



UNIVERSIDAD DEL AZUAY
FACULTAD DE CIENCIA Y TECNOLOGÍA
ESCUELA DE INGENIERÍA EN MINAS

“Optimización del proceso de conminución en la planta de beneficio PROMINE, Camilo Ponce Enríquez - Azuay”

Trabajo de graduación previo a la obtención del título de:

INGENIERO EN MINAS

Autor:

CARLOS ALBERTO PÁSTOR YÁNEZ

Director:

FERNANDO TULIO VALENCIA GUARICELA

CUENCA – ECUADOR

2022

DEDICATORIA

Dedico el presente trabajo de manera muy especial a mi abuelita Martha Rogel quien me educó y me supo aconsejar todo el tiempo, me enseñó a ser una persona responsable desde temprana edad lo que me ha hecho estar presente hoy en día en esta etapa muy importante de mi vida. Se ha convertido en un pilar fundamental y en una motivación emocional para poder seguir hacia adelante con esta meta y muchas más.

A mis padres George y Katty en quienes he visto cualidades de personas honradas y trabajadoras que se esfuerzan día a día para un futuro mejor, por lo que me han enseñado a valorar y a esforzarme para poder llegar a convertirme en un buen profesional.

A mis tíos Luis, Marco y Martha quienes me han ayudado y han apoyado desde niño, me han guiado por el buen camino mediante sus enseñanzas y sus ejemplos de vida para alcanzar muchos logros y ser una persona de bien.

A todos mis hermanos y primos que han estado conmigo apoyándome de una u otra manera, inspirándome para ser un ejemplo y una guía para ellos.

AGRADECIMIENTO

Agradezco en primer lugar a Dios por la vida, la salud y la sabiduría que ha impartido en mí, por cuidarme y bendecirme cada día en mis estudios y en mi trabajo, por ser testigo de mis esfuerzos y proveerme la valentía para continuar con todas mis metas propuestas.

Agradecer infinitamente a mi abuelita Martha por cuidarme desde niño y por la paciencia para inculcarme valores y consejos positivos que me han ayudado bastante para tomar decisiones a lo largo de esta carrera profesional.

Agradezco a la empresa minera Promine Cía. Ltda. y a su junta de accionistas por haberme brindando la oportunidad de expandir mis conocimientos, por la confianza depositada en mí para realizar el presente trabajo teórico – experimental en su planta de beneficio.

De igual manera agradecer a mi tutor de tesis de grado el Ing. Fernando Valencia, por el recibimiento desde una primera instancia, el conocimiento, apoyo y el seguimiento para encaminar este trabajo de una manera correcta y profesional, logrando cambiar la expectativa del trabajo que se viene desarrollando en la industria minera. A mis maestros el Ing. Leonardo Núñez y el Ing. Eduardo Luna por todos los conocimientos compartidos en las diferentes materias y por brindarme la confianza para realizar mi trabajo final de graduación.

ÍNDICE DE CONTENIDOS

DEDICATORIA.....	II
AGRADECIMIENTO	III
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
ÍNDICE DE TABLAS.....	X
RESUMEN.....	XII
ABSTRACT	XIII
INTRODUCCIÓN	1
CAPÍTULO 1.....	3
1.1. Aspectos Generales.....	3
1.1.1. Ubicación	3
1.2. Estado de Arte	4
1.3. Procesos de conminución de minerales	5
1.4. Trituración.....	7
1.5. Clasificación, cribado.....	7
1.5.1. Cribas vibrantes.....	8
1.5.2. Criba por Movimiento Rectilíneo o Elíptico.....	8
1.6. Circuitos de trituración	9
1.6.1. Circuitos abiertos	10
1.6.2. Circuitos cerrados.....	12
1.6.3. Carga circulante	13
1.6.4. Cálculo de la carga circulante	14
1.6.5. Carga circulante para el circuito CL – F	15
1.6.6. Razón de reducción	16
1.7. Etapas de trituración	16
1.7.1. Trituración Primaria	16

1.7.1.1. Trituradora o Quebrantadora de mandíbulas.....	17
1.7.1.2. Trituradoras giratorias	31
1.7.2. Trituración Secundaria.....	36
1.7.2.1. Trituradora Cónica.....	36
1.7.2.2. Trituradora de Cilindros	43
1.7.3. Trituración terciaria.....	46
1.7.3.1. Trituradora cónica	46
1.7.3.2. Trituradoras de martillos	47
1.8. Descripción de la planta de beneficio PROMINE.....	48
1.8.1. Zaranda Primaria.....	51
1.8.2. Trituración Primaria.....	51
1.8.3. Zaranda Secundaria.....	53
1.8.4. Trituración Secundaria.....	53
1.8.5. Trituración Terciaria	54
CAPÍTULO 2.....	57
2. Metodología y ensayo experimental	57
2.1. Método aplicado para el ensayo.....	57
2.2. Caracterización del mineral.....	57
2.3. Muestreo y secado del mineral.....	58
2.4. Preparación de muestras.....	60
2.5. Análisis granulométrico	63
2.5.1. Alimentación.....	65
2.5.2. Fino Zaranda #1	67
2.5.3. Grueso Zaranda #1	68
2.5.4. Descarga Trituradora #1.....	70
2.5.5. Fino Zaranda #2	71
2.5.6. Grueso 1 Zaranda #2	73
2.5.7. Grueso 2 Zaranda #2	74
2.5.8. Descarga Trituradora #2.....	76
2.5.9. Descarga Trituradora #3.....	77
2.6. Modelamiento digital del proceso.....	78
2.6.1. Modelamiento general del circuito de conminución.....	79
2.6.2. Modelamiento Zaranda #1	80
2.6.3. Modelamiento Trituradora #1	82
2.6.4. Modelamiento Zaranda #2	84
2.6.5. Modelamiento Trituradora #2	87
2.6.6. Modelamiento Trituradora #3	88
2.6.7. Carga Circulante: Zaranda #2 – Trituradora #2 y Trituradora #3.....	89

CAPÍTULO 3.....	92
3. Análisis de Resultados	92
3.1. Interpretación de resultados	92
3.1.1. Zaranda Primaria.....	92
3.1.2. Zaranda Secundaria.....	93
3.1.3. Trituración Terciaria	96
3.2. Análisis de alternativas	96
3.2.1. Opción 1.- Cambio configuración Zaranda #1.....	97
3.2.2. Opción 2.- Cambio configuración Zaranda #2.....	97
3.2.3. Opción 3.- Cambio de equipo Trituradora #3 y configuración Zaranda #2	98
3.3. Determinación de parámetros óptimos	98
3.3.1. Parámetros óptimos – Zaranda #1	98
3.3.2. Parámetros óptimos – Zaranda #2.....	100
3.3.3. Parámetros óptimos – Trituradora #3 y configuración Zaranda #2	102
3.4. Optimización del proceso de conminución	104
 CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	 106
Conclusiones	106
Recomendaciones	108
 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	 110

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1.1: Acceso a la planta PROMINE.....	4
Figura 1.2: Diagrama de quebradoras: a) Cono, b) Quijada.....	6
Figura 1.3: Criba movimiento rectilíneo y elíptico.....	9
Figura 1.4: Esquema circuito abierto: F.....	11
Figura 1.5: Esquema circuito abierto: CL – F	11
Figura 1.6: Esquema circuito cerrado: F-CL	12
Figura 1.7: Esquema circuito cerrado: CL-F	13
Figura 1.8: Distribución de tamices	14
Figura 1.9: Dimensiones de boca de carga de trituradora Blake	20
Figura 1.10: Partes de la trituradora Doble Efecto (Blake)	23
Figura 1.11: Corte Trituradora tipo Blake	24
Figura 1.12: Esquema Trituradora de Simple Efecto	25
Figura 1.13: Variables de cámara de trituración.....	27
Figura 1.14: Curvas del coeficiente de alimentación.....	30
Figura 1.15: Densidad media y aparente de minerales	31
Figura 1.16: Esquema Trituradora Giratoria.....	31
Figura 1.17: Corte Trituradora Giratoria	32
Figura 1.18: Esquema selección de mantos de trituradoras giratorias.....	33
Figura 1.19: Partes de Trituradora Giratoria.....	34
Figura 1.20: Capacidad trituradoras de mandíbulas y giratorias	35
Figura 1.21: Esquema de un cono Symons.....	37
Figura 1.22: Sección transversal funcional de una trituradora de cono.....	39
Figura 1.23: Modelo Estándar	40
Figura 1.24: Modelo Cabeza Corta.....	41
Figura 1.25: Tipos de cámara de los hidroconos	42
Figura 1.26: Formas de cabeza y tazón de trituradora giratoria (a) y de cono (b).....	43
Figura 1.27: Trituradora de Rodillos	44
Figura 1.28: Trituradora de impacto de un rotor	47
Figura 1.29: Diagrama de flujo de la planta PROMINE	48
Figura 1.30: Molino chileno (4 ruedas)	49

Figura 1.31: Molino de Bolas (6' x 6')	49
Figura 1.32: Tolva de gruesos	50
Figura 1.33: Zaranda primaria	51
Figura 1.34: Equipo recolector de elementos no triturables	52
Figura 1.35: Zaranda secundaria	53
Figura 1.36: Trituradora de mandíbulas (secundaria)	54
Figura 1.37: Trituradora de mandíbulas (terciaria)	55
Figura 1.38: Tolva de almacenamiento	56
Figura 2.1: Puntos de muestreo	59
Figura 2.2: Secado natural del mineral	60
Figura 2.3: Muestras secas	60
Figura 2.4: Descarga Trituradora 1	61
Figura 2.5: Cuarteo muestra (Descarga Trituradora #2)	62
Figura 2.6: Muestras guardadas en bolsas	62
Figura 2.7: Balanza (CAS)	64
Figura 2.8: Juego de tamices y agitador mecánico	64
Figura 2.9: Modelamiento general del proceso de conminución	79
Figura 2.10: Modelamiento Zaranda #1	80
Figura 2.11: Gráfica de resultados de Alimentación	81
Figura 2.12: Gráfica de resultados de Fino Zaranda #1	81
Figura 2.13: Gráfica de resultados de Grueso Zaranda #1	82
Figura 2.14: Modelamiento Trituradora #1	83
Figura 2.15: Gráfica de resultados de Descarga Trituradora #1	83
Figura 2.16: Modelamiento Zaranda #2	84
Figura 2.17: Gráfica de resultados de Fino Zaranda #2	85
Figura 2.18: Gráfica de resultados de Grueso 1 Zaranda #2	85
Figura 2.19: Gráfica de resultados de Grueso 2 Zaranda #2	86
Figura 2.20: Modelamiento Trituradora #2	87
Figura 2.21: Gráfica de resultados de Descarga Trituradora #2	87
Figura 2.22: Modelamiento Trituradora #3	88
Figura 2.23: Gráfica de resultados de Descarga Trituradora #3	89

Figura 2.24: Modelamiento Carga Circulante Zaranda #2	90
Figura 2.25: Diagrama de flujos del proceso de conminución	91
Figura 3.1: Análisis granulométrico modelado Grueso Zaranda #1	93
Figura 3.2: Análisis granulométrico experimental Grueso 1 Zaranda #2	94
Figura 3.3: Análisis granulométrico experimental Grueso 2 Zaranda #2	95
Figura 3.4: Alimentación Trituradora #2	95
Figura 3.5: Alimentación Trituradora #3	95
Figura 3.6: Parámetros originales y simulados	98
Figura 3.7: Resultados simulados con parámetros nuevos – Zaranda #1	99
Figura 3.8: Flujo nuevo en Grueso Zaranda #1	99
Figura 3.9: Nuevo modelamiento Zaranda #2	100
Figura 3.10: Nuevos resultados Fino Zaranda #2	101
Figura 3.11: Nuevos resultados Grueso Zaranda #2	101
Figura 3.12: Cambio de parámetros en malla superior – Zaranda #2	102
Figura 3.13: Modelamiento Trituradora de Cono	103
Figura 3.14: Resultados simulados Descarga Trituradora de Cono	103

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1: Distribución de tamaños de una muestra	15
Tabla 1.2: Definición de variables del proceso, malla (j)	15
Tabla 1.3: Coeficientes de utilización	29
Tabla 1.4: Coeficientes de alimentación	29
Tabla 1.5: % de paso para cono Symons	42
Tabla 1.6: % de paso para Hidrocono	42
Tabla 1.7: Características técnicas de trituradora primaria de mandíbulas.....	52
Tabla 1.8: Características técnicas de trituradora secundaria de mandíbulas	54
Tabla 1.9: Características técnicas de trituradora terciaria de mandíbulas	55
Tabla 2.1: Peso de muestras	63
Tabla 2.2: Continuación - Peso de muestras	63
Tabla 2.3: Tamaño de tamices	65
Tabla 2.4: Análisis granulométrico de Alimentación – Muestra #1	65
Tabla 2.5: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Alimentación	66
Tabla 2.6: Porcentaje Acumulado pasante final de Alimentación	66
Tabla 2.7: Análisis granulométrico de Fino Zaranda #1 - Muestra #1	67
Tabla 2.8: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Fino Zaranda #1	67
Tabla 2.9: Porcentaje Acumulado pasante final de Fino Zaranda #1	68
Tabla 2.10: Análisis granulométrico de Grueso Zaranda #1 - Muestra #1	68
Tabla 2.11: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Grueso Zaranda #1	69
Tabla 2.12: Porcentaje Acumulado pasante final de Grueso Zaranda #1	69
Tabla 2.13: Análisis granulométrico de Descarga Trituradora #1 – Muestra #2	70
Tabla 2.14: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Descarga Trituradora #1 ...	70
Tabla 2.15: Porcentaje Acumulado pasante fina de Descarga de Trituradora #1	71
Tabla 2.16: Análisis granulométrico de Fino Zaranda #2 - Muestra #2	71
Tabla 2.17: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Fino Zaranda #2.....	72
Tabla 2.18: Porcentaje Acumulado pasante final de Fino Zaranda #2	72
Tabla 2.19: Análisis granulométrico de Grueso 1 Zaranda #2 - Muestra #1	73
Tabla 2.20: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Grueso 1 Zaranda #2	73
Tabla 2.21: Porcentaje Acumulado pasante final de Grueso 1 Zaranda #2	74

Tabla 2.22: Análisis granulométrico de Grueso 2 Zaranda #2 - Muestra #1	74
Tabla 2.23: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Grueso 2 Zaranda #2	75
Tabla 2.24: Porcentaje Acumulado pasante final de Grueso 2 Zaranda #2	75
Tabla 2.25: Análisis granulométrico de Descarga Trituradora #2 - Muestra #1.....	76
Tabla 2.26: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Descarga Trituradora #2 ...	76
Tabla 2.27: Porcentaje Acumulado pasante final de Descarga Trituradora #2.....	77
Tabla 2.28: Análisis granulométrico de Descarga Trituradora #3	77
Tabla 2.29: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Descarga Trituradora #3 ...	78
Tabla 2.30: Porcentaje Acumulado pasante final de Descarga Trituradora #3.....	78

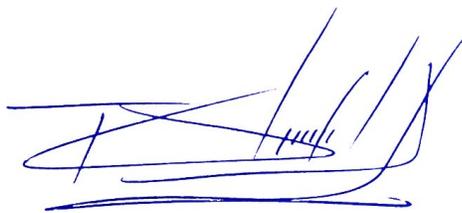
**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CONMINUCIÓN EN LA PLANTA DE
BENEFICIO PROMINE, CAMILO PONCE ENRÍQUEZ – AZUAY”**

RESUMEN

El presente trabajo de investigación permitió lograr la optimización del proceso de conminución de la planta PROMINE, mediante la caracterización, evaluación y modelamiento de la operación actual en el software MinProSim. Para ello se realizaron análisis granulométricos de los flujos de corriente de cada sistema.

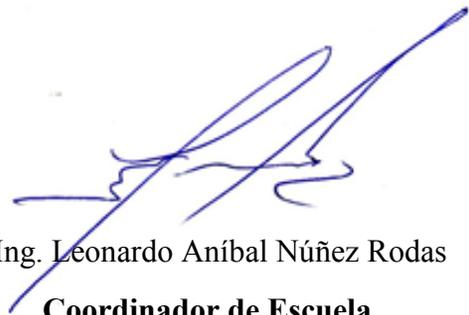
Con la interpretación de los resultados se plantearon una serie de alternativas basadas en los aspectos técnicos - económicos. Estas se enfocaron en tres opciones de solución; la opción 1 fue modificar las dimensiones de la zaranda #1, aumentando su longitud a 1,8 metros; en la opción 2 se configuró la zaranda #2, eliminando la malla inferior y conservando su malla superior al igual que las dimensiones originales; y, en la opción 3 se propone la instalación de una trituradora de conos. Con la opción 1 se generó una eficiente clasificación y se optimizó el proceso de trituración.

Palabras clave: optimización, conminución, modelamiento, simulación, clasificación.



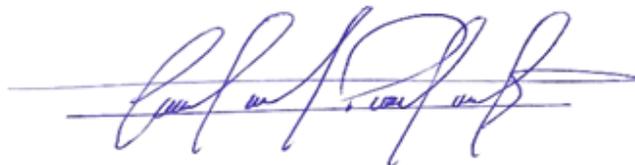
Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Director del Trabajo de Titulación



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinador de Escuela



Carlos Alberto Pástor Yánez

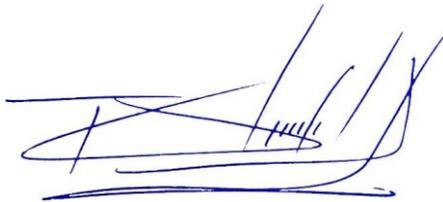
Autor

**“OPTIMIZATION OF THE COMMINUTION PROCESS AT THE PROMINE
PROCESSING PLANT, CAMILO PONCE ENRÍQUEZ – AZUAY”**

ABSTRACT

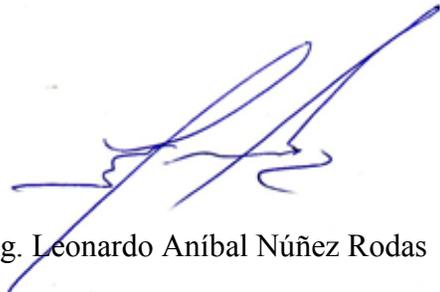
The present research work allowed achieving the optimization of the comminution process of the PROMINE plant, through the characterization, evaluation and modeling of the current operation in the MinProSim software. For this purpose, granulometric analyses of the current flows of each system were carried out. With the interpretation of the results, a series of alternatives were proposed based on technical-economic and performance aspects. These focused on three solution options; option 1 was to modify the dimensions of screen #1, increasing its length to 1.8 meters; option 2 configured screen #2, eliminating the lower mesh and keeping its upper mesh as well as the original dimensions; and option 3 proposed the installation of a cone crusher. Option 1 generated an efficient classification and optimized the crushing process.

Keywords: optimization, comminution, modeling, simulation, classification.



Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Director of the Degree Project



Ing. Leonardo Aníbal Núñez Rodas

Coordinator of the School



Carlos Alberto Pástor Yánez

Author

Translated by



Carlos Pástor



Carlos Alberto Pástor Yánez

Trabajo de Titulación

Ing. Fernando Tulio Valencia Guaricela

Marzo, 2022

**“OPTIMIZACIÓN DEL PROCESO DE CONMINUCIÓN EN LA PLANTA DE
BENEFICIO PROMINE, CAMILO PONCE ENRÍQUEZ – AZUAY”**

INTRODUCCIÓN

La minería del cantón Camilo Ponce Enríquez en el sector Bella Rica, en sus inicios utilizó metodologías anti técnicas que repercutieron en la eficiencia de la recuperación del oro y además generaron una contaminación a la naturaleza, los insumos que empleaban y los equipos utilizados no les garantizaban un correcto proceso. Sin embargo, la actividad minera continuó desarrollándose; con el transcurso del tiempo las operaciones se fueron innovando gracias a la llegada de nuevas tecnologías provenientes de países más desarrollados, las cuales ayudaron significativamente a impulsar la industria minera local especialmente en las fases de explotación y de beneficio mineral.

