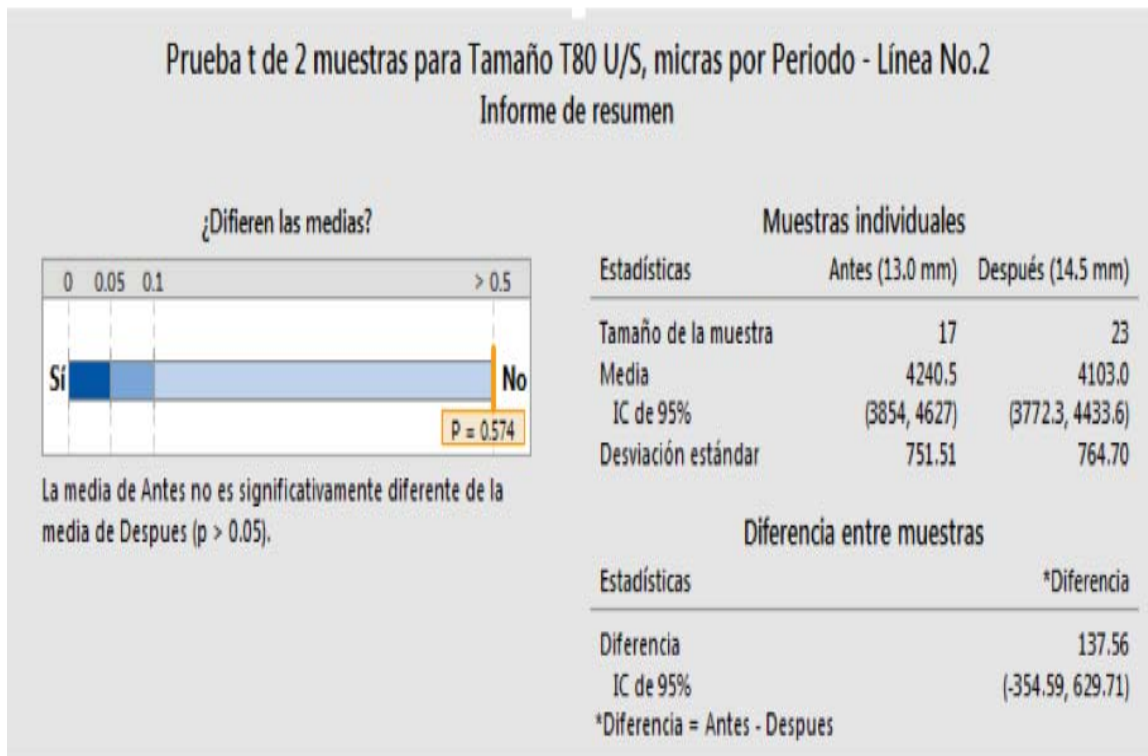
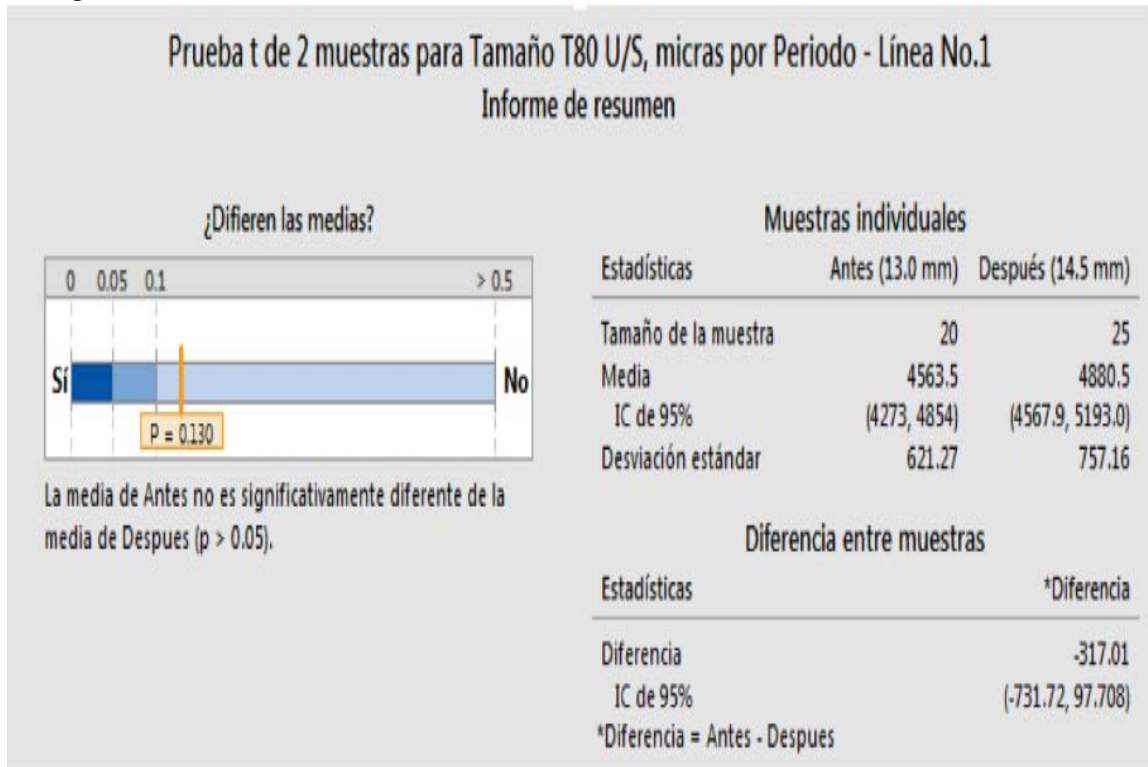
D. Prueba Hipótesis –Tamaño pasante 13 mm del over screen.