El beneficio mineral involucra una gama de equipos, que van desde pequeñas hasta grandes dimensiones, todos estos equipos forman sistemas y circuitos para procesos que operan secuencialmente encaminados hacia la obtención de los metales o minerales de interés. El factor más importante en el beneficio del mineral es el proceso de conminución, que es la parte fundamental para llegar a recuperaciones metalúrgicas altas y es la primera etapa de esta fase.

El siguiente trabajo de titulación tiene como objetivo optimizar el proceso de conminución de la planta PROMINE, la cual posee criterios y estrategias implementadas al inicio de sus actividades sin la disposición de la tecnología actual ya que en ese entonces no había mucha información técnica; sin embargo, mediante una caracterización y evaluación de la operación actual del proceso de conminución, además de una modelación del proceso en un software minero se pretende analizar nuevas alternativas para obtener resultados

eficientes. Todo esto se desarrolló con la ayuda de un software minero de simulación de circuitos de conminución, el cual ayudó a mejorar el proceso de conminución.

El trabajo a realizar es de carácter teórico – experimental en donde se recopila la información bibliográfica sobre el proceso y los equipos empleados en la trituración, la recolección de las muestras se la hace in situ en la planta de beneficio, específicamente en el circuito de trituración y posteriormente serán llevadas al laboratorio de la Escuela de Minas para poder desarrollar la fase experimental y obtener los parámetros de operación del proceso de conminución.

CAPÍTULO 1

1.1. Aspectos generales

La actividad minera en el distrito minero Bella Rica se ha incrementado en los últimos años, se han desarrollado nuevas labores mineras dentro de las diferentes áreas pertenecientes al sector, en su mayoría se han celebrado contratos de operación con los titulares de las concesiones mineras. Los operadores mineros han ido desarrollando día a día las fases de exploración hasta descubrir yacimientos minerales y pasar a la fase de explotación, o vienen realizando simultáneamente ambas fases; obteniendo así el mineral o metal de interés que genere una rentabilidad económica de la actividad.

El beneficio del mineral es la fase donde se centrará el presente estudio; el beneficio consiste en un proceso metalúrgico que tiene como objetivo extraer los metales contenidos en las estructuras mineralizadas. La planta de beneficio PROMINE viene operando desde hace 20 años, empezó con una cantidad limitada de equipos y no contaba con todos los procesos metalúrgicos, después de cierto tiempo, con los descubrimientos de los nuevos procesos metalúrgicos y con una inversión económica, se incrementó progresivamente sus operaciones y por ende su infraestructura.

1.1.1. Ubicación

La planta de beneficio PROMINE se encuentra en el sector La López (parte alta), cantón Camilo Ponce Enríquez, provincia de Azuay y está dentro de la concesión minera Bella Rica código 15. La planta se localiza en una zona de topografía irregular, las coordenadas de referencia UTM WGS84 son: X= 642420 Y= 9657894.

El acceso se lo va a describir desde el cantón Camilo Ponce Enríquez, el punto de partida es el parque central del cantón, para ello, se debe tomar la calle Francisco Vidal hasta llegar a la carretera principal que es la Troncal de la Costa, una vez situados en la vía principal hay que ubicarse en sentido Naranjal – Machala. Siguiendo esa dirección a una distancia de 760 metros se encuentra una vía de segundo orden a lado izquierdo, que recibe el nombre de entrada al sector de La López. En la vía al sector de La López se debe recorrer un aproximado de 5,2 km de distancia, justamente ahí se observa una carretera de tercer orden hacia el lado izquierdo, siendo la subida al campamento de la empresa. Y finalmente

a 150 metros en la subida del carretero se encuentra la planta de beneficio PROMINE. El recorrido desde el parque central hasta la planta se hace en un tiempo de 15 minutos.

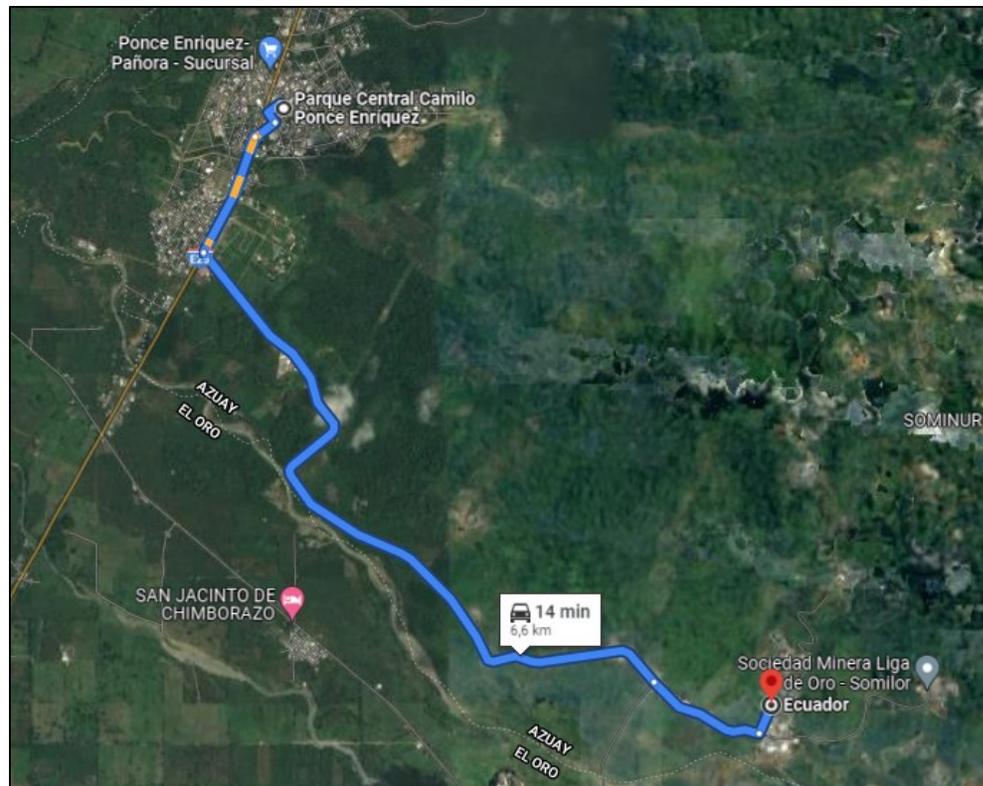


Figura 1.1: Acceso a la planta PROMINE

Fuente: Google Maps

1.2. Estado del arte

“Evaluación técnico económica de circuitos de conminución para procesar un mineral de oro usando el software JKsimMet”

El trabajo presenta un estudio técnico - económico de dos circuitos de conminución para un proyecto minero situado en Western Australia. Ambos circuitos fueron diseñados para procesar 300 t/h. Utilizando las pruebas metalúrgicas y los parámetros recomendados por JK Tech ambos circuitos fueron simulados en JKSimMet. Los resultados arrojados por el software fueron utilizados para la selección y dimensionamiento de equipos. Los circuitos propuestos fueron evaluados económicamente y el costo operativo del circuito en el Caso 2 es considerablemente mayor que el Caso 1 (Montoya, 2017).

“Evaluación del circuito de conminución para mejorar el mineral fino particulado en la empresa EMC Green Group – planta Yacari”

El trabajo se desarrolla como parte de la mejora del sistema de reducción de tamaños y liberación de las partículas para el procesamiento de minerales. Dentro del sistema de producción se encuentra una serie de etapas siendo la más importante la preparación mecánica de los minerales, es decir, la molienda del mineral en la cual se reduce de tamaño del material que proviene de la etapa de chancado. Las etapas de chancado y molienda son las que mayor consumo energético significan a la planta. Su manejo operativo es importante para evitar paradas imprevistas que conllevan a pérdidas económicas, por lo que, es importante analizar esta etapa para obtener una liberación de partículas adecuadas en la extracción de los minerales de interés (Quispe, 2019).

“Evaluación metalúrgica de la etapa de chancado y molienda – clasificación, del circuito de minerales sulfurados en la planta aurífera Century Mining Perú S.A.C.”

El área temática del trabajo consistió en realizar una evaluación y control del circuito de chancado, molienda y clasificación del circuito #1; en este trabajo se determinó las variables que más influyen en el proceso, principalmente la granulometría. Se trabajó en base a muestreos que fueron realizados en los distintos flujos de las etapas de conminución y clasificación, determinando así los parámetros de operación. Los datos obtenidos fueron ajustados por los métodos de Lagrange, factores de ponderación y modelos matemáticos (Urday, 2021).

1.3. Procesos de conminución de minerales

La conminución indica una acción de reducción del tamaño de un mineral, mediante la trituración y molienda. Todas estas acciones permiten liberar las especies valiosas contenidas dentro del mineral, también facilita el manejo de los sólidos y se obtiene un mineral de tamaño apropiado y controlado (Inacap, s.f.).

Los materiales sólidos pueden romperse de tres maneras diferentes, para las cuales se utilizan las máquinas de conminución que generan fuerzas de: compresión, impacto y frotamiento con cizalla (Ortiz & Tirado, 2005).

Ante la aplicación de fuerzas de compresión o de tracción, el material debería distribuir de manera uniforme estas fuerzas y romperse una vez se haya aplicado una fuerza igual o superior a la resistencia de los enlaces; sin embargo, generalmente se fracturan los elementos a fuerzas menores debido a que:

- Durante el proceso de formación, minado y manejo previo en el mineral se pueden formar grietas.
- El mineral está constituido por especies diseminadas de diferente comportamiento mecánico (Inacap, s.f.).

En una planta de procesamiento de minerales, la conminución comienza en la etapa de trituración, donde el mineral en seco es reducido entre 50 cm hasta 15 cm en trituradoras o quebradoras de tipo cono o quijada (Figura 1.2). El índice de reducción de las partículas es controlado mediante la abertura de salida de las trituradoras, las cuales posteriormente son clasificadas mediante cribas (generalmente de tipo vibratorias) para continuar la línea de proceso o recircularlas (Navarro, 2020).

“Para el control metalúrgico, operacional y chequeo de las características de diseño de una planta de conminución de minerales, es importante contar con toda la información necesaria para realizar los balances de materiales en cada punto del proceso” (Apaza, 2018, p. 13).

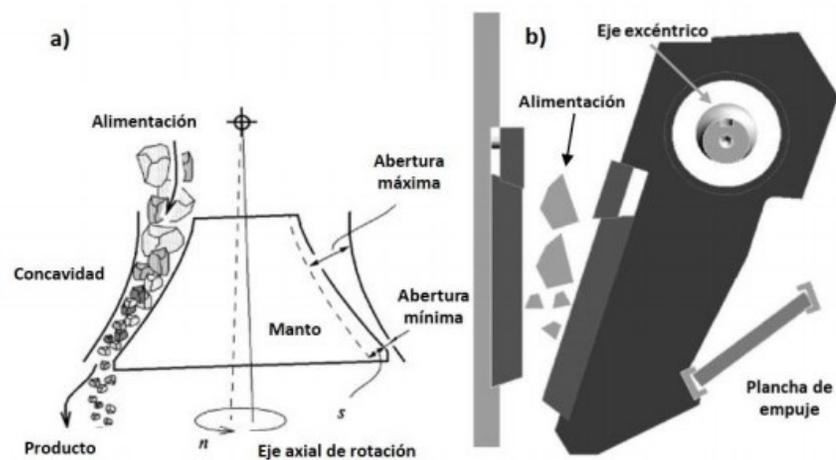


Figura 1.2: Diagrama de quebradoras: a) Cono, b) Quijada

Fuente: (Navarro & Delgadillo, 2020)

1.4. Trituración

La trituración es un proceso de fragmentación termodinámica de partículas, en la cual se entrega energía mecánica generando un esfuerzo que permite llevar a cabo su objetivo. La trituración es fundamental para garantizar la eficiencia de los tratamientos posteriores.

La trituración es la primera etapa mecánica en el proceso de conminución, cuyo objetivo principal es reducir el mineral de un tamaño grande a fragmentos de rocas. Generalmente se utiliza para reducir rocas y obtener partículas de hasta 0.5 cm (Alegria, 2014).

La trituración se hace posible debido a cuatro maneras de fractura:

- **La fractura por impacto:** es debido a un golpe instantáneo y seco de algún material consolidado sobre el mineral.
- **Fractura por atrición:** es cuando las partículas se desmenuzan producto de la fricción creada entre dos superficies.
- **Fractura por corte:** el quebrantamiento del material es ocasionado por una fuerza cortante.
- **Fractura por compresión:** provocado por una fuerza generada por una compresión entre dos caras duras (Alcalá, Flores, & Beltrán, 2009).

La trituración de los materiales desempeña un papel muy importante en el tratamiento y elaboración de materias primas de múltiples tipos. En numerosas técnicas, la trituración representa el proceso fundamental a partir del cual se realizan los procesos de tratamiento posteriores (Martes, Cruz, & Valdez, 2015).

“La trituración es también denominada desintegración y las máquinas que la producen se conocen según diversos autores como trituradoras, desintegradoras, quebrantadoras o machacadoras” (Industrias I, 2015, p. 4).

1.5. Clasificación, cribado

Durante el proceso de trituración se crean productos debido a la fragmentación que sufren cada una de las partículas, los productos presentan una serie de tamaños de partículas que conciernen clasificar de acuerdo a su granulometría (Blanco, 2014).

La clasificación es una etapa importante en la granulometría del material, cumple con la función de separar de un conjunto de materiales, a diferentes productos cada uno con un distinto tamaño, de acuerdo a las características que presente el equipo clasificador.

Los clasificadores se los emplea habitualmente en los circuitos de trituración junto a los equipos trituradores, y mayormente en el circuito cerrado con el objetivo de optimizar el proceso de conminución en los consumos de energía y costos asociados a los equipos (Blanco, 2014).

La denominación mediante un número representativo como el D80 expresa el tamaño de la malla cuadrada teórica que produce un corte de tal forma que el 80% del producto es pasante, menor que el tamaño de malla, y el otro 20% es el rechazo o tamaño de los productos mayor que la malla (Blanco, 2014, pág. 1).

1.5.1. Cribas vibrantes

Son los equipos que más se ha utilizado últimamente en todas las industrias que realizan procesos de clasificación, ofrecen varias ventajas lo que las han hecho de la mejor elección para efectuar los trabajos, las ventajas son las siguientes:

- Gran capacidad de procesamiento
- Poseen mayor eficiencia de cribado, debido a la vibración
- Dimensiones aceptables a los espacios
- Puede abarcar varios rangos de tamaño (Blanco, 2014).

1.5.2. Criba por movimiento rectilíneo o elíptico

Las cribas con movimiento rectilíneo o elíptico son semi horizontales y tienen un eje rotando. El eje tiene una masa excéntrica incorporada y cuando estas masas son colocadas con un desfase a 45° generan un movimiento tipo elíptico, mientras que si las masas están desfasadas a 180° el movimiento originado produce un movimiento rectilíneo (Blanco, 2014).

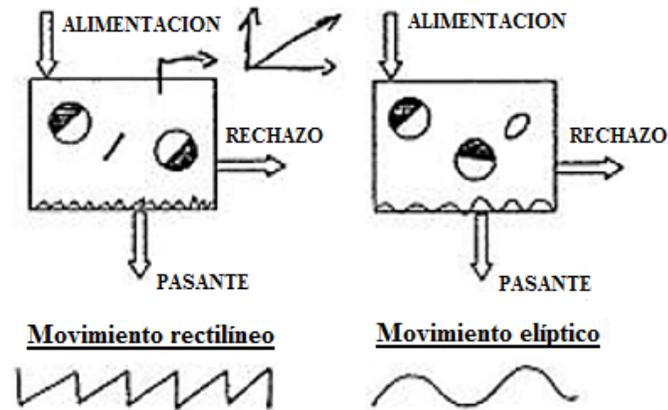


Figura 1.3: Criba movimiento rectilíneo y elíptico

Fuente: (Blanco, 2014)

1.6. Circuitos de trituración

“Los circuitos de trituración y de molienda son una combinación en serie y paralelo de trituradores, clasificadores, silos, cintas, sistemas de control, etc., que en general representan fuertes inversiones” (Blanco, 2014, p. 78).

Por lo general en las plantas con circuitos de trituración; el triturado se lo realiza en un medio seco, es decir, no se agrega agua en el sistema y además la trituración se efectúa en etapas sucesivas.

“Industrialmente se utilizan diferentes tipos de máquinas de trituración y suelen clasificarse de acuerdo a la etapa en que se utilizan y el tamaño de material tratado” (Alcalá, Flores, & Beltrán, 2009, p. 6).

“La disposición de eliminadores de elementos no triturables en el circuito, pueden ser por ejemplo electroimanes adheridos a los equipos principales, los cuales tienen la función de no forzar ni dañar los equipos de conminución en etapas previas o posteriores” (Blanco, 2014, p. 78).

El personal que opera el circuito de trituración debe ser muy consciente de la responsabilidad que conlleva manejar cada equipo, así mismo, la seguridad e higiene hace necesario la utilización de equipos de protección personal, para evitar caída de material o

proyección de materiales, además, evitar atrapamientos dentro de las trituradoras (Blanco, 2014).

En las operaciones de los circuitos de trituración se debe llevar un control riguroso de al menos los siguientes parámetros:

- Tonelajes de entrada
- Tonelajes de salida por productos
- Producciones horarias de equipos
- Cargas circulantes
- Consumo de potencia de trituradoras
- Regulación de los equipos (Blanco, 2014).

“Los circuitos de fragmentación son combinaciones de equipos, básicamente un clasificador (CL) y un fragmentador (F) a los que se introduce la alimentación (A) y se descarga el producto (P)” (Blanco, 2014, p. 1).

Los circuitos de trituración se dividen en dos grupos:

- Circuitos abiertos
- Circuitos cerrados

1.6.1. Circuitos abiertos

Este tipo de circuito está caracterizado por tener una alimentación directa y una sola salida, opera con un triturador solo o un triturador y un clasificador con un trabajo sin recirculación. A continuación, se presenta a detalle cada uno de estos sistemas:

- a) Triturador solo:** la alimentación (A) es directa al triturador (F), y la descarga de la trituradora (B) es tal como sale del equipo. Se emplea con una trituración primaria y pocas ocasiones en secundaria (Blanco, 2014). A continuación, se presenta el esquema:



Figura 1.4: Esquema circuito abierto: F

Fuente: (Blanco, 2014)

b) Clasificador – triturador: en este sistema se añade un equipo de clasificación donde se separa el producto menor a D95 y que posteriormente se junta directo con el producto que sale del triturador. Las partículas de mayor tamaño al D95 son enviadas nuevamente a la trituradora hasta reducir su tamaño (Blanco, 2014).

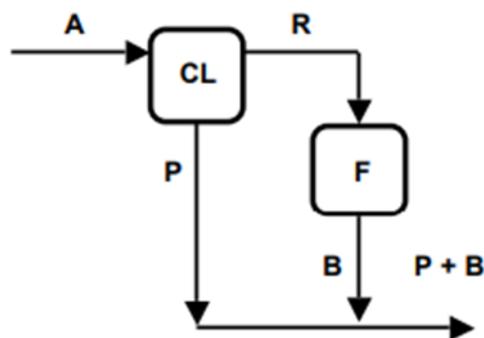


Figura 1.5: Esquema circuito abierto: CL – F

Fuente: (Blanco, 2014)

CL: clasificador

F: triturador

A: alimentación

P: producto pasante, < D95

R: rechazo, > D95

B: material triturado

P+B: descarga del circuito

1.6.2. Circuitos cerrados

Los circuitos cerrados están basados en la presencia de un flujo de material entre el clasificador y el triturador, tienen una circulación interna cerrada originando una carga circulante entre ambos equipos del circuito. A continuación se presentan los dos tipos de este sistema: (Blanco, 2014).

- a) **Triturador – clasificador:** el alimento va directo hacia un triturador (F) y el producto del triturador (B) alimenta a un clasificador (CL), el material $> D_{95}$ vuelve al triturador mezclado con la alimentación y el material pasante del clasificador $< D_{95}$ es el producto de salida (P) del circuito (Blanco, 2014).

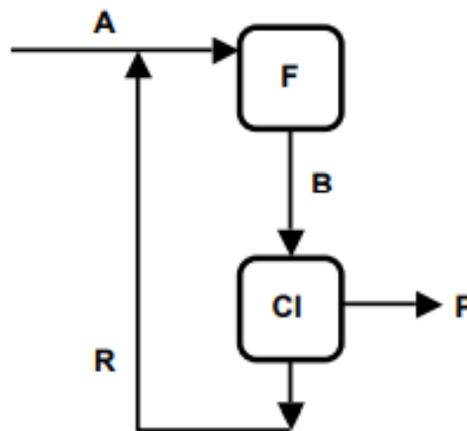


Figura 1.6: Esquema circuito cerrado: F-CL

Fuente: (Blanco, 2014)

CL: clasificador

F: triturador

A: alimentación

B: descarga del triturador

R: rechazo de clasificador, $> d_{95}$

P: pasante de clasificador, $< d_{95}$

P: descarga del circuito

A = P: relación básica

b) Clasificador – triturador: la alimentación va a un clasificador (CL), el rechazo del clasificador ($R > D_{95}$) pasa a un triturador (F), mientras que el pasante del clasificador $< D_{95}$ es el producto resultante (P) y sería la salida del circuito que va listo para el siguiente proceso. Todo el producto del triturador (B) regresa hacia el clasificador (Blanco, 2014).

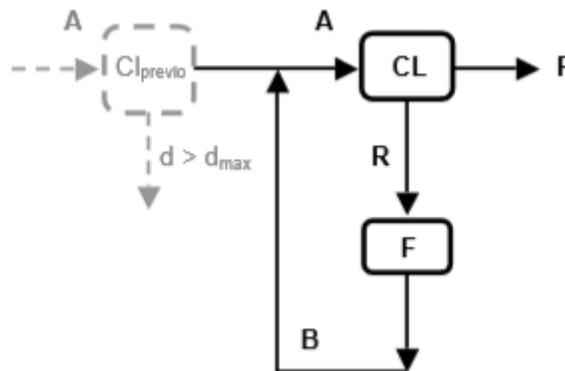


Figura 1.7: Esquema circuito cerrado: CL-F

Fuente: (Blanco, 2014)

Igual que el sistema anterior $A = P$ y también se debe comprobar $R = B$.

1.6.3. Carga circulante

“La carga circulante se define por la relación entre el rechazo del clasificador y la alimentación. El rechazo del clasificador es la fracción que tratada en el equipo no cumple el criterio de tamaño establecido” (Blanco, 2014, p. 5).

La expresión de la carga circulante es la siguiente:

$$Cc = R/A$$

$$Cc (\%) = 100 * R/A \quad (1)$$

La carga circulante puede tener un rango de valores que dependen del circuito siendo los siguientes:

- Circuitos cerrados de trituración: Cc valores pequeños
- Circuitos cerrados de trituración secundaria y terciaria: Cc entre 40% y 150%

1.6.4. Cálculo de la carga circulante

“Para el cálculo de la carga circulante se toman muestras de la alimentación (A), pasante (P), rechazo (R) y fragmentado (B), y estas muestras son analizadas, en cuanto a la distribución de tamaños, en el laboratorio” (Blanco, 2014, p. 5).

Se obtienen las fracciones de las muestras de pasantes y rechazos de un conjunto de tamices en tamaños de manera descendente. Toda la muestra debe pasar por todos los tamices con una vibración y un tiempo necesario para obtener resultados correctos (Blanco, 2014).

Los tamaños del conjunto de mallas deben ser: $m_1 > m_2 > \dots > m_j \dots > m_n$

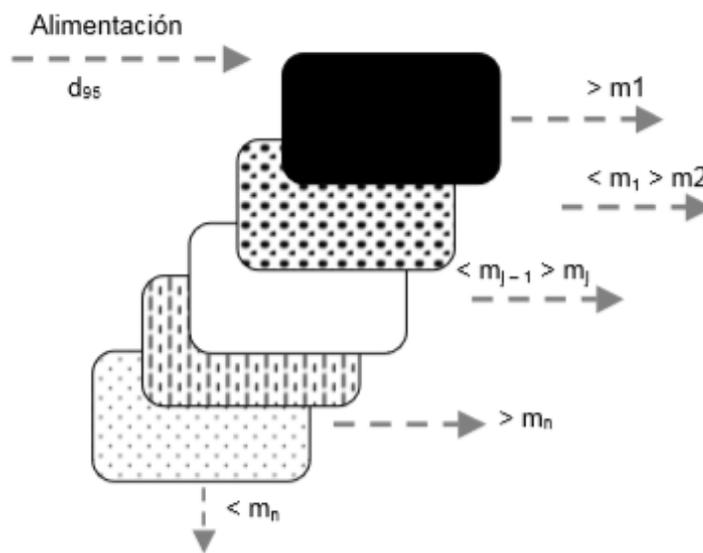


Figura 1.8: Distribución de tamices

Fuente: (Blanco, 2014)

Para los diferentes tamaños de malla se obtienen los valores de la distribución granulométrica dados según el criterio que se encuentra en la tabla 1.1. Se considera una muestra genérica (x) y los pasantes (x_i), tamaños menores que la abertura de malla, y los rechazos ($100 - x_i$), tamaños mayores que la abertura de malla, (j) y se obtiene: (Blanco, 2014, p.5).

Tabla 1.1: Distribución de tamaños de una muestra

Tamaño de malla	Pasante (%)	Rechazo (%)
m1	x1	100 - x1
m2	x2	100 - x2
***	***	***
m _j	x _j	100 - x _j
***	***	***
mn	xn	100 - xn

Fuente: (Blanco, 2014)

La tabla anterior nos ayuda para obtener la curva granulométrica de una muestra, además de identificar y calcular el valor de pasante y rechazo para un valor de tamaño de corte (Blanco, 2014).

Se puede obtener una malla genérica (j) con los puntos de la toma de muestra en el circuito, a continuación, se presenta los valores indicados:

Tabla 1.2: Definición de variables del proceso, malla (j)

Concepto	Denominación	Pasante	Rechazo
Alimentación	A	aj	100 - aj
Pasante	P	pj	100 - pj
Rechazo	R	rj	100 - rj
Fragmentado	B	bj	100 - bj

Fuente: (Blanco, 2014)

1.6.5. Carga circulante para el circuito CL – F

La toma de muestra se la realiza en la alimentación o cuando se tenga la suma de A + B, que es la entrada al clasificador. Las ecuaciones son:

- 1) $A = B$
- 2) $A + B = P + R$
- 3) $R = B$
- 4) $A \cdot aj + B \cdot bj = P \cdot pj + R \cdot rj$

La ecuación de la carga circulante (Cc) es:

$$Cc (CL - F) = \frac{R}{A} = \frac{pj - aj}{bj - rj} \quad (2)$$

Si en caso sea $D = (A + B)$, la C_c será:

$$C_c (CL - F)_D = \frac{R}{A} = \frac{pj-dj}{dj-rj} \quad (3)$$

1.6.6. Razón de reducción

El resultado de la trituración se lo puede medir con la razón de reducción (RR). La RR es la relación entre la dimensión o el tamaño de abertura de la malla cuadrada que permite el alimento del 80 % y la dimensión de la malla cuadrada que permite el paso del 80 % del producto obtenido de la trituradora, la expresión es la siguiente: (Universidad Politécnica de Cartagena, s.f., p. 6).

$$RR = \frac{D_{80} \text{ alimento}}{d_{80} \text{ producto}} \quad (4)$$

1.7. Etapas de trituración

La desintegración se realiza en distintas etapas y en una gran diversidad de máquinas. Se identifica como etapa de trituración primaria cuando el material extraído de la cantera se trata en una trituradora. Si de allí el material producido pasa a una segunda trituradora, esta etapa se conoce como trituración secundaria. Si se sigue triturando el material en otra máquina, se pasaría a la trituración terciaria (Industrias I, 2015, p. 4).

Por lo que la trituración se la puede realizar en varias etapas y se las denomina:

- a) Trituración primaria
- b) Trituración secundaria
- c) Trituración terciaria

1.7.1. Trituración primaria

“La trituración primaria recibe, normalmente, el todo-uno o mineral bruto de la explotación minera y realiza la primera reducción de tamaño. Los equipos utilizan preferentemente las fuerzas de compresión y las de impacto o percusión” (Blanco, 2014, p. 1).

Los equipos para esta trituración se deben caracterizar por la dimensión del tamaño que admiten, por su robustez y por la capacidad de admitir o rechazar elementos no deseados.

En la operación de la reducción de tamaño va a existir un roce y va a producirse un desgaste de partes fundamentales de los equipos de fragmentación (Blanco, 2014).

Los equipos característicos de la trituración primaria son de tres tipos:

- **Quebrantadoras, machacadoras o trituradora de mandíbulas:** estos equipos utilizan como fuerza, la compresión y la aplican de forma discontinua por atrapamiento entre dos mandíbulas, una fija y otra móvil.
- **Trituradoras giratorias:** estos equipos utilizan el mismo principio que las de mandíbulas, pero lo aplican de forma giratoria. En el giro, el material situado en un punto es comprimido y fragmentado.
- **Otros equipos, trituradoras de choque, de impacto y de percusión:** utilizan la energía del impacto, la fuerza de compresión o el cizallamiento según la tecnología empleada (Blanco, 2014).

1.7.1.1. Trituradora o quebrantadora de mandíbulas

Las trituradoras de mandíbulas son uno de los equipos más utilizados en la producción minera metálica y no metálica, es adecuada para triturar una amplia variedad de rocas y minerales los cuales pueden ser de alta dureza, media y dureza suave (Miranda J. , 2013).

“Estas trituradoras se denominan de mandíbulas pues desintegran rocas y minerales en forma similar a la masticación que ejerce el ser humano sobre los alimentos” (Industrias I, 2015, p. 12).

Los pedazos de roca grandes exigen la aplicación de fuerzas muy altas para poder romperlas, en la quebrantadora de mandíbulas esta fuerza se las obtiene de la multiplicación progresiva, por un mecanismo de fuerza infinita (Ortiz & Tirado, 2005).

Las quebrantadoras usadas para rocas de una dureza grande o intermedia, se caracterizan por las superficies que trituran y no son paralelas, sino que convergen hacia abajo y se aproximan y se alejan, pero nunca llegan a establecer contacto entre sí. Está abierta en la parte superior para recibir la alimentación y por debajo, se descarga el producto ya fragmentado (Ortiz & Tirado, 2005).

La amplitud del movimiento de la mandíbula varía entre (1/2" a 3"). Las mandíbulas se abren y se cierran de 250 a 400 veces por minuto. Se trabaja normalmente con una razón de reducción de 4 a 6. Excepcionalmente llega a 8, por las restricciones que impone el ángulo de pellizco (Ortiz & Tirado, 2005).

Las trituradoras de mandíbulas, por lo general en casi todas las industrias se utiliza en la etapa de trituración primaria y casualmente en la trituración secundaria.

Selección de trituradoras

Al momento de seleccionar una trituradora de mandíbulas, se debe tomar en cuenta las siguientes consideraciones:

- Las características del material que va a ser triturado, principalmente comprende la clasificación geológica de la roca, las estructuras físicas y la dureza que posee.
- La capacidad diaria u horaria, para los cálculos de las capacidades de los equipos trituradores, se debe considerar las diferentes interrupciones, por lo que se considera una capacidad de reserva del 25 al 50 %.
- Los equipos deben seleccionarse en función al tamaño máximo del producto de la alimentación y no solo con respecto al flujo del proceso de trituración. El ingreso de excesivos materiales finos en la trituradora puede ocasionar una sobrecarga causando el atascamiento del equipo.
- La razón de reducción que se quiere alcanzar; esto va a depender mucho de las características del material definiendo así, si es necesario uno o varias etapas de triturado (Miranda J. , 2013).

Clasificación de las trituradoras

Existen cuatro tipos de trituradoras de mandíbulas:

- Tipo Blake o de doble efecto
- De simple efecto
- Excéntrica elevada
- Dodge

Trituradora de mandíbulas Blake o de doble efecto

La quebrantadora tipo Blake es la trituradora estándar más utilizada para la trituración primaria y secundaria en rocas duras y abrasivas, así como para materiales pegajosos, productos relativamente gruesos con planos de separación o lajas con mínimo de finos (Ortiz & Tirado, 2005).

“Consta de una mandíbula fija y una móvil que está articulada en su parte superior y que, por oscilación sobre este eje, se puede acercar y alejar de la mandíbula fija, comprimiendo la roca entre ambas en este movimiento” (Blanco, 2014, p. 1).

La fuerza para realizar la compresión se comunica a la mandíbula móvil con el giro de un segundo eje excéntrico, que mueve una biela y esta acciona dos placas entre la mandíbula móvil y un punto fijo. Este sistema es un eficiente multiplicador de fuerzas que permite quebrantar las rocas que contienen los minerales (Blanco, 2014).

“Para garantizar el retroceso de la mandíbula móvil y mantener unido todo el conjunto de piezas móviles existe un vástago con un muelle de presión que es comprimido al cerrarse la mandíbula y fuerza la apertura” (Blanco, 2014, p. 1).

Características de la trituradora tipo Blake:

- a) **Sistema anti desgaste:** son placas, generalmente desmontables, que recubren totalmente las mandíbulas, su composición es de acero al manganeso con alta resistencia al desgaste. Las placas poseen la opción de reversibilidad, es decir, un cambio de posición para alargar la durabilidad de estas, dado que el mayor desgaste es producido en la boca de salida de los productos triturados; las placas pueden ser lisas o acanaladas, siendo esta última la más empleada debido a que facilita la fragmentación del material.
- b) **Sistema anti material no triturable:** una de las placas se la diseña con una resistencia menor (disminución de espesor, acoplamiento con tornillos, etc.), esto con el fin de que fracase ante la presencia de un elemento no triturable “material extremadamente duro y difícil de fragmentar” con una resistencia mayor a la prevista.

- c) **Sistema de regulación:** la regulación del tamaño de salida se basa en modificar la distancia de las mandíbulas actuando sobre la placa fija que soporta una de las palancas. Todo el conjunto de la mandíbula móvil se acerca o se separa con respecto a la mandíbula fija.
- d) **Denominación del equipo:** a la trituradora tipo Blake se las denomina o se nombra por las dimensiones de la boca de carga A x L (ancho x largo), que suele estar expresado en mm.

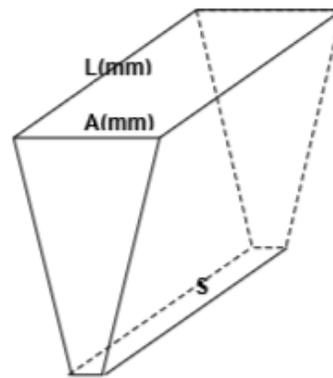


Figura 1.9: Dimensiones de boca de carga de trituradora Blake

Fuente: (Blanco, 2014)

- e) **Forma de la boca:** la boca del equipo puede ser cuadrada o rectangular, siendo el largo (L) de la boca entre 1 y 1.5 veces el ancho (A).
- f) **Ángulo de las mandíbulas:** regularmente el ángulo de las mandíbulas es inferior a 26° , así la roca o el mineral será propiamente molida y no saldrá despedida en dirección contraria a la circulación del material.
- g) **Revoluciones del volante:** la velocidad de rotación de los equipos se relaciona con la verticalidad de las mandíbulas y con su geometría, de tal manera que el material fraccionado descienda en una proporción adecuada a la velocidad de rotación sin ocasionar bloqueos en el equipo. La velocidad está comprendida entre 90 y 300 r.p.m.
- h) **Regulación:** esta variable está relacionada con el tamaño y la granulometría de los productos triturados, es la máxima abertura de las mandíbulas en su parte inferior medida en centímetros o pulgadas, está representado por “s” y es el que define el tamaño máximo que puede salir de la trituradora.

- i) **Recorrido:** la oscilación de la mandíbula móvil en parte superior, el trayecto recorrido en línea recta, se denomina recorrido y se la representa por “d”.
- j) **Razón de reducción:** la RR (razón de reducción) de estos equipos está comprendido entre 4 y 8 normalmente; sin embargo, el valor del trabajo habitualmente es de 4 o 5.
- k) **Mandíbulas:** son construidas de dos piezas, una parte es de un material resistente para la fragmentación y es de acero al manganeso, y la otra parte que es el soporte, es de resistencia adecuada. Las mandíbulas generalmente son de diseño acanaladas, con este diseño se produce menos finos que las mandíbulas lisas.
- l) **Instalación:** la trituradora tipo Blake son muy pesadas, robustas y que además trabajan mediante un movimiento giratorio que pueden provocar una inestabilidad en el área de trabajo. Es necesario considerar un coeficiente de seguridad del orden de 3 o superior para los cálculos, es decir, si es una máquina de 30 t el cálculo debe considerarse para 90 t.
- m) **Motor de accionamiento, potencia necesaria:** para el cálculo de la potencia necesaria de accionamiento se utiliza la fórmula de Bond con los pasos de materiales de malla del producto identificado (D80 y d80), además utilizando los coeficientes de seguridad, por el trabajo y la irregularidad de la carga, se tiene las siguientes formulas:

1. **Formula de Bond:**

$$WB = 10 * Wi \left(\frac{1}{\sqrt{d80}} - \frac{1}{\sqrt{D80}} \right) \quad (5)$$

2. **Potencia:**

$$P(kW) = WB(kWh/t) * T(t/h) * Fs \quad (6)$$

3. **Coefficiente de seguridad:**

Fs: 1.0 Potencia base de cálculo (teórica)

2.0 Trituradoras de mandíbulas

1.6 Trituradoras giratorias y de percusión

1.3 Conos trituradores, trituradoras de cilindros (Blanco, 2014).

Elementos principales de la trituradora Blake

- a) **Bastidor:** concepción robusta, formado por una especie de cajón rectangular y construido en acero laminado en un solo bloque. Si se llega a construir en varios bloques, estos trabajan como una unidad.
- b) **Mandíbula móvil:** fabricada en acero de alta calidad, se apoya en un eje que funciona de balancín y va anclada al bastidor, gira sobre rodillos y es la que soporta los esfuerzos que genera la fragmentación.
- c) **Mandíbula fija:** la disposición de la mandíbula fija puede ser en forma de ángulo con la vertical o a 90° , es decir, en una posición totalmente vertical para facilitar la libre caída de los materiales ya triturados.
- d) **Cámara de compresión:** la cámara hace referencia al espacio que se crea entre las mandíbulas (fija y móvil), este espacio varía con la oscilación y define la capacidad en producción horaria de la quebrantadora. En sus laterales está protegido por dos placas de desgaste que delimita la cámara de trituración, con el fin de evitar daños en la estructura principal de la trituradora. Para evitar el atranque del equipo se lo puede conseguir por los siguientes procedimientos:
 - 1. Modificando el ángulo que forman las mandíbulas
 - 2. Curvando las mandíbulas (habitualmente la mandíbula móvil) para lograr un perfil más constante
 - 3. Aumentando el número de revoluciones del volante
- e) **Placas de articulación:** son las que conjuntamente con la biela, transmiten el movimiento de rotación del volante hacia las mandíbulas, transformándolo en un movimiento de vaivén. Una placa generalmente tiene las siguientes funciones:
 - 1. Transmitir el esfuerzo de la biela a la mandíbula móvil.
 - 2. Variar el reglaje mediante técnicas:
 - i. Variar la posición de las placas
 - ii. Modificar la longitud de reglaje
 - iii. Introducir placas de diferente grosor
 - 3. Hacer de elemento de seguridad: cuando el esfuerzo provocado, rebasa un valor de protección del equipo, el esfuerzo de compresión se transforma normalmente, en un esfuerzo de cortadora.