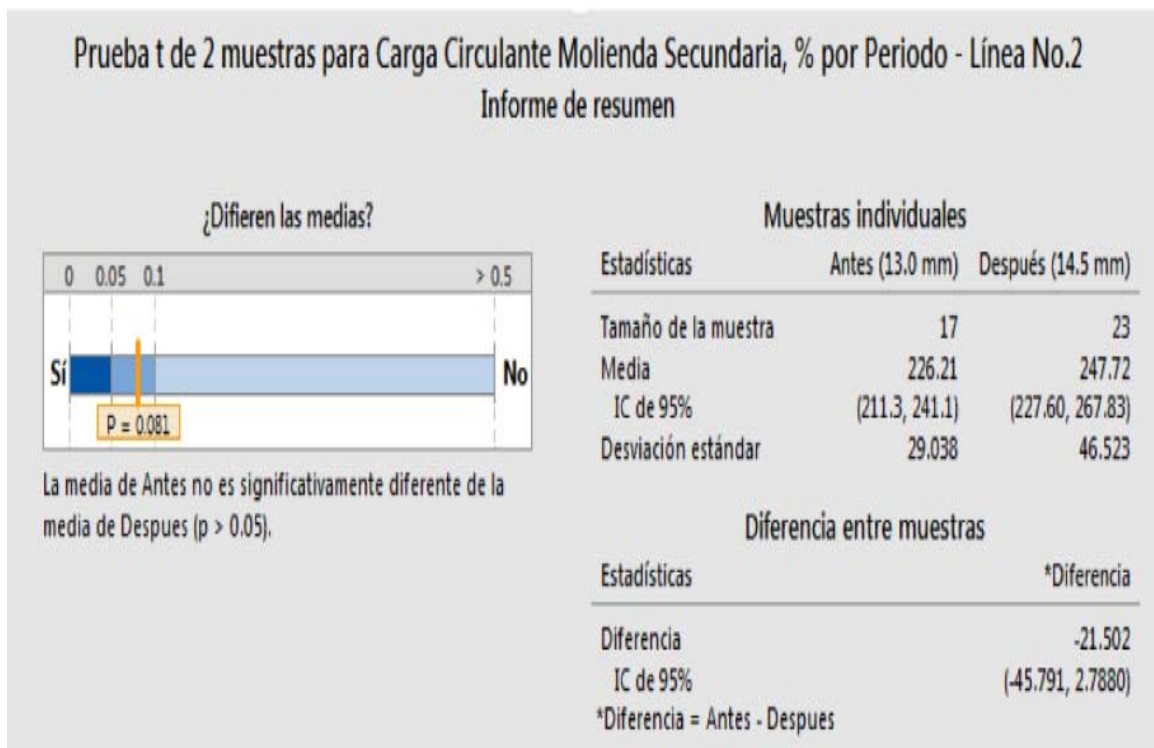
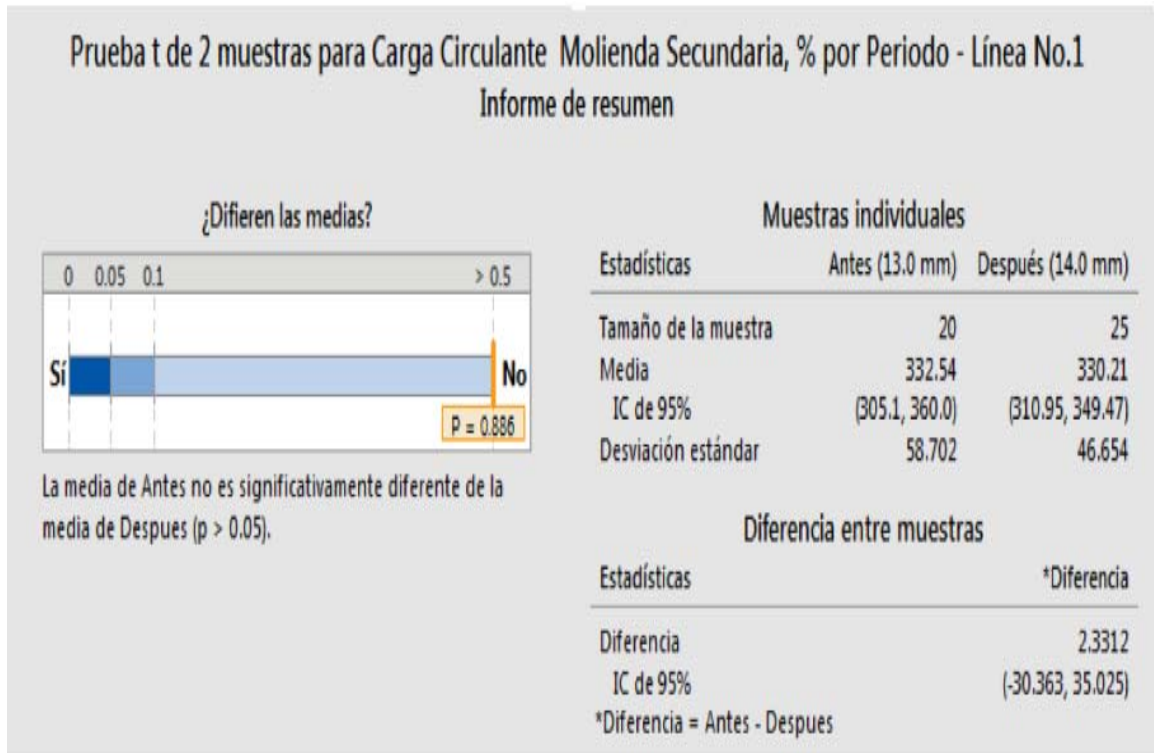
E. Prueba Hipótesis - Eficiencia de Clasificación.