- f) Varilla de recuperación:** su función es mantener la mandíbula móvil contra las placas. La varilla de recuperación transmite la fuerza del resorte a la mandíbula móvil para proporcionar la abertura de la mandíbula.
- g) Eje excéntrico:** es un eje central excéntrico que se apoya al bastidor. Gira sobre cojinetes de rodillos y transforma el movimiento de rotación en un movimiento de desplazamiento lineal que transmite a la biela.
- h) Volantes:** en el equipo hay dos volantes para equilibrar el sistema mecánico. En uno de ellos se ajustan las bandas trapezoidales para poder transmitir el movimiento y la potencia generada por el motor, y el otro es totalmente liso que actúa como volante de inercia simplemente. Unidos al sistema del eje excéntrico cumplen dos funciones principales:
1. Transmitir el movimiento
 2. Reserva la energía, la acumula en el retroceso y la devuelve en el periodo de empuje (Blanco, 2014).

Partes de la trituradora Blake

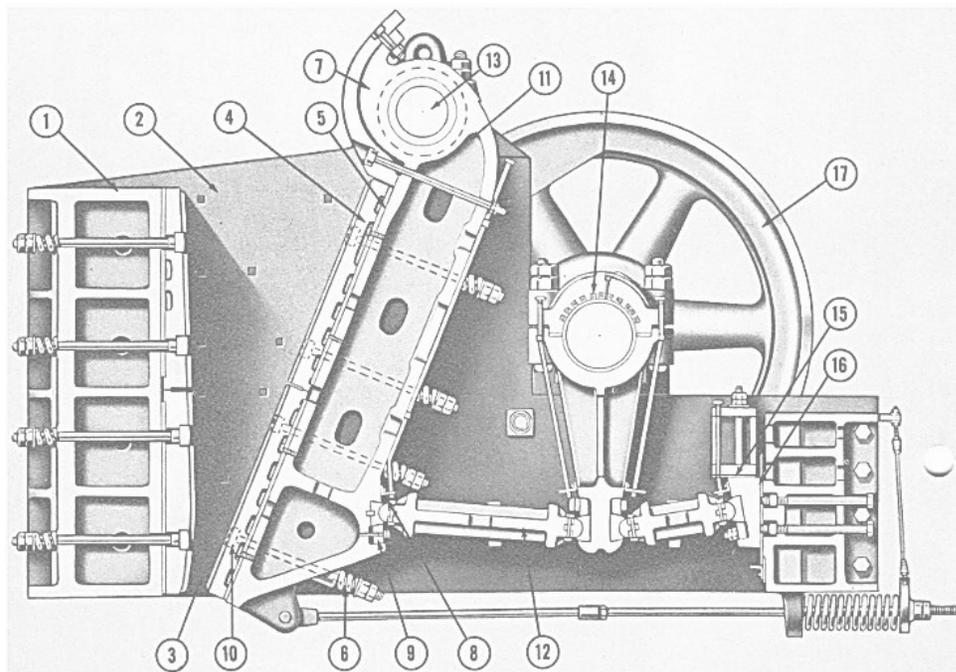


Figura 1.10: Partes de la trituradora Doble Efecto (Blake)

Fuente: (911 Metallurgist, 2012).

1. Estructura de acero
2. Cámara de compresión
3. Cámara de chancado
4. Mandíbula móvil
5. Placas anti desgaste
6. Muelles tensores en pernos
7. Placa de deflexión de quijada
8. Asiento de placa tensora
9. Cuñas del asiento
10. Tuercas de pernos de mandíbulas
11. Bocines de eje
12. Placa de arriostamiento
13. Eje (se apoya mandíbula móvil)
14. Eje excéntrico
15. Apoyos de golpes de aplastamiento
16. Apoyos de placa tensora articulada
17. Volantes simétricos.

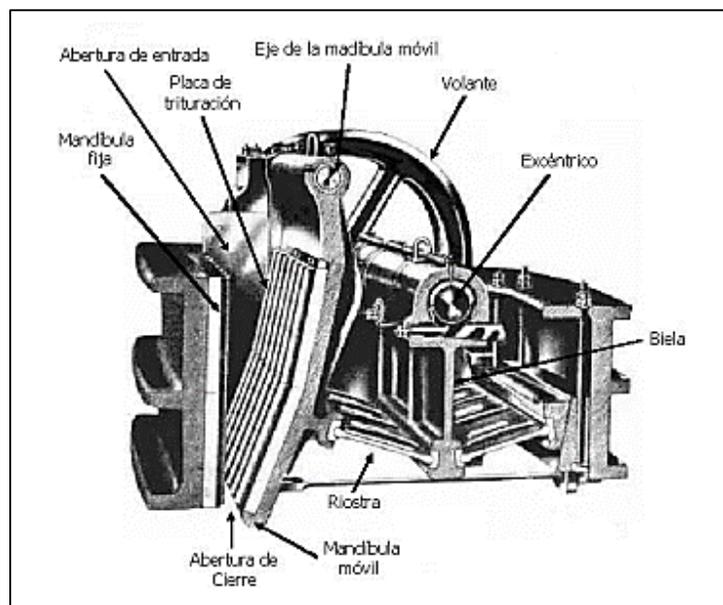


Figura 1.11: Corte Trituradora tipo Blake

Fuente: (Industrias I, 2015)

Trituradora de mandíbulas de simple efecto

Una simplificación del diseño de la máquina tipo Blake es la denominada de simple efecto en la que, un solo eje hace a la vez de articulación para el giro de la mandíbula móvil y de excéntrica para transformar el movimiento lineal en movimiento cuasi lineal. En este caso el movimiento describe una elipse en la zona de la boca de salida (Blanco, 2014, p. 5).

En la trituradora de simple efecto, la mandíbula móvil cumple la función simultánea de biela, esta simplificación conlleva a un diseño notable evidentemente, además, en su construcción se reduce el peso de los materiales de acero reduciendo el costo. Todos los demás mecanismo que posee son semejantes a la trituradora descrita anteriormente (Blanco, 2014).

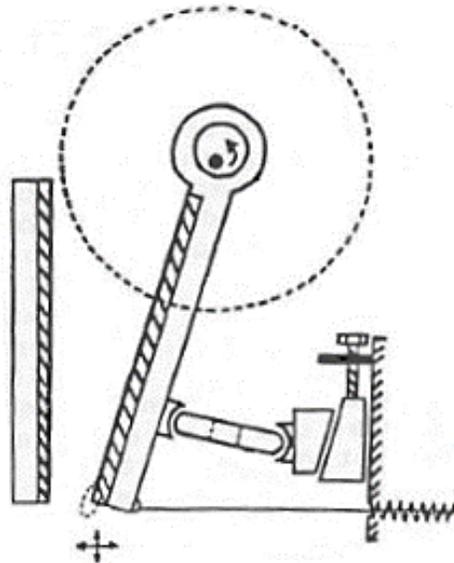


Figura 1.12: Esquema Trituradora de Simple Efecto

Fuente: (Blanco, 2014)

Parámetros característicos de las trituradoras de mandíbulas

Cámara de trituración

La cámara de trituración es el volumen comprendido entre las dos mandíbulas y los límites laterales formando una figura cónica con las bases en forma de rectángulo. El diseño de las mandíbulas, rectas o curvadas, condiciona el volumen y la forma de trabajo del equipo (Blanco, 2014, p. 8).

La cámara se divide en unidades en volumen, de forma prismática de tal manera que el volumen de la primera unidad de la boca de entrada es igual al volumen del último prisma en la boca de salida. Es decir, la misma cantidad de material sin triturar debe ser igual a la cantidad de material en la última parte de la cámara ya triturado (Blanco, 2014).

“Existe una relación directa entre la sección de la boca de entrada, el ángulo que forman las mandíbulas, el desplazamiento y la velocidad de giro para evitar el bloqueo del equipo” (Blanco, 2014, p. 8).

Capacidad de producción

“La capacidad de producción es la cantidad de producto que es capaz de evacuar en la unidad de tiempo. Ligado a los parámetros físicos de diseño del equipo y a su forma de trabajar” (Blanco, 2014, p. 9).

El r.p.m. del volante está definido en tablas y gráficos, tienen fundamentos básicos debido al estudio técnico de la operación del equipo basándose en la evacuación del último prisma formado (Blanco, 2014).

Se define las siguientes variables:

d: Desplazamiento de la mandíbula móvil (cm)

e: Abertura de las mandíbulas en posición cerrada (cm)

s: Regulación del equipo (cm)

P: peso del último prisma (kg)

$$P = V * \gamma * \mu \quad (7)$$

γ : Densidad real del mineral a triturar (t/m^3)

μ : Coeficiente de esponjamiento

V: Volumen del prisma (cm^3)

$$V = A * L \quad (8)$$

A: Área lateral del prisma (cm^2)

L: Longitud de la boca de la trituradora (mm)

n: Revoluciones por minuto (Blanco, 2014)

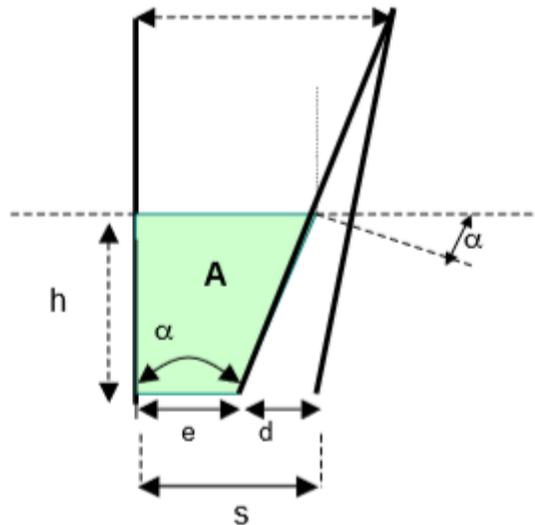


Figura 1.13: Variables de cámara de trituración

Fuente: (Blanco, 2014)

Aplicando unas simplificaciones se llega a una ecuación, y si expresamos las variables en cm, como se lo hace normalmente en las trituradoras, la expresión queda de la siguiente manera:

$$Q(t/h) = 0.00015 * L * s * d * \gamma * \mu * n \quad (9)$$

La expresión anterior (9) se le debe aplicar algunos coeficientes para adaptar la parte teórica a las condiciones reales de operación, al material tratado y a la manipulación, teniendo como resultado valores muy precisos (Blanco, 2014).

También existen fórmulas para realizar cálculos rápidos de la capacidad de la trituradora, estando las variables A y L en cm:

$$Q(t/h) = 0.093 * A * L \quad (10)$$

Cálculo de la capacidad de una trituradora, fórmula de D.H. Giesecking

Fórmula:

$$C(t/h) = f * a * u * [s * d * L * n * Pa] \quad (11)$$

f: coeficiente de utilización (tabla de valores)

a: coeficiente ligado al ángulo de toma

$$a = 1 + 0.03 * (26 - \text{alfa}) \quad (12)$$

alfa: ángulo de toma en grados (posición cerrada)

u: coeficiente de alimentación (ver curva)

s: reglaje (cm)

d: recorrido (cm)

L: longitud de la boca (cm)

n: velocidad en r.p.m.

$$n = 664 * \sqrt{\tan(\text{alfa})/d} \quad (13)$$

alfa = 20°

$$n = 400 * \sqrt{1/d} \quad (14)$$

Pa: densidad aparente

$$Pa = p * \mu \quad (15)$$

p: densidad real (t/m³; g/cm³)

μ: coeficiente de aflojamiento (toma valor aproximado de 0.6)

f. Coeficiente de utilización

Tabla 1.3: Coeficientes de utilización

Naturaleza de alimentación	Mandíbulas Lisas	Mandíbulas Acanaladas
Con finos normales (tamaño menor que el reglaje de la máquina)	0.00014	0.00011
Con los finos eliminados (mediante un pre cribador)	0.00013	8.8E – 05
Cuidadosamente cribados (con criba)	0.00011	7.2E – 05

Fuente: (Blanco, 2014)

u. Coeficiente de alimentación

$$R = Dmax/H \tag{16}$$

H = profundidad de la cámara de quebrantado superior (abertura superior)

Tabla 1.4: Coeficientes de alimentación

R	B	A
0		1
0.30		1.00
0.35		1.00
0.40	0.95	1.00
0.45	0.93	0.99

0.50	0.91	0.98
0.55	0.86	0.97
0.60	0.80	0.96
0.65	0.72	0.94
0.70	0.60	0.92
0.75	0.48	0.87
0.80		0.82
0.85		0.74
0.90		0.59
0.95		0.43

Fuente: (Blanco, 2014)

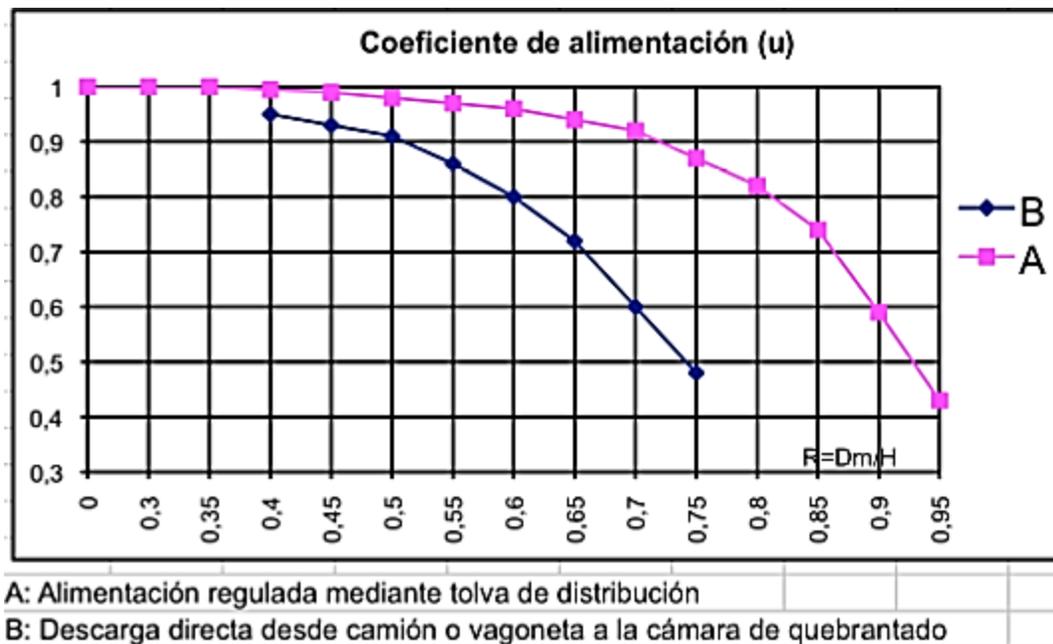


Figura 1.14: Curvas del coeficiente de alimentación

Fuente: (Blanco, 2014)

Densidad media y aparente de algunos materiales mineros a granel					
Mineral / Roca	Densidad t/m ³	Aparente kg/m ³	Mineral / Roca	Densidad t/m ³	Aparente kg/m ³
Barita	4,5	2.725	Yeso	2,32	1.360
Basalto	2,7 - 3,2	1.600	Magnetita / Hematites	5,18 / 5,28	2.000 - 2.400
Carbones	L: 1,1 - H - A: 1,8	640 - 960	Silex	2 - 2,65 - 3	1.600
Clinker	3,1 - 3,2	1.520	Magnesita	3 - 3,48	1.600
Coke	1,2	370 - 515	Pórfido	2,4 - 2,8	1.600
Caliza	2,46 - 2,84	1.550	Cuarzo	2,5 - 2,8	1.520
Granito	2,15 - 3,05	1.400 - 1.600	Talco	1 - 1,5	1.520

Figura 1.15: Densidad media y aparente de minerales

Fuente: (Blanco, 2014)

1.7.1.2. Trituradoras giratorias

En estos equipos los materiales a triturar se reducen por la compresión realizada entre una pared cónica fija y un tronco de cono móvil, denominado nuez o cabeza, acompañado de un movimiento excéntrico en el interior (Blanco, 2014).

El cono móvil, con el giro excéntrico en uno de sus extremos, se acerca a cada una de las generatrices de la pared cónica fija y nuevamente se aleja, provocando que el material ingresado se someta a compresiones repetitivas y liberaciones de presión (Blanco, 2014).

El material que ingresa, circula por gravedad a la parte baja donde es sometido a una compresión. En la cámara de quebrantado es un proceso continuo, y la descarga es continua siempre y cuando se mantenga la alimentación (Blanco, 2014).

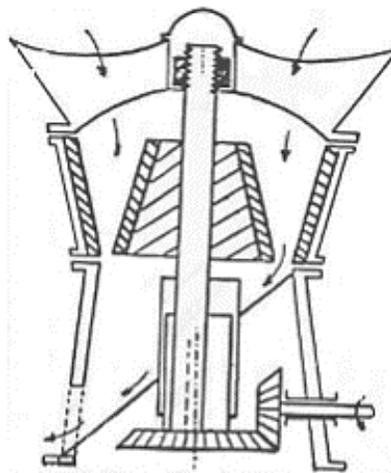


Figura 1.16: Esquema Trituradora Giratoria

Fuente: (Blanco, 2014)

Para la regulación del equipo se efectúa variando la altura relativa de cóncavo y nuez, para conseguir esta modificación se lo hace regulando la tuerca superior que soporta la nuez, o mediante un sistema hidráulico que eleva el eje, y que además sirve de sistema anti triturable (Blanco, 2014).

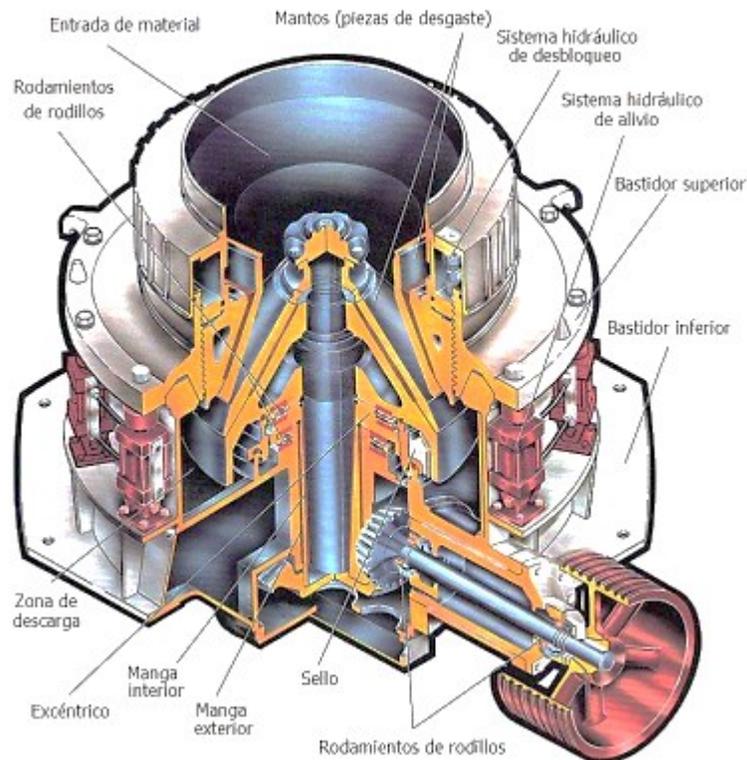


Figura 1.17: Corte Trituradora Giratoria

Fuente: (Industrias I, 2015)

Para un mismo modelo de trituradora existen diversos tamaños de mantos, el modelo de la trituradora y el tamaño de los productos de alimentación son fundamentos claves para la selección del tipo de manto (Industrias I, 2015).

A continuación, se presenta los diferentes esquemas que existe:

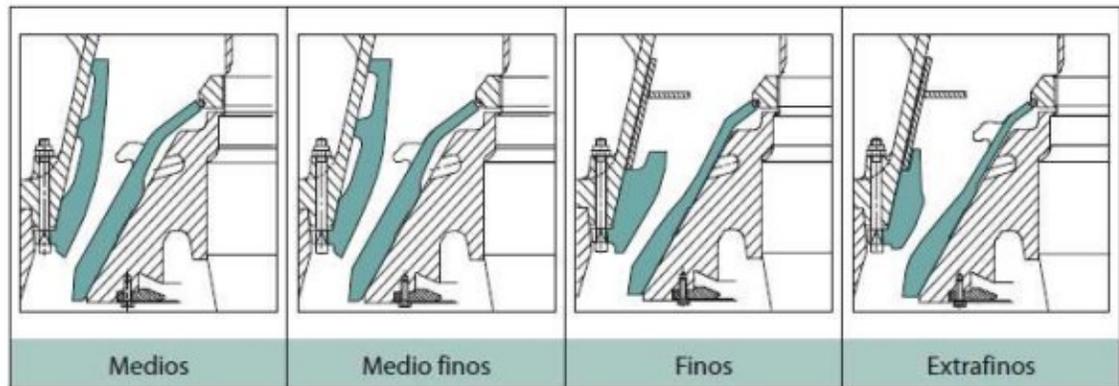


Figura 1.18: Esquema selección de mantos de trituradoras giratorias

Fuente: (Industrias I, 2015)

Las trituradoras giratorias producen menos atascamientos que las trituradoras de mandíbulas teniendo una similar boca de entrada, aunque con una mayor capacidad de producción. El ángulo de toma está entre el cono móvil y el fijo en la posición más cerrada, y el reglaje es la posición más abierta del movimiento de rotación de las mandíbulas (Blanco, 2014).

“La descarga del material es por gravedad, pero a través de un plano inclinado de recogida, por lo cual es más sensible que las de mandíbulas a los materiales pegajosos” (Blanco, 2014, p. 27).

Constitución de la máquina

- a) **Bastidor inferior:** encierra las partes de accionamiento de giro, el reglaje en la trituradora tipo mecánica se efectúa por la tuerca o sistema sujeción superior de la nuez.
- b) **Bastidor superior:** contiene en el interior unas placas de aislamiento y soportan la acción directa de los materiales, hace las funciones de una mandíbula fija.
- c) **Anillo de entrada:** es una sección circular y soporta la viga que sirve para mantener al cono móvil o mandíbula móvil mediante una tuerca.
- d) **Dos troncos de cono:** uno es fijo y cumple con las funciones de una mandíbula fija y uno móvil e invertido que cumple con las funciones de mandíbula móvil. La admisión para el material es el radio libre superior y la abertura marca cual es el tamaño máximo que se puede alimentar en el equipo.

Elementos principales

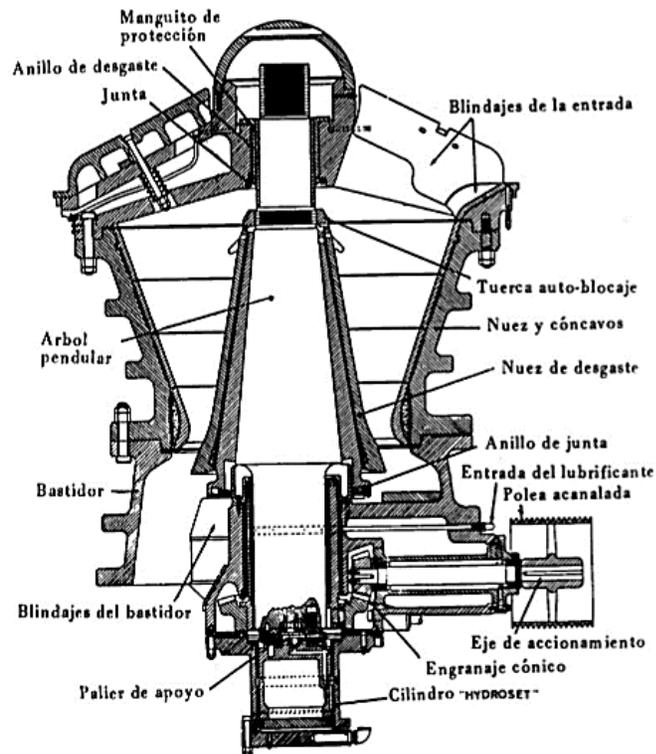


Figura 1.19: Partes de Trituradora Giratoria

Fuente: (Blanco, 2014)

Cálculo de la capacidad

Para calcular la capacidad de las trituradoras giratorias se puede utilizar los propios ábacos del fabricante, también se puede emplear la fórmula de Gieseking aplicada a las quebrantadoras de mandíbulas, con las siguientes modificaciones:

$$Q(t/h) = f * a * u * s * d * L * n * pa \quad (17)$$

L: longitud de la boca (cm)

Es el diámetro de la base de la nuez más la regulación, todo multiplicado por π .

$$L = (\phi_{nuez} + e) * \pi \quad (18)$$

“El recorrido varía, normalmente, entre un 15% y un 30% del reglaje, y el resto de factores se pueden considerar los mismos” (Blanco, 2014, p. 31).

Para el cálculo de la capacidad con los datos de los fabricantes, se deben hacer unas correcciones para acercarse a la realidad en el campo de trabajo, para ello se debe emplear la variación de los factores de la fórmula de Giesecking entre una y otras condiciones (Blanco, 2014).

Comparación entre la trituradora Blake y la trituradora giratoria

En cuanto a la capacidad, la trituradora giratoria es de 3 a 5 veces más a la de mandíbulas, también la giratoria es más pesada debido a su estructura robusta, con lo cual la hace más cara (Blanco, 2014).

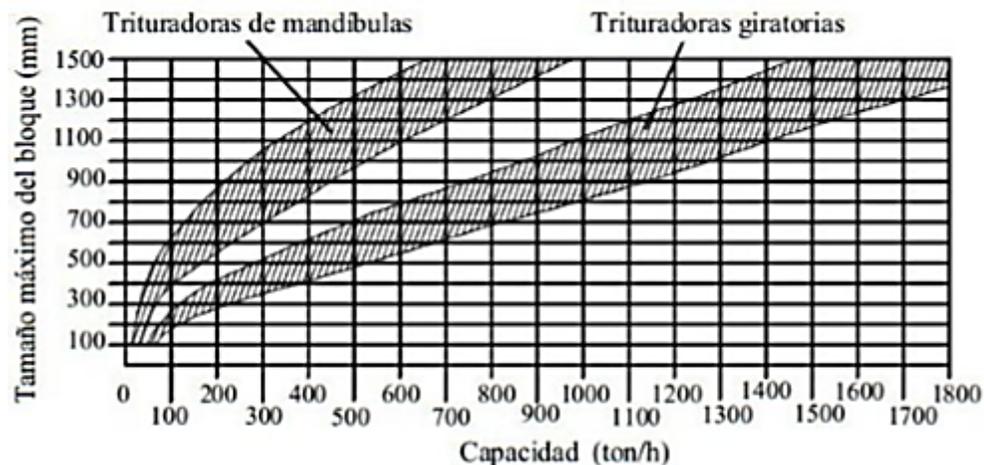


Figura 1.20: Capacidad trituradoras de mandíbulas y giratorias

Fuente: (Blanco, 2014)

La razón de reducción de estos equipos es de 3 a 8 generalmente, y debido a su capacidad, es adecuada para grandes tonelajes. Es utilizado en los circuitos como trituración primaria, y además se puede emplear como secundaria llegando a tamaños de 40 mm o incluso menores, dependiendo del reglaje y la abertura de admisión (Blanco, 2014).

“Con respecto a la proporción de sobre tamaños con relación a la regulación, es menor en las giratorias que en las trituradoras de mandíbulas debido a la forma de corona circular de la salida que limita” (Blanco, 2014, p. 30).

1.7.2. Trituración secundaria

La trituración secundaria representa un proceso intermedio en el sistema de trituración y en algunos otros casos, tiene como objetivo la mayor reducción posible del material (Miranda, 2013).

“Por lo general, los trituradores secundarios reducen el material hasta un tamaño de entre 10 y 100 mm. Llegando a obtener de esta manera, un producto final o un tamaño apropiado para ser enviado a una etapa terciaria” (Zurita, 2012, p. 32).

Las trituradoras secundarias se utilizan para triturar materiales más pequeños que los producidos por las trituradoras primarias. Estas máquinas, al ser alimentadas con materiales de tamaño más pequeño que las primarias, trabajan con rendimientos más altos, aunque a medida que se va disminuyendo el diámetro de apertura del cono, disminuye la capacidad de producción de la máquina (Iguarán, 2008, p. 12).

Para el sistema de trituración secundaria se utilizan equipos más modernos y que resultan más costosos debido a su tecnología, pues estos equipos cumplen con la función de reducir los materiales a tamaños más pequeños posibles. En la etapa de trituración secundaria se utilizan equipos como:

- Trituradoras Cónicas
- Trituradoras de Cilindros

1.7.2.1. Trituradora cónica

Las trituradoras cónicas pueden representar una inversión fuerte dentro del circuito de trituración; sin embargo, teniendo en cuenta los costos de procesamiento y la recuperación que se logra, estos equipos prometen costos de operación más bajos que algún otro equipo rutinario.

“Se aconseja a los clientes que trituran roca dura y abrasiva que instalen trituradoras de cono en la etapa final de trituración fina y corrección de forma” (Metso, s.f., p. 24).

Estos equipos, de conos por la forma del cóncavo y la nuez, tienen una menor capacidad de producción a medida que se disminuye la abertura de boca por lo que es necesario instalar una batería en paralelo para generar altas producciones (Blanco, 2014, p. 34).

Para el cálculo se lo realiza de manera similar que las trituradoras giratorias, al igual que la selección del equipo. La trituradora de conos más representativa en la industria, es la tipo Symons (Blanco, 2014).

Su denominación habitual es la de conos debido a la forma de su mandíbula móvil. La nuez, que es la parte giratoria, está apoyada en su parte inferior y el extremo superior del eje directriz de la nuez, en la parte superior se mueve libremente y en su extremo posee una especie de plato que cumple la función de distribuir la carga en toda la circunferencia de la boca de alimentación (Blanco, 2014).

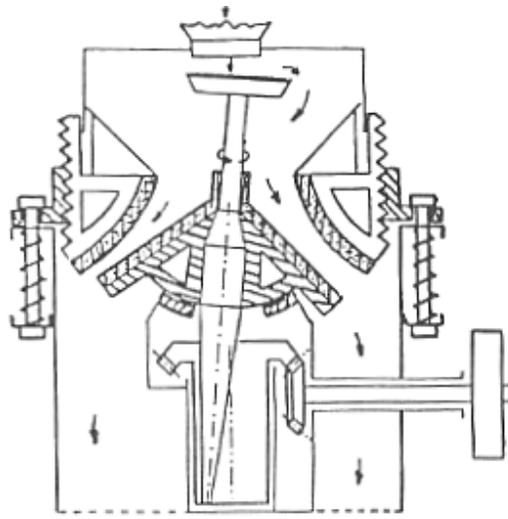


Figura 1.21: Esquema de un cono Symons

Fuente: (Blanco, 2014)

“La descarga, por el diseño de cóncavo y nuez, es prácticamente paralela tal como se ve en el esquema de un cono Symons” (Blanco, 2014, p. 34).

El recorrido que hace el material y la velocidad de rotación que posee el equipo, provoca una mayor agitación dentro de la cámara, facilitando primero a la trituración por el choque entre partículas y, segundo, la descarga del material triturado por el efecto de ángulo de descarga. Estos equipos son sensibles a la humedad y pueden provocar la adherencia de los materiales (Blanco, 2014).

El efecto del diseño de la salida y la forma de trabajo del equipo, zona paralela y revoluciones altas, hace que los minerales no puedan salir sin haber sido triturados al

menos una vez. Con esto se asegura que, al menos, una de las dimensiones de la partícula es igual o inferior a la dimensión de la mandíbula en posición cerrada. Esto es ahora la definición de regulación para estos equipos, al contrario que en las giratorias primarias (Blanco, 2014, p. 34).

La regulación se la mide en mm, y es básicamente la dimensión que corresponde a la posición cerrada de las mandíbulas. Los conos, por lo general, se designan por el diámetro inferior de la nuez expresada en mm (Blanco, 2014).

Estos equipos al tratar materiales de tamaños medianos o pequeños y como operan a altas velocidades de rotación, hacen que sufra un desgaste mayor tanto en el cono móvil como en las paredes fijas, por lo tanto es necesario revestir la nuez y el cóncavo con un elemento resistente como lo es el manganeso (Blanco, 2014).

“El mecanismo de regulación de la abertura consiste en una pieza roscada que soporta el cóncavo y que va unida a la estructura soporte. Variando el roscado se modifica la distancia nuez cóncavo” (Blanco, 2014, p. 35).

Existen equipos cónicos con soporte hidráulico, con este sistema, presentando la ventaja de poder descender la nuez para vaciar la cámara de trituración en caso que quede llena por una interrupción imprevista. Los equipos trituradores deben empezar a operar con su cámara totalmente vacía, con el fin de evitar tensiones forzosas e incluso roturas en la estructura del triturador (Blanco, 2014).

En equipos hidráulicos, el sistema de seguridad para los materiales no triturables consta de un recuperador de expansiones, desarrollado por un depósito de N_2 y un sistema de muelles. Estos muelles ceden ante la presencia de una pieza no triturable y posteriormente recuperan la posición (Blanco, 2014).

“La relación de reducción, de forma general, puede ser de 6 a 8 cuando trabajan en la trituración secundaria y disminuye, de 2 a 3 cuando realizan trituración terciaria o más fina (escalón de molienda gruesa)” (Blanco, 2014, p. 36).

Las trituradoras cónicas arrojan productos, en la mayoría de los casos, bastante cúbicos y su alimentación debe tener una granulometría regular, es decir, antes debe pasar por un proceso de cribado. La cámara de trituración debe estar lo más llena posible para poder

operar y obtener buenos resultados, además, de un desgaste igual en las placas de revestimiento (Blanco, 2014).

Características principales de las trituradoras cónicas

- a) **Potencia del motor:** la potencia se la puede calcular con el método de Bond, usando las mismas fórmulas que se utiliza para las trituradoras de mandíbulas y que se mencionó con anterioridad, se debe calcular con un coeficiente de seguridad de 1.3.
- b) **Alimentación:** la entrada del material debe ser por la parte superior a través de una pequeña tolva, el material es descargado en un plato giratorio que se encuentra sujeto con el eje de la nuez. Debido al movimiento giratorio que realiza, el plato toma pequeños ángulos de inclinación y va descargando por toda la circunferencia.
- c) **Sistema de movimiento de giro:** las trituradoras giratorias y cónicas realizan los movimientos de giro notablemente, pero hay una diferencia importante entre estos equipos, y es el punto de apoyo del eje para poder realizar el giro. En los equipos cónicos, el cono móvil se apoya en un palier esférico en todo su centro y, tanto la alimentación como la descarga poseen el movimiento rotatorio (Blanco, 2014).

“La velocidad de rotación está comprendida entre 400 y 600 r.p.m., más rápido que en las trituradoras giratorias primarias” (Blanco, 2014, p. 37).

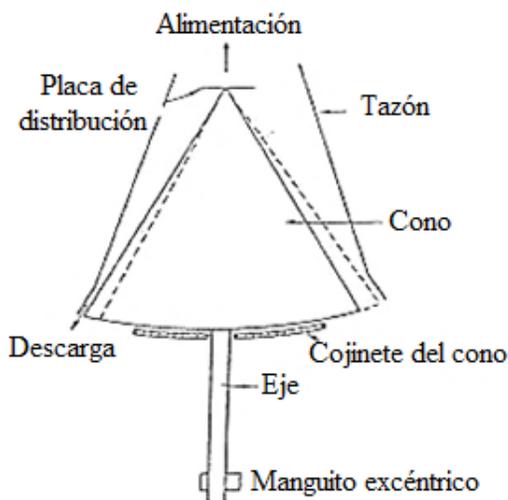


Figura 1.22: Sección transversal funcional de una trituradora de cono

Fuente: (Blanco, 2014)

En la gama de estos equipos, existen dos tipos esenciales de cono basados en dos características principales: la regulación y el sistema ante material no triturable, el primer tipo lo soluciona de forma mecánica con un resorte de muelle y regulación mecánica y el otro lo resuelve de forma hidráulica: (Blanco, 2014).

- Conos Symons
- Hidroconos

En el año 1926 aparece el cono Symons para el proceso de trituración secundaria, dio el inicio de la generación de los equipos trituradores de conos y que actualmente se encuentra establecido en las diferentes industrias (Universidad Politécnica de Cartagena, s.f.).

“El cono Symons es el más extendido y se fabrica bajo dos modelos: el estándar, para trituración secundaria normal (<6 cm), y el de Cabeza Corta, para trituración terciaria o fina (0.3 – 2.0 cm)” (Universidad Politécnica de Cartagena, s.f., p. 55).

Poseen una notable diferencia que es la forma de sus cámaras de trituración, a continuación, se presenta una figura de cada modelo:

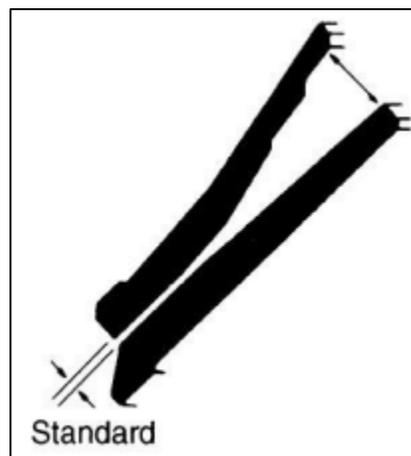


Figura 1.23: Modelo Estándar

Fuente: (Universidad Politécnica de Cartagena, s.f.)

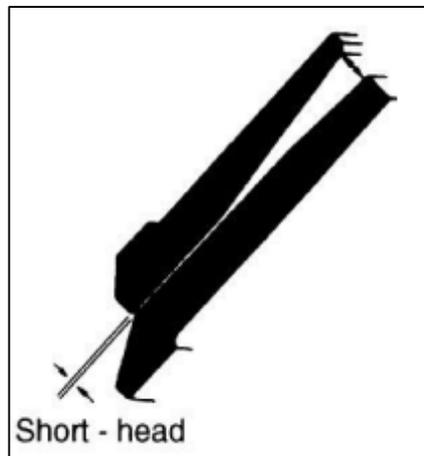


Figura 1.24: Modelo Cabeza Corta

Fuente: (Universidad Politécnica de Cartagena, s.f.)

Los conos Symon tiene una relación de reducción que puede ser de 10 a 12 en los conos estándar y de 5 a 6 en los de cabeza corta y los hidroconos se mueven en el margen general para ambos modelos, de 6 a 8 (Blanco, 2014, p. 37).

Elección de los conos

La forma más común para seleccionar un triturador cónico, es por el tamaño máximo admisible en la alimentación o entrada del equipo.

En los equipos Symons, el tamaño debe ser inferior al 80% de la abertura de la boca en posición abierta, esta boca de entrada está definida por la distancia de la diferencia de radios de la parte móvil y fija del triturador (Blanco, 2014).

En los hidroconos, debido a su sistema hidráulico indicado anteriormente, “se admite un tamaño igual a la abertura o ligeramente inferior para cámara gruesa, de un 80% para cámara mediana y de 60% a 70% para cámara fina. La alimentación, se recomienda, que debe estar cribada” (Blanco, 2014, p. 37).

Los hidroconos, debido a su funcionamiento hidráulico, proporciona ángulos de los conos más abiertos evitando el atascamiento de los materiales y haciendo más eficiente el proceso de trituración dentro de la cámara, estos equipos se dividen en tres tipos de acuerdo a la forma de la cámara o por su relación directa entre cono y taza, siendo los siguientes:

- De cámara o taza gruesa
- De cámara o taza media
- De cámara o taza fina (Blanco, 2014).