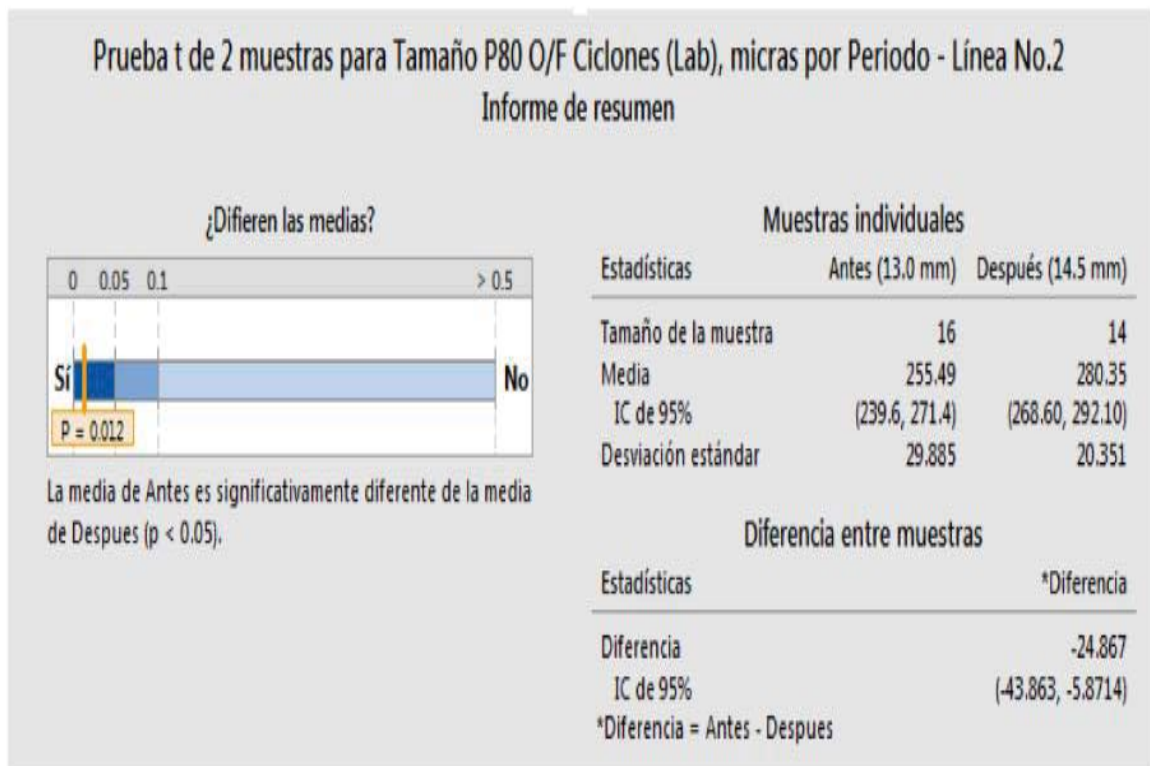
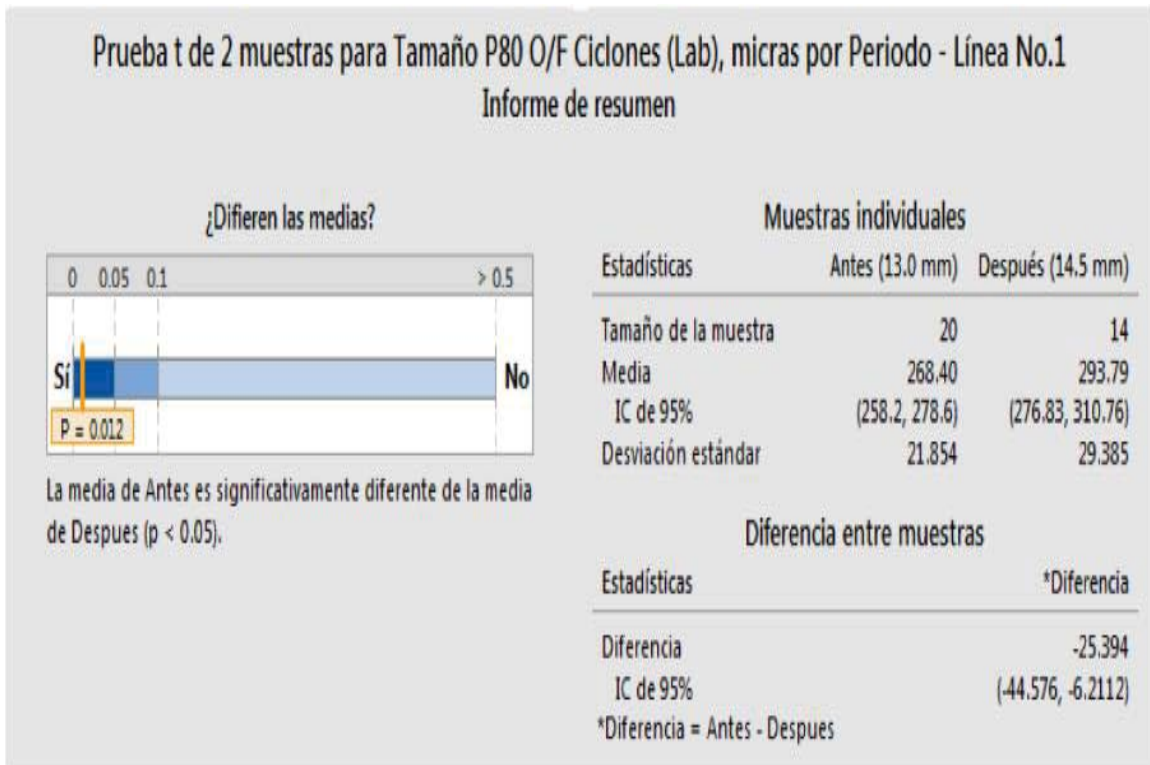
F. Prueba Hipótesis – Tamaño T80 del Under Screen.