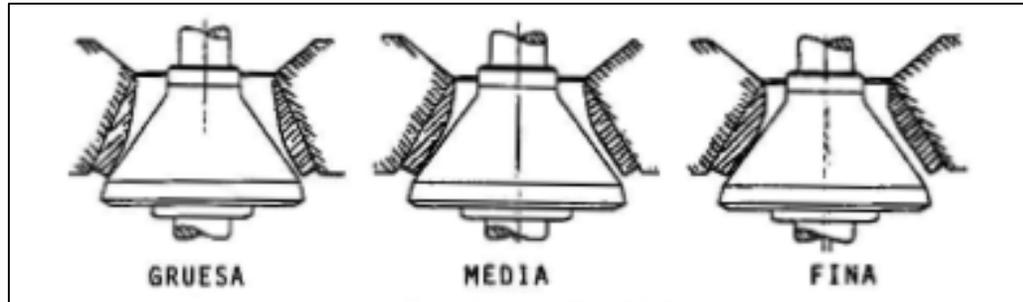


Figura 1.25: Tipos de cámara de los hidroconos

Fuente: (Blanco, 2014)

Para obtener la granulometría de los productos se lo hace mediante las curvas características que, habitualmente, los mismos fabricantes o vendedores la facilitan. Para una mejor interpretación de las curvas se debe tener en cuenta el porcentaje de paso por una malla cuadrada igual a la regulación, siempre midiendo en posición cerrada para estos equipos (Blanco, 2014).

A continuación, se presenta unas tablas que sirve de orientación para los porcentajes de paso de una malla cuadrada igual a la regulación:

Tabla 1.5: % de paso para cono Symons

Tipo	Índice de Bond Wi	% de paso, malla cuadrada
Cono Symons	< 13	70
	> ó = 13	60

Fuente: (Blanco, 2014)

Tabla 1.6: % de paso para Hidrocono

Tipo	Material	Cámara gruesa	Cámara media	Cámara fina
Hidrocono	Calizas	60	65 - 70	75
	Granito	60	65 - 70	70

Fuente: (Blanco, 2014)

Para la interpretación de las curvas, se debe empezar por las abscisas en donde está el valor de porcentaje de paso de la malla cuadrada del reglaje, luego, siguiendo el eje vertical de las ordenadas se sube hasta el valor del reglaje en mm o pulgadas, y la curva que pasa por ese punto es aquella que nos indica la granulometría del producto del cono triturador (Blanco, 2014).

Además, se puede obtener información de una manera inversa, es decir, si se quiere conocer la regulación necesaria de una determinada granulometría. Se debe conocer las ordenadas con un valor deseado, hasta llegar a la abscisa en el valor correspondiente al D80 y la curva que pasa por ese punto de intersección es la granulometría proporcionada para el material en específico. Para obtener la regulación, se indica el valor del porcentaje de paso de malla que corresponde al material y luego se ubica en las ordenadas para sacar el valor de la regulación (Blanco, 2014).

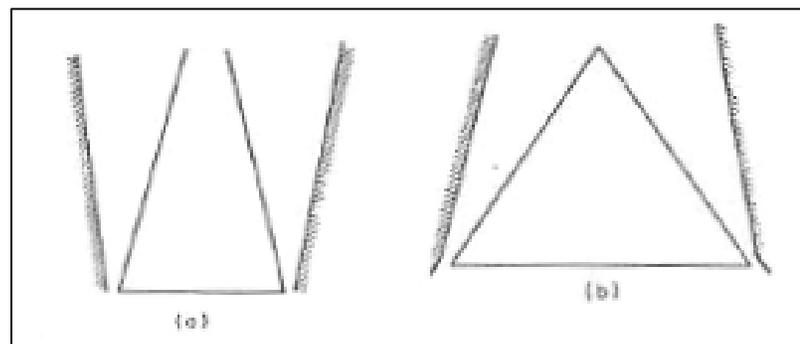


Figura 1.26: Formas de cabeza y tazón de trituradora giratoria (a) y de cono (b)

Fuente: (Blanco, 2014)

Para la trituración secundaria y terciaria, cuando los volúmenes a procesar son elevados, es aconsejable por disponibilidad y economía trabajar con más de una unidad de conos y en circuito cerrado para evitar la sobre fragmentación. En circuito cerrado, el equipo se regula a un tamaño de salida superior al deseado y mediante una criba se clasifica al tamaño requerido. (Blanco, 2014, p. 40).

1.7.2.2. Trituradora de cilindros

Estos equipos están formados por dos cilindros con ejes paralelos, cada uno gira en un sentido contrario y poseen un revestimiento que protege el rodillo del desgaste. Los cilindros son de tipo: lisos, acanalados o dentados (Blanco, 2014).

Las trituradoras de cilindros actualmente siguen siendo utilizadas en algunas plantas de conminución de minerales, mientras que en otras partes han sido reemplazadas por las trituradoras cónicas. Los cilindros de superficie lisa pueden ser empleado para una trituración fina y los de tipo dentado para la trituración gruesa (Alcalá, Flores, & Beltrán, 2009).

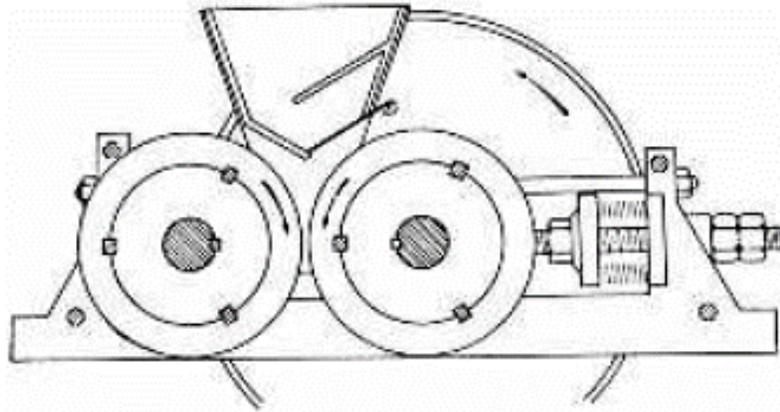


Figura 1.27: Trituradora de Rodillos

Fuente: (Alcalá, Flores, & Beltrán, 2009)

Las trituradoras con los cilindros lisos trabajan por aplastamiento con esfuerzo de compresión lento, pero que opera continuamente. Los cilindros dentados trabajan esencialmente por cizallamiento y por percusión, para lograr el fracturamiento de los materiales gruesos (Blanco, 2014).

“Las relaciones de reducción normales son de 4 o 5 y puede llegar a 7. Estos equipos son propios o indicados para la trituración terciaria. Estas relaciones de reducción son aplicables para uno o dos rodillos” (Blanco, 2014, p. 56).

Su sistema anti triturable está compuesto en un eje de los cilindros, el cual sujeta unos resortes o muelles que permiten el desplazamiento de la descarga en el cilindro ante la presencia de materiales duros (Alcalá, Flores, & Beltrán, 2009).

Para evitar el desgaste de los cilindros el equipo posee una protección en su superficie, debido a los constantes esfuerzos sometidos está cubierto por placas de acero al manganeso (Blanco, 2014).

Cálculo de la capacidad

A continuación, se presenta todos los parámetros y la cámara de trituración que condicionan la operación de las trituradoras de cilindros:

L: longitud de rodillos (m)

D: diámetro de rodillo (m)

e = s: separación o reglaje (m)

n: velocidad de rotación (r.p.m.)

v: velocidad periférica de los rodillos (m/s)

$$v = \pi * D * n / 60 \quad (19)$$

Q: caudal de material triturado (m³/s)

$$Q = Area * velocidad$$

$$Q (m^3/s) = s * L * v \quad (20)$$

C: capacidad de trituración

$$C = Q * \rho \quad (21)$$

pa: densidad aparente (0,6 * densidad)

$$Q (t/s) = s * L * v * \rho \quad (22)$$

A la ecuación (22) se la pasa a t/h y se le agrega un coeficiente K para llegar a una expresión práctica para el cálculo de la capacidad:

$$Q (t/h) = K * s * L * v * \rho * 3600 \quad (23)$$

El coeficiente k es un valor desarrollado experimentalmente y que depende del aflojamiento, el deslizamiento o la imperfección en la alimentación. Con el valor de k se

corrigen esos parámetros y los valores varían entre $0,1 < k < 0,3$; y en la práctica es tomado el valor de referencia de: $0,15 < k < 0,20$ (Blanco, 2014).

La velocidad lineal es deducida de la velocidad periférica descrita anteriormente, se introduce en la formula general:

$$C (t/h) = k * 60 * \pi * L * e * D * n * \rho a$$

Con $k = 0,15$ un valor aproximado, quedando la fórmula práctica:

$$C (t/h) = 33 * L * e * D * n * \rho a \quad (24)$$

1.7.3. Trituración terciaria

En la trituración terciaria los materiales provenientes de la trituración secundaria se fragmentan y se pueden obtener productos de hasta 1/2" o 3/8" de tamaño. Los equipos más utilizados para esta operación terciaria son: las trituradoras cónicas y trituradoras de martillos.

1.7.3.1. Trituradora cónica

Estos equipos cónicos también se los emplean para efectuar la trituración terciaria, anteriormente se describió todos sus componentes y características principales de las máquinas. Para esta etapa de trituración principalmente se utiliza el equipo cónico tipo Symons de cabeza corta (Alcalá, Flores, & Beltrán, 2009).

“Los conos terciarios presentan granulometrías comprendidas entre 40 mm y 10 mm, se les conoce con el nombre de gravilladores” (Universidad Politécnica de Cartagena, s.f., p. 50).

Una vez que los materiales ya hayan pasado por las etapas de trituración primaria y secundaria, ingresan a la trituración terciaria con granulometrías menores, por consiguiente, el equipo cónico terciario tiene la posibilidad de reducir aún más los tamaños de los productos. Se puede llegar a conseguir una razón de reducción de 2 a 3 en la etapa de trituración terciaria con la trituradora cónica.

1.7.3.2. Trituradoras de martillos

Estos equipos trabajan aplicando una fuerza de manera brusca, choque o impacto, generado por la energía cinética diferencial entre el bloque a triturar y el movimiento de rotación de una masa pesada. El material golpeado es lanzado contra una mandíbula fija donde recibe un segundo, tercero, etc., impactos y se subdivide en fragmentos cada vez menores (Blanco, 2014, p. 67).

Los equipos se dividen en dos grupos de acuerdo a la energía que transmiten hacia los bloques o materiales que procesan:

- a) Trituradoras de molinos o martillos
- b) Trituradoras de impactos

Las trituradoras se las puede utilizar de una manera general, dependiendo de las características en las que fueron fabricadas pueden operar en la trituración primaria, secundaria y terciaria. En el caso de trabajar en la trituración terciaria, los equipos se les denominan molinos de martillos y con la diferencia de otras trituradoras es el tamaño menor en la entrada (Blanco, 2014).

Está equipado con un rotor de gran inercia y de alta velocidad, de 15 a 20 m/s. En el rotor están distribuidos uniformemente los martillos que colisionan contra las partículas o viceversa, produciendo la fragmentación de los materiales a triturar. Los martillos están adheridos con un refuerzo para soportar el golpe (Blanco, 2014).

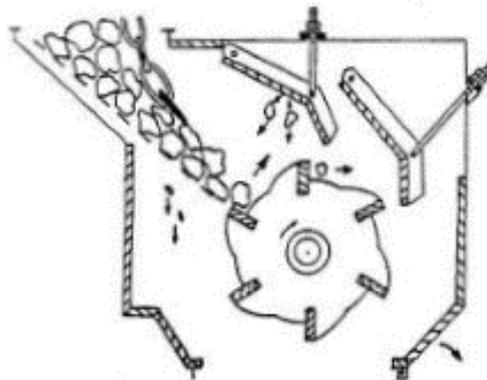


Figura 1.28: Trituradora de impacto de un rotor

Fuente: (Blanco, 2014)

1.8. Descripción de la planta de beneficio PROMINE

La planta de beneficio PROMINE con código 10000624, debido a su infraestructura y equipos implementados, es una planta con alta capacidad de producción y con una buena calidad de recuperación metalúrgica en el sector. Es prestadora de servicios metalúrgicos y trabaja con más de 12 sociedades mineras de distintos sectores del cantón, además, procesa el material propio de la mina, su boca mina se encuentra a unos 400 m de distancia aproximadamente. Cuenta con una capacidad máxima de procesamiento de 300 t/día.

El servicio metalúrgico proporcionado comprende desde la recepción del material mediante volquetas, hasta la obtención del metal o mineral deseado dispuesto para la comercialización, los materiales ingresados son depositados en la parte superior del área de molinos para luego empezar con los procesos metalúrgicos respectivos.

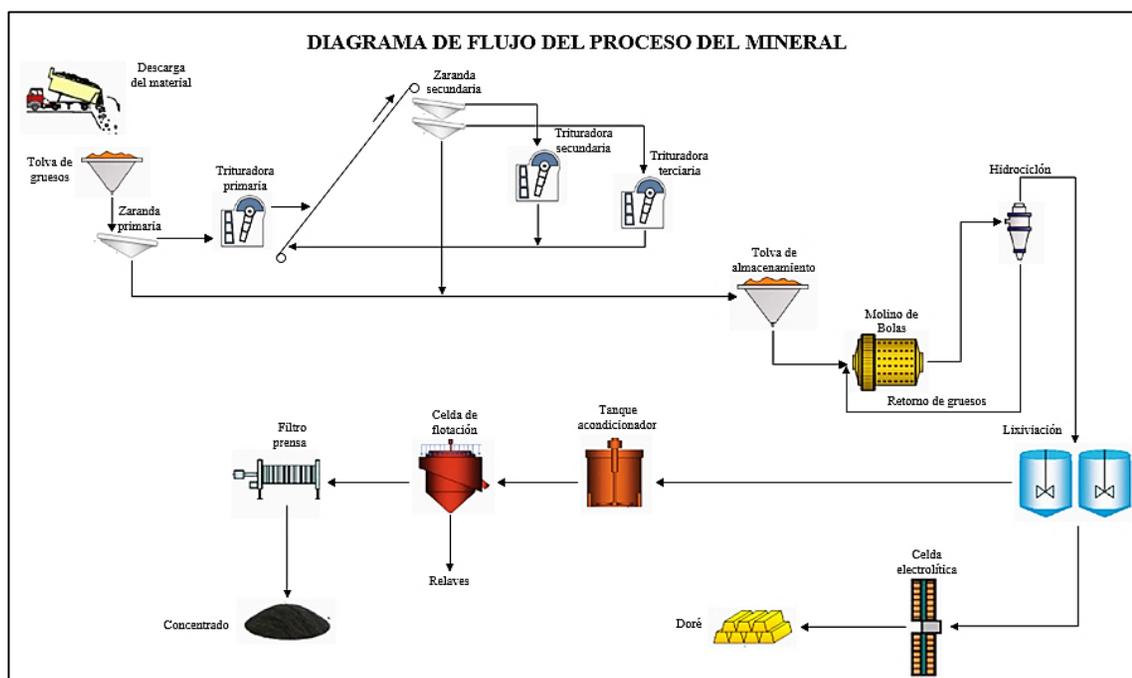


Figura 1.29: Diagrama de flujo de la planta PROMINE

Fuente: Elaboración propia

La infraestructura de PROMINE comprende un área de 897 m² en la cual se encuentra las instalaciones de la planta de beneficio que se dividen por procesos metalúrgicos como son: trituración y molienda (conminución), lixiviación, refinación, fundición, y flotación. Dentro de la conminución se subdivide por el tipo de molino: Molino Chileno y Molino

de Bolas, la planta posee 8 molinos Chilenos (de 4 ruedas) y 1 molino de Bolas (de 6'X6'), cada uno con su respectivo sistema de trituración.



Figura 1.30: Molino chileno (4 ruedas)

Fuente: Elaboración propia



Figura 1.31: Molino de Bolas (6' x 6')

Fuente: Elaboración propia

El procesamiento del mineral en un molino de bolas es todo un sistema complejo que involucra la operación simultánea de varios equipos, el proceso de trituración del sistema del molino de bolas cuenta con equipos como: tolvas, zarandas, bandas transportadoras y trituradoras, que más adelante se la describirá detalladamente.

El área de trituración empieza desde un nivel superior y consta de una tolva primaria de gruesos, en donde, se recibe y se deposita el mineral de la mina, el cual es transportado con una volqueta. La tolva tiene un volumen de almacenamiento de 30 m³ y en su parte superior posee una malla con una abertura de 20 cm (7,8 pulgadas) aproximadamente, que impide el paso de materiales de gran dimensión y que puedan provocar atrapamientos y afectaciones a los equipos en el proceso de conminución.



Figura 1.32: Tolva de gruesos

Fuente: Elaboración propia

La descarga del material de la tolva de gruesos se lo realiza con la ayuda de un alimentador ubicado en la parte inferior, este equipo impide el atrapamiento entre el propio material, dejando libre el boquete de salida. Todo el material descargado es alimentado a la zaranda vibratoria primaria en intervalos cortos de tiempo.

1.8.1. Zaranda primaria

La zaranda primaria posee una malla con dimensiones de 0,9 m x 1,10 m (ancho x largo), con un tamaño de abertura de 19,05 mm (3/4 pulgada). Esta es la primera etapa de cribado, generalmente se clasifica y se separa todo el material fino que proviene de la mina, acelerando el proceso y disminuyendo el trabajo operativo en los equipos de reducción de tamaño. Tiene una malla cuadriculada armada con una varilla o alambre de diámetro de 5 mm.

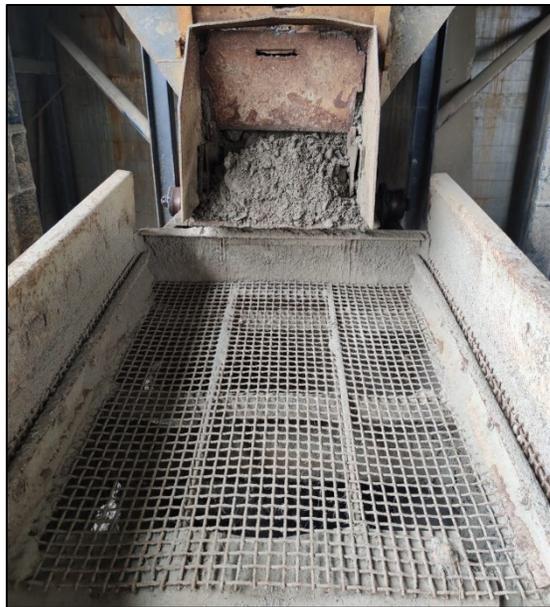


Figura 1.33: Zaranda primaria

Fuente: Elaboración propia

1.8.2. Trituración primaria

El material que no logra pasar la malla, es conducido hacia una trituradora primaria para empezar con el proceso de trituración. Las mandíbulas de la quebrantadora primaria, tanto la fija como la móvil son de tipo acanaladas, y opera con una Razón de Reducción de $RR=1.5$, a continuación, se presenta una ficha con las características técnicas del equipo triturador primario.

Tabla 1.7: Características técnicas de trituradora primaria de mandíbulas

Trituradora de Mandíbulas - Primaria							
Modelo	Tamaño de Abertura Alimentación (mm)	Rango de Abertura Descarga (mm)	Capacidad (t/h)	Potencia (kW)	Velocidad del eje r.p.m.	Dimensiones del equipo (mm)	Peso (t)
PE400X600	400x600	40 - 100	16 - 64	30	275	1700x1732x1653	6,5

Fuente: Placa Técnica del equipo

Los productos triturados caen a una banda transportadora, la cual es conducida hacia otra banda, esta transporta todo el material receptado hacia la segunda zaranda vibratoria del circuito de trituración. Antes de ingresar a la zaranda secundaria, en el transcurso de la banda se encuentra un equipo recolector de elementos o fragmentos no triturables.

El equipo es un imán de tipo industrial con unas dimensiones de 40 cm x 20 cm y se encuentra suspendido mediante unos ganchos y cadenas por encima de la banda que alimenta a los equipos después de la trituración primaria. Los fragmentos no triturables se los retira de forma manual una vez que se haya acumulado toda la superficie del imán, quedando eliminado con anterioridad estos elementos y cuidando los equipos de trituración.

**Figura 1.34:** Equipo recolector de elementos no triturables

Fuente: Elaboración propia

1.8.3. Zaranda secundaria

La zaranda secundaria cuenta con dos capas de mallas una superior y otra inferior, con unas dimensiones de 1,10 m x 2.80 m (ancho x largo), y en la cual, tanto la malla de la parte superior como la malla inferior tienen la misma abertura de 19,05 mm (3/4 pulgada). Al igual que la zaranda primaria tiene una malla cuadrículada con varilla de 5 mm de diámetro.



Figura 1.35: Zaranda secundaria

Fuente: Elaboración propia

1.8.4. Trituración secundaria

El material que no pasa la abertura de 3/4" de la primera malla (superior), pasa hacia la segunda etapa de trituración, es decir, se convierte en el alimento de la trituradora secundaria en este caso se posee una trituradora de mandíbulas. Las mandíbulas del equipo triturador, tanto la fija como la móvil son de tipo lisas, el equipo opera con una $RR= 1.9$, y a continuación se presenta la ficha técnica de la trituradora secundaria del sistema de trituración de la planta PROMINE:

Tabla 1.8: Características técnicas de trituradora secundaria de mandíbulas

Trituradora de Mandíbulas - Secundaria							
Modelo	Tamaño de Abertura Alimentación (mm)	Rango de Abertura Descarga (mm)	Capacidad (t/h)	Potencia (kW)	Velocidad del eje r.p.m.	Dimensiones del equipo (mm)	Peso (t)
PEX - 150x750	150x750	10 - 14	8 - 25	15	320	1100x1600x1050	3,8

Fuente: Placa Técnica del equipo



Figura 1.36: Trituradora de mandíbulas (secundaria)

Fuente: Elaboración propia

1.8.5. Trituración terciaria

Mientras tanto, en la malla de la parte inferior de la zaranda secundaria, el material que no consigue pasar la apertura de 3/4" es conducido hacia una trituradora (terciaria). Cabe señalar que la trituradora terciaria es de mandíbulas, con el tipo de mandíbulas lisas y con las características semejantes a la trituradora secundaria descrita anteriormente, opera la trituración con una $RR= 2,1$. Se presenta a continuación la ficha técnica del equipo:

Tabla 1.9: Características técnicas de trituradora terciaria de mandíbulas

Trituradora de Mandíbulas - Terciaria							
Modelo	Tamaño de Abertura Alimentación (mm)	Rango de Abertura Descarga (mm)	Capacidad (t/h)	Potencia (kW)	Velocidad del eje r.p.m.	Dimensiones del equipo (mm)	Peso (t)
PEX - 150x750	150x750	10 - 14	8 - 25	15	320	1100x1600x1050	3,8

Fuente: Placa Técnica de equipo

**Figura 1.37:** Trituradora de mandíbulas (terciaria)

Fuente: Elaboración propia

Los productos de la trituración secundaria y de la trituración terciaria, mediante una banda transportadora regresan al circuito de cribado, es decir, regresan a la banda principal que alimenta la zaranda secundaria y repite el proceso de clasificación progresivamente. El sistema de trituración opera en un circuito cerrado, generando una carga circulante del material y garantizando una granulometría del producto de máximo 3/4" en el circuito de trituración.

El resto del material que pasó las dos mallas de la zaranda secundaria, es depositado con la ayuda de un pequeño embudo metálico en una banda que posteriormente es trasladado hacia la banda principal de todo el sistema, que es la encargada de transportar todo el producto final hacia una tolva en donde se almacena todo el producto.

La tolva es de material metálico y tiene el volumen de 84 m³ útiles para almacenar el material triturado, en esta tolva se recibe todo el material procesado en el circuito de trituración.



Figura 1.38: Tolva de almacenamiento

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 2

2. Metodología y ensayo experimental

2.1. Método aplicado para el ensayo

En el presente trabajo se realizó un ensayo experimental a escala de laboratorio, con la utilización de un software de simulador metalúrgico, para ello fue necesario obtener datos de cada sistema del circuito de conminución mencionados anteriormente en la descripción de la planta de beneficio.

La información que se necesitó recabar es sobre el análisis granulométrico de cada alimento y/o producto de los sistemas. Adicionalmente se requirió los parámetros característicos de cada uno de los equipos del circuito, toda esta información luego fue introducida en el software para continuar el proceso de simulación.

A continuación, se presenta a detalle el ensayo experimental, el cual comprende: la caracterización del mineral, el muestreo, los equipos e instrumentos y los procesos utilizados para obtener el análisis granulométrico.

2.2. Caracterización del mineral

El mineral que se procesa en la planta PROMINE es de la mina propia de la empresa que está ubicada a 400 metros de distancia, la boca mina se encuentra en la concesión minera Bella Rica de Camilo Ponce Enríquez y los yacimientos existentes son de orígenes hidrotermales los cuales tienen la presencia de minerales como:

- Cuarzo (SiO_2)
- Pirrotina o pirrotita (Fe_7S_8)
- Pirita (FeS_2)
- Arsenopirita (FeAsS)
- Calcopirita (CuFeS_2)
- Bornita (Cu_5FeS_4) (en trazas)

En Bella Rica predominan la presencia de metales como: Oro (Au), Plata (Ag) y Cobre (Cu) siendo el oro el más comercializado por su alto valor económico y demanda.

El tipo de yacimiento que se forma en el distrito Bella Rica es en forma de vetas que son zonas o espacios mineralizados de gran longitud con ángulos de buzamiento que varían desde los 35° hasta ángulos pronunciados de 80°, estas estructuras también pueden ser angostas de 2 cm hasta vetas anchas de hasta 2 metros (Gobierno de México, 2020).

2.3. Muestreo y secado del mineral

El muestreo se lo realizó en la planta PROMINE en el circuito de trituración del molino de bolas, con la ayuda de herramientas como cortadoras de banda, cucharones y recipientes; se procedió a la toma de las muestras de cada sistema como se presenta a continuación:

1. Alimentación principal (A)
2. Fino de Zaranda #1 (PF1)
3. Grueso de Zaranda #1 (A1)
4. Descarga de Trituradora #1 (DT1)
5. Fino de Zaranda #2 (PF2)
6. Grueso 1 de Zaranda #2 (A2)
7. Grueso 2 de Zaranda #2 (A3)
8. Descarga de Trituradora #2 (DT2)
9. Descarga de Trituradora #3 (DT3)

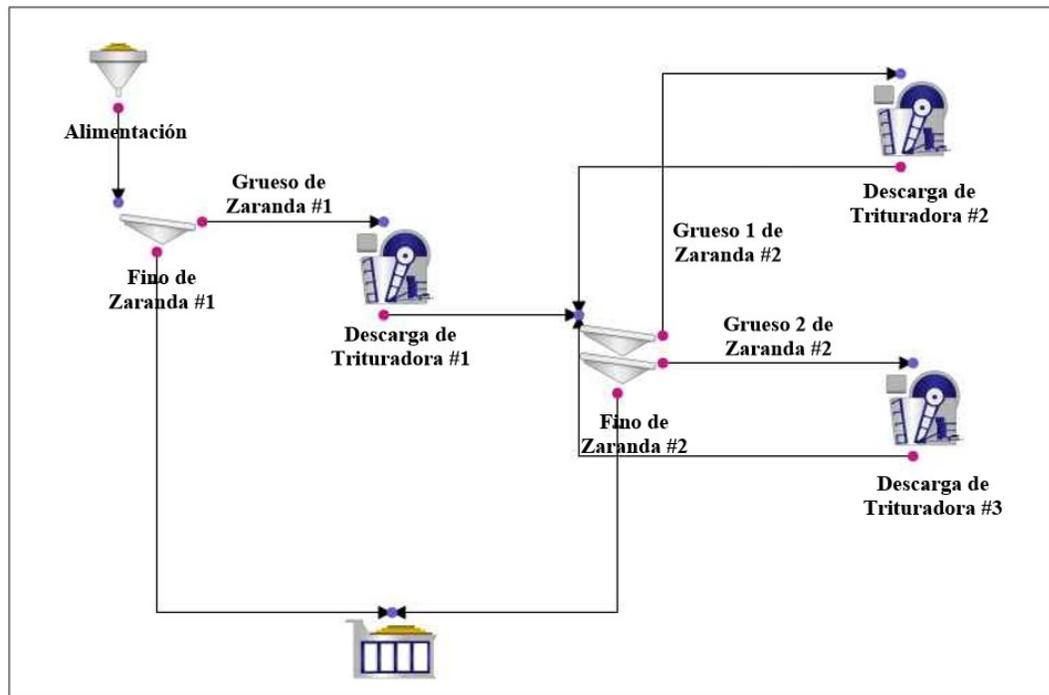


Figura 2.1: Puntos de muestreo

Fuente: Elaboración propia

El muestreo se lo realizó por 1 hora de operación de la planta en estado estable en intervalos de tiempo de 0, 15, 30, 45 y 60 minutos, en las zarandas y se recurrió a una toma de muestras simultáneamente, como, por ejemplo, en la zaranda #2 se obtuvo 3 muestras simultáneas.

La mayoría del material a procesar en la planta se encuentra a la intemperie y por los diferentes factores al que se encuentra expuesto hace que absorba humedad, las diferentes muestras se las dejó secar naturalmente, es decir, sin ayuda de equipos como hornos a temperatura alta.

Las muestras fueron colocadas sobre un plástico de color negro para evitar la contaminación con algún otro material y posteriormente fueron dispersas para acelerar el proceso de secado. La muestra se dejó secar por 48 horas en estado natural.



Figura 2.2: Secado natural del mineral

Fuente: Elaboración propia

2.4. Preparación de muestras

Una vez que las distintas muestras de mineral están totalmente secas se procede a una selección y reducción de muestra mediante la técnica del cuarteo. Se tomó una cantidad considerable de las muestras en la planta debido a las mayores granulometrías que se manejan en el proceso, para así obtener una muestra representativa y real del circuito de conminución.



Figura 2.3: Muestras secas

Fuente: Elaboración propia

La técnica del cuarteo es utilizada ampliamente en algunas ramas de la ingeniería especialmente en la química, es de mucha importancia esta técnica para llegar a una muestra representativa partiendo de una muestra general con un volumen mayor.

El cuarteo consiste en esparcir la muestra en forma circular lo más parecido posible sobre un plástico sin ningún otro material, una vez dada la forma se la divide en cuatro partes iguales con la ayuda de una espátula u otro instrumento parecido. El siguiente paso es descartar dos de las cuartas partes y que estén en dirección opuesta, quedando las dos otras partes que formarían la muestra final para los ensayos. Si en caso de que la muestra final siga siendo considerablemente grande se puede repetir el mismo procedimiento descrito hasta llegar a la muestra ideal para las pruebas que se llevaran a cabo más adelante.



Figura 2.4: Descarga Trituradora 1

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.5: Cuarteo muestra (Descarga Trituradora #2)

Fuente: Elaboración propia

Posteriormente las muestras que han salido se las va guardando en bolsas o recipientes apropiados, para evitar cualquier pérdida de material por alguna ruptura. A cada muestra se le asignó la nomenclatura y el peso respectivo, quedando lista para ser llevadas al laboratorio de la Escuela de Minas. Todo el secado y el cuarteo se realizaron en las instalaciones de la planta.



Figura 2.6: Muestras guardadas en bolsas

Fuente: Elaboración propia

A continuación, se presenta una tabla con los pesos de todas las muestras que se obtuvieron, cabe señalar que por cada sistema del circuito se sacaron entre 3 a 4 muestras para el análisis granulométrico con el fin marcar una tendencia entre los resultados.

Tabla 2.1: Peso de muestras

Muestra	Alimentación	Fino Zaranda #1	Grueso Zaranda #1	Descarga Trituradora #1
N°	Peso (g)			
1	1800	600	3003	1083
2	1800	600	2991	1022
3	1800	600	3036	1101
4	1800	600		

Fuente: Elaboración propia

Tabla 2.2: Continuación - Peso de muestras

Muestra	Fino Zaranda #2	Grueso 1 Zaranda #2	Grueso 2 Zaranda #2	Descarga Trituradora #2	Descarga Trituradora #3
N°	Peso (g)				
1	1000	1039	802	600	500
2	1000	1019	800	600	500
3	1000	1025	802	601	500
4				600	500

Fuente: Elaboración propia

2.5. Análisis granulométrico

Como se habló al principio de este capítulo, el software necesita como dato principal el análisis granulométrico del mineral que se procesa en la planta, es decir, debemos conocer la Distribución de Tamaño de Partículas (DTP) de las muestras que se tomaron y en específico hallar el porcentaje acumulado pasante.

El análisis granulométrico se lo realizó en el laboratorio de la Escuela de Minas de la Universidad y se utilizó equipos como: juegos de tamices (marca HUMBOLDT), agitador mecánico y una balanza (marca CAS).

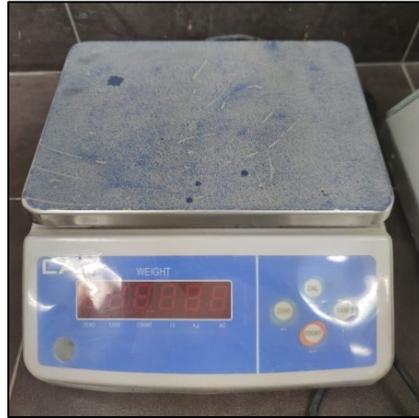


Figura 2.7: Balanza (CAS)

Fuente: Elaboración propia



Figura 2.8: Juego de tamices y agitador mecánico

Fuente: Elaboración propia

Los tamices Humboldt con los que se trabajaron para realizar el análisis granulométrico, se muestran a continuación en la tabla 2.3 y se indica el tamaño de abertura tanto en pulgadas como en milímetros de cada tamiz.

Tabla 2.3: Tamaño de tamices

TAMICES	
Tamaño (pulgadas)	Tamaño (mm)
3	76.2
2.5	63.5
2	50.8
1.5	38.1
1	25.4
3/4	19.05
1/2	12.7
3/8	9.53
recipiente	

Fuente: Elaboración propia

2.5.1. Alimentación

Se presenta la tabla del análisis granulométrico de la muestra #1 de la alimentación:

Tabla 2.4: Análisis granulométrico de Alimentación – Muestra #1

Alimentación - Muestra #1			
Tamaño (mm)	Masa retenida (gr)	% Retenido	% Acumulado pasante
76.2	0	0.00	100.00
63.5	384	21.35	78.65
50.8	282	15.68	62.98
38.1	82	4.56	58.42
25.4	202	11.23	47.19
19.05	159	8.84	38.35
12.7	207	11.51	26.85
9.53	87	4.84	22.01
0	396	22.01	0.00
Total	1799	100.00	

Fuente: Elaboración propia

Se realizó el análisis de las 4 muestras tomadas en la alimentación, pero se decidió eliminar los resultados de la muestra #2 debido a que estadísticamente no tenía una congruencia con los demás datos. Se resumió en una tabla los valores del porcentaje acumulado pasante y se obtuvo una media de los valores.

Tabla 2.5: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Alimentación

Alimentación			
% Acumulado pasante			
Muestra #1	Muestra #3	Muestra #4	Media
100.00	100.00	100.00	100.00
78.65	79.82	78.10	78.86
62.98	79.82	66.54	69.78
58.42	71.40	63.31	64.38
47.19	62.26	57.03	55.50
38.35	53.90	48.53	46.93
26.85	36.85	34.91	32.87
22.01	30.43	29.24	27.23
0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Dando como resultado final el siguiente análisis granulométrico:

Tabla 2.6: Porcentaje Acumulado pasante final de Alimentación

Alimentación	
Tamaño (mm)	% Acumulado Pasante
76.2	100.00
63.5	78.86
50.8	69.78
38.1	64.38
25.4	55.50
19.05	46.93
12.7	32.87
9.53	27.23
0	0.00

Fuente: Elaboración propia

2.5.2. Fino Zaranda #1

Tabla 2.7: Análisis granulométrico de Fino Zaranda #1 - Muestra #1

Fino Zaranda #1 - Muestra #1			
Tamaño (mm)	Masa retenida (gr)	% Retenido	% Acumulado pasante
76.2	0	0.00	100.00
63.5	0	0.00	100.00
50.8	0	0.00	100.00
38.1	0	0.00	100.00
25.4	0	0.00	100.00
19.05	9	1.51	98.49
12.7	160	26.76	71.74
9.53	83	13.88	57.86
0	346	57.86	0.00
Total	598	100.00	

Fuente: Elaboración propia

Se analizaron las 4 muestras del Fino Zaranda #1 y se consideró todas las pruebas.

Tabla 2.8: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Fino Zaranda #1

Fino Zaranda #1				
% Acumulado pasante				
Muestra #1	Muestra #2	Muestra #3	Muestra #4	Media
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
98.49	97.83	99.50	100.00	98.96
71.74	86.31	80.27	80.67	79.75
57.86	71.95	71.40	65.67	66.72
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Quedando como resultado final la siguiente tabla:

Tabla 2.9: Porcentaje Acumulado pasante final de Fino Zaranda #1

Fino Zaranda #1	
Tamaño (mm)	% Acumulado Pasante
76.2	100.00
63.5	100.00
50.8	100.00
38.1	100.00
25.4	100.00
19.05	98.96
12.7	79.75
9.53	66.72
0	0.00

Fuente: Elaboración propia

2.5.3. Grueso Zaranda #1

Tabla 2.10: Análisis granulométrico de Grueso Zaranda #1 - Muestra #1

Grueso Zaranda #1 - Muestra #1			
Tamaño (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado pasante
76.2	0	0.00	100.00
63.5	661	22.04	77.96
50.8	836	27.88	50.08
38.1	513	17.11	32.98
25.4	445	14.84	18.14
19.05	306	10.20	7.94
12.7	187	6.24	1.70
9.53	4	0.13	1.57
0	47	1.57	0.00
Total	2999	100.00	

Fuente: Elaboración propia

Llevando a cabo el análisis granulométrico de las 3 muestras seleccionadas, la muestra #3 en este caso se la descartó por la estadística que presentaba, a continuación, se muestra una tabla con los resultados del porcentaje acumulado pasante y su respectiva media.