G. Prueba Hipótesis – Carga Circulante en la Molienda Secundaria.



H. Prueba Hipótesis – Tamaño P80 del Over Flow de Ciclones.

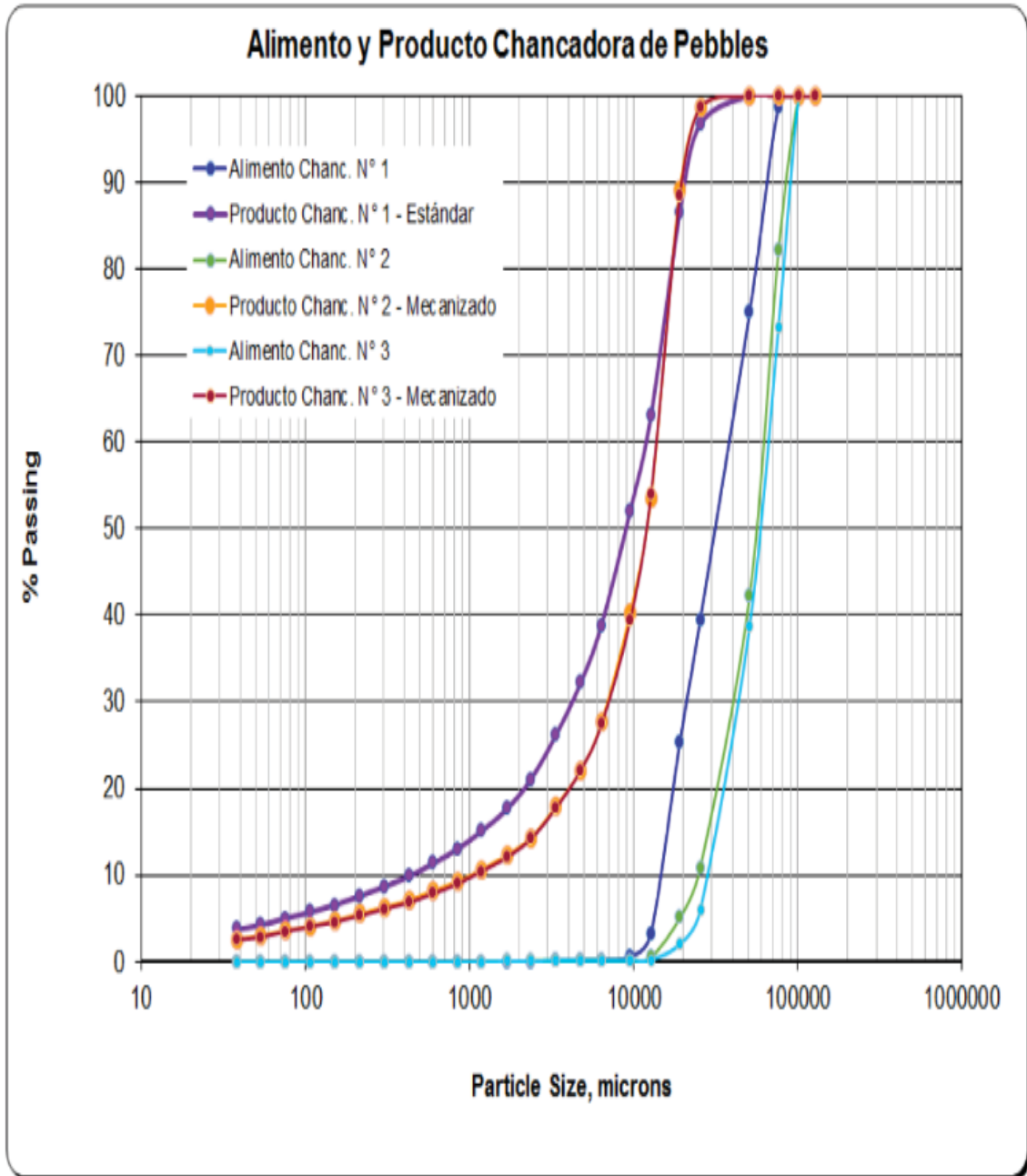


I. Tipos, fechas de cambio de revestimientos y setting de operación.

| Chancadora | Fecha Inicio | Fecha Fin | Tipo de Forro |
|-------------------|-------------------------|-------------------------|----------------------|
| Pebbles 03 | 04 de junio de 2018 | 25 de julio de 2018 | Maquinado |
| Pebbles 02 | 23 de junio de 2018 | 19 de agosto de 2018 | Maquinado |
| Pebbles 03 | 28 de julio de 2018 | 15 de setiembre de 2018 | Maquinado |
| Pebbles 02 | 21 de agosto de 2018 | 05 de octubre de 2018 | Maquinado |
| Pebbles 03 | 18 de setiembre de 2018 | 08 de noviembre de 2018 | Doble Maquinado |
| Pebbles 02 | 07 de octubre de 2018 | 01 de diciembre de 2018 | Doble Maquinado |

| Abertura (mm) | Maquinado | Doble Maquinado |
|----------------------|------------------|------------------------|
| Pebbles 02 | 16.1 | 14.1 |
| Pebbles 03 | 15.2 | 14.5 |
| Promedio | 15.6 | 14.3 |

J. Análisis Granulométrico de Chancadoras de Pebbles en evaluación de forros muestreo 09 de setiembre de 2018.



K. Análisis Granulométrico de Chancadoras de Pebbles en evaluación de forros muestreo 21 de octubre de 2018.