Tabla 2.11: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Grueso Zaranda #1

Grueso Zaranda #1		
% Acumulado pasante		
Muestra #1	Muestra #2	Media
100.00	100.00	100.00
77.96	79.30	78.63
50.08	64.31	57.20
32.98	25.12	29.05
18.14	6.82	12.48
7.94	4.15	6.04
1.70	2.07	1.89
1.57	2.07	1.82
0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Obteniendo un resultado final:

Tabla 2.12: Porcentaje Acumulado pasante final de Grueso Zaranda #1

Grueso Zaranda #1	
Tamaño (mm)	% Acumulado Pasante
76.2	100.00
63.5	78.63
50.8	57.20
38.1	29.05
25.4	12.48
19.05	6.04
12.7	1.89
9.53	1.82
0	0.00

Fuente: Elaboración propia

2.5.4. Descarga Trituradora #1

Tabla 2.13: Análisis granulométrico de Descarga Trituradora #1 – Muestra #2

Descarga Trituradora #1 - Muestra #2			
Tamaño (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado pasante
76.2	0	0.00	100.00
63.5	0	0.00	100.00
50.8	0	0.00	100.00
38.1	266	26.10	73.90
25.4	330	32.38	41.51
19.05	224	21.98	19.53
12.7	65	6.38	13.15
9.53	11	1.08	12.07
0	123	12.07	0.00
Total	1019	100.00	

Fuente: Elaboración propia

Se realizó el análisis granulométrico de las 3 muestras, se eliminó la muestra #1 por presentar valores elevados, a continuación, se presenta la tabla con el resumen de los porcentajes acumulado pasante de las muestras:

Tabla 2.14: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Descarga Trituradora #1

Descarga Trituradora #1		
% Acumulado pasante		
Muestra #2	Muestra #3	Media
100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00
73.90	75.21	74.55
41.51	45.49	43.50
19.53	22.42	20.98
13.15	12.94	13.05
12.07	11.67	11.87
0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Quedando como resultado final:

Tabla 2.15: Porcentaje Acumulado pasante fina de Descarga de Trituradora #1

Descarga Trituradora #1	
Tamaño (mm)	% Acumulado Pasante
76.2	100.00
63.5	100.00
50.8	100.00
38.1	74.55
25.4	43.50
19.05	20.98
12.7	13.05
9.53	11.87
0	0.00

Fuente: Elaboración propia

2.5.5. Fino Zaranda #2

Tabla 2.16: Análisis granulométrico de Fino Zaranda #2 - Muestra #2

Fino Zaranda #2 - Muestra #2			
Tamaño (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado pasante
76.2	0	0.00	100.00
63.5	0	0.00	100.00
50.8	0	0.00	100.00
38.1	0	0.00	100.00
25.4	0	0.00	100.00
19.05	90	9.00	91.00
12.7	416	41.60	49.40
9.53	170	17.00	32.40
0	324	32.40	0.00
Total	1000	100.00	

Fuente: Elaboración propia

En este sistema se descarta la muestra #1 del total de las 3 muestras que se tomaron, se presenta una tabla resumida:

Tabla 2.17: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Fino Zaranda #2

Fino Zaranda #2		
% Acumulado pasante		
Muestra #2	Muestra #3	Media
100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00
91.00	92.80	91.90
49.40	45.70	47.55
32.40	26.50	29.45
0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Quedando como resultado final:

Tabla 2.18: Porcentaje Acumulado pasante final de Fino Zaranda #2

Fino Zaranda #2	
Tamaño (mm)	% Acumulado Pasante
76.2	100.00
63.5	100.00
50.8	100.00
38.1	100.00
25.4	100.00
19.05	91.90
12.7	47.55
9.53	29.45
0	0.00

Fuente: Elaboración propia

2.5.6. Grueso 1 Zaranda #2

Tabla 2.19: Análisis granulométrico de Grueso 1 Zaranda #2 - Muestra #1

Grueso 1 Zaranda #2 - Muestra #1			
Tamaño (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado pasante
76.2	0	0.00	100.00
63.5	0	0.00	100.00
50.8	0	0.00	100.00
38.1	221	21.31	78.69
25.4	240	23.14	55.54
19.05	319	30.76	24.78
12.7	142	13.69	11.09
9.53	0	0.00	11.09
0	115	11.09	0.00
Total	1037	100.00	

Fuente: Elaboración propia

Se descarta la muestra #3 del total de las 3 muestras que se tomaron en este punto, se resume en la siguiente tabla los valores:

Tabla 2.20: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Grueso 1 Zaranda #2

Grueso 1 Zaranda #2		
% Acumulado pasante		
Muestra #1	Muestra #2	Media
100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00
78.69	80.81	79.75
55.54	47.34	51.44
24.78	16.83	20.81
11.09	2.66	6.87
11.09	2.66	6.87
0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Los siguientes valores quedan como resultado final:

Tabla 2.21: Porcentaje Acumulado pasante final de Grueso 1 Zaranda #2

Grueso 1 Zaranda #2	
Tamaño (mm)	% Acumulado Pasante
76.2	100.00
63.5	100.00
50.8	100.00
38.1	79.75
25.4	51.44
19.05	20.81
12.7	6.87
9.53	6.87
0	0.00

Fuente: Elaboración propia

2.5.7. Grueso 2 Zaranda #2

Tabla 2.22: Análisis granulométrico de Grueso 2 Zaranda #2 - Muestra #1

Grueso 2 Zaranda #2 - Muestra #1			
Tamaño (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado pasante
76.2	0	0.00	100.00
63.5	0	0.00	100.00
50.8	0	0.00	100.00
38.1	0	0.00	100.00
25.4	0	0.00	100.00
19.05	222	27.68	72.32
12.7	556	69.33	2.99
9.53	0	0.00	2.99
0	24	2.99	0.00
Total	802	100.00	

Fuente: Elaboración propia

Se descarta la muestra #3 para el cálculo estadístico, se presenta en una tabla el resumen de las demás muestra analizadas:

Tabla 2.23: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Grueso 2 Zaranda #2

Grueso 2 Zaranda #2		
% Acumulado pasante		
Muestra #1	Muestra #2	Media
100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00
72.32	70.18	71.25
2.99	3.26	3.13
2.99	3.26	3.13
0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Quedando como resultado final la siguiente tabla:

Tabla 2.24: Porcentaje Acumulado pasante final de Grueso 2 Zaranda #2

Grueso 2 Zaranda #2	
Tamaño (mm)	% Acumulado Pasante
76.2	100.00
63.5	100.00
50.8	100.00
38.1	100.00
25.4	100.00
19.05	71.25
12.7	3.13
9.53	3.13
0	0.00

Fuente: Elaboración propia

2.5.8. Descarga Trituradora #2

Tabla 2.25: Análisis granulométrico de Descarga Trituradora #2 - Muestra #1

Descarga Trituradora #2 - Muestra #1			
Tamaño (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado pasante
76.2	0	0.00	100.00
63.5	0	0.00	100.00
50.8	0	0.00	100.00
38.1	0	0.00	100.00
25.4	0	0.00	100.00
19.05	99	16.50	83.50
12.7	232	38.67	44.83
9.53	104	17.33	27.50
0	165	27.50	0.00
Total	600	100.00	

Fuente: Elaboración propia

Se presenta el resumen en la siguiente tabla de los datos de las 4 muestras tomadas en el sistema de la descarga del equipo:

Tabla 2.26: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Descarga Trituradora #2

Descarga Trituradora #2				
% Acumulado pasante				
Muestra #1	Muestra #2	Muestra #3	Muestra #4	Media
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
83.50	71.29	73.04	79.80	76.91
44.83	36.23	33.44	52.09	41.65
27.50	22.20	21.96	39.23	27.72
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Quedando como resultado final la siguiente tabla:

Tabla 2.27: Porcentaje Acumulado pasante final de Descarga Trituradora #2

Descarga Trituradora #2	
Tamaño (mm)	% Acumulado Pasante
76.2	100.00
63.5	100.00
50.8	100.00
38.1	100.00
25.4	100.00
19.05	76.91
12.7	41.65
9.53	27.72
0	0.00

Fuente: Elaboración propia

2.5.9. Descarga Trituradora #3

Tabla 2.28: Análisis granulométrico de Descarga Trituradora #3

Descarga Trituradora #3 - Muestra #1			
Tamaño (mm)	Masa retenida (g)	% Retenido	% Acumulado pasante
76.2	0	0.00	100.00
63.5	0	0.00	100.00
50.8	0	0.00	100.00
38.1	0	0.00	100.00
25.4	0	0.00	100.00
19.05	0	0.00	100.00
12.7	41	8.22	91.78
9.53	48	9.62	82.16
0	410	82.16	0.00
Total	499	100.00	

Fuente: Elaboración propia

Se presenta el resumen de los resultados de las 4 muestras en la siguiente tabla:

Tabla 2.29: Porcentaje Acumulado pasante de muestras de Descarga Trituradora #3

Descarga Trituradora #3				
% Acumulado pasante				
Muestra #1	Muestra #2	Muestra #3	Muestra #4	Media
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
100.00	100.00	100.00	100.00	100.00
91.78	90.18	86.52	89.80	89.57
82.16	79.96	70.62	79.60	78.09
0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Fuente: Elaboración propia

Quedando como resultado final la siguiente tabla:

Tabla 2.30: Porcentaje Acumulado pasante final de Descarga Trituradora #3

Descarga Trituradora #3	
Tamaño (mm)	% Acumulado Pasante
76.2	100.00
63.5	100.00
50.8	100.00
38.1	100.00
25.4	100.00
19.05	100.00
12.7	89.57
9.53	78.09
0	0.00

Fuente: Elaboración propia

2.6. Modelamiento digital del proceso

Una vez obtenido el análisis granulométrico y hallado el porcentaje acumulado pasante de cada una de los 9 puntos de muestreo del circuito de conminución, se procede a modelar el circuito en el software e ingresar los datos. En el programa se presentarán los siguientes

resultados: experimentales (Exp), balanceados (Bal), con ajuste de parámetros (Fit) y simulados (Sim).

Los resultados son expresados en tablas y en gráficas, siendo las gráficas las ideales para interpretar los resultados y comparar cada uno de ellos.

2.6.1. Modelamiento general del circuito de conminución

Primero se modeló un diagrama de flujo completo del circuito de conminución, en donde se muestra cada uno de los equipos utilizados en la planta, se evidencia cada uno de los flujos en donde tenemos la alimentación y por otra parte tenemos todos los productos de cada equipo.

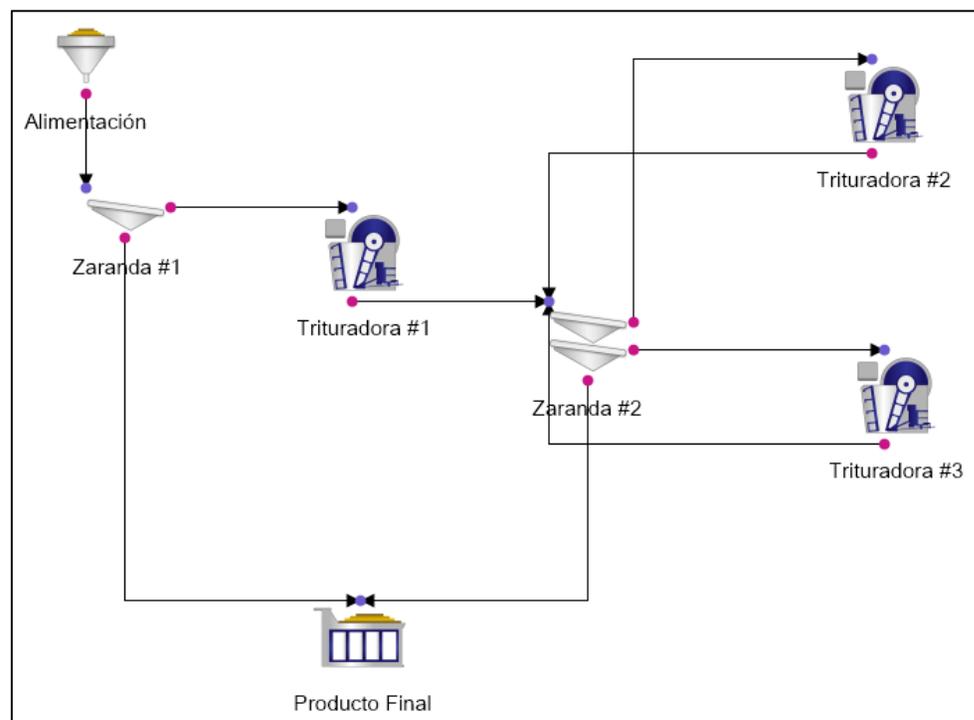


Figura 2.9: Modelamiento general del proceso de conminución

Fuente: Elaboración propia

2.6.2. Modelamiento Zaranda #1

En el sistema de la Zaranda #1 posee un material de ingreso principal A y al ser una zaranda simple tiene dos productos: fino y grueso. A continuación, se muestra el diagrama de flujos de este sistema y sus respectivas gráficas de resultados:

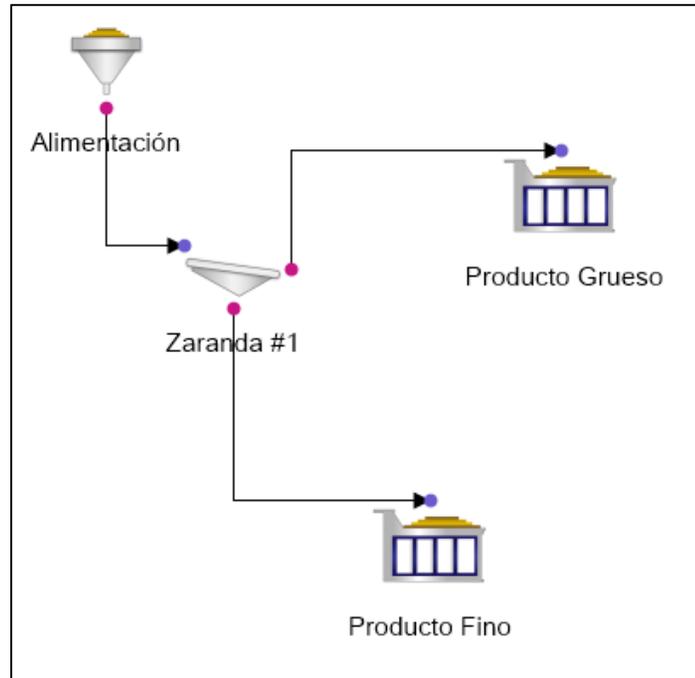


Figura 2.10: Modelamiento Zaranda #1

Fuente: Elaboración propia

La Alimentación al ser el único ingreso del material al circuito de trituración y no pasa previamente por un equipo del proceso de conminución, no posee resultados de ajuste ni resultados de simulación por parte del programa.

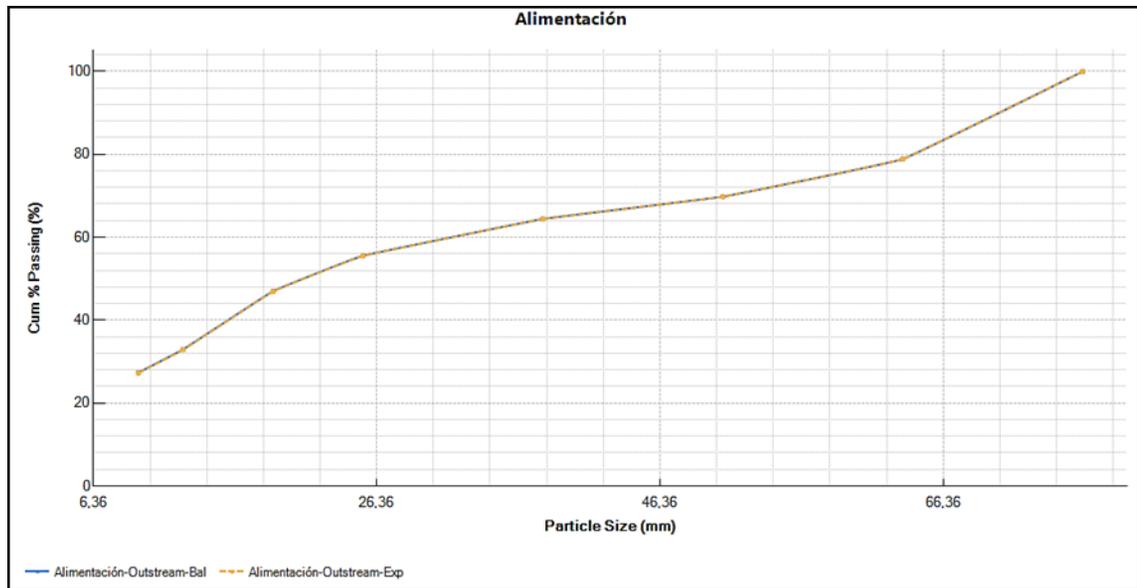


Figura 2.11: Gráfica de resultados de Alimentación

Fuente: Elaboración propia

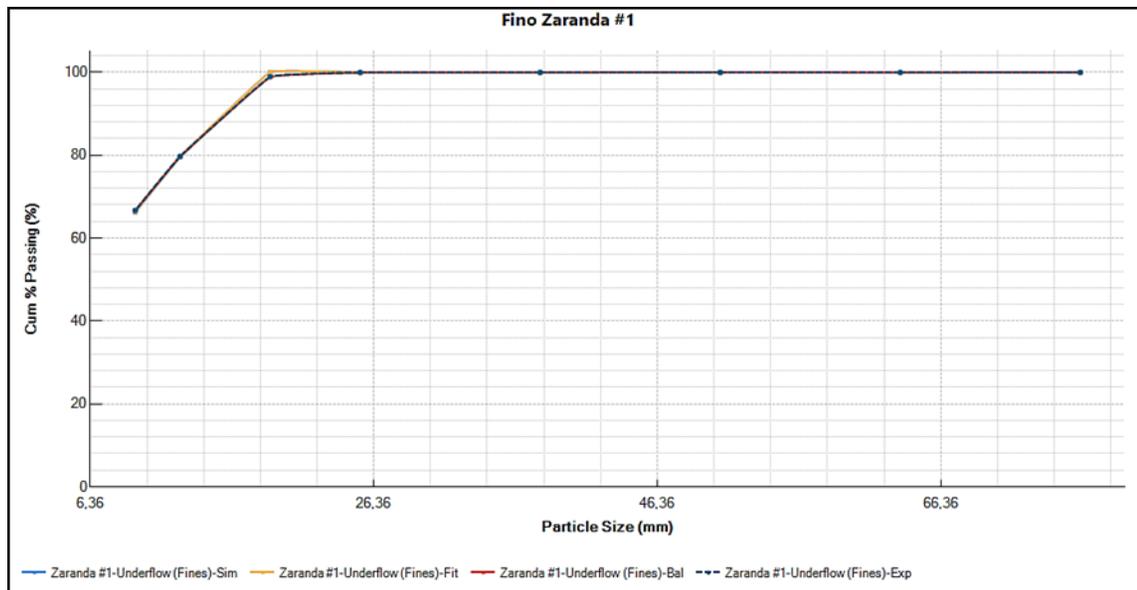


Figura 2.12: Gráfica de resultados de Fino Zaranda #1

Fuente: Elaboración propia

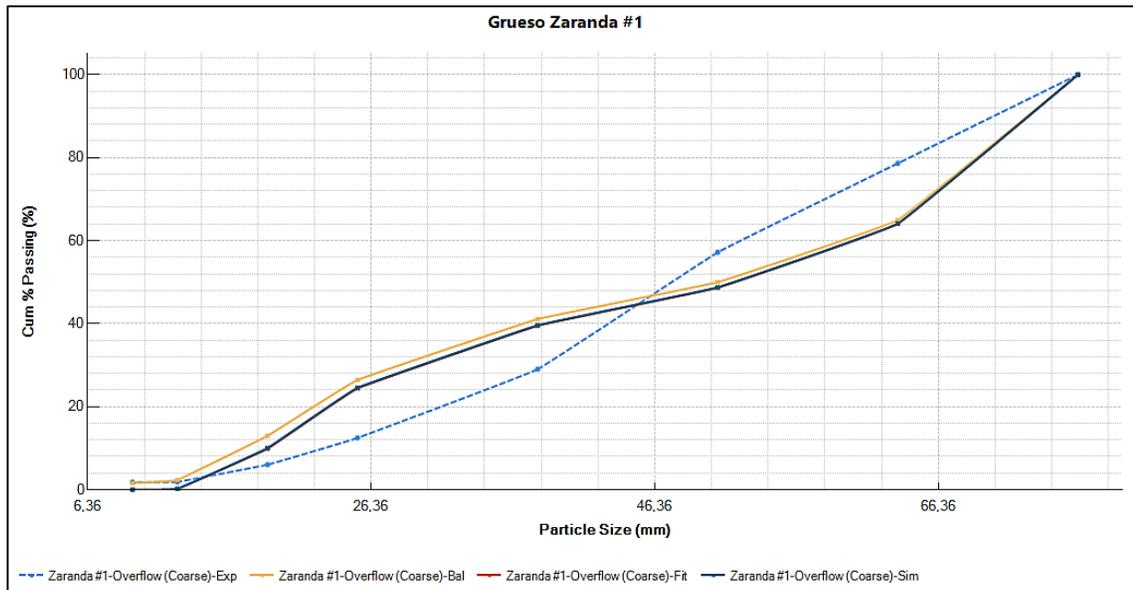


Figura 2.13: Gráfica de resultados de Grueso Zaranda #1

Fuente: Elaboración propia

En la Fig. 2.12 los resultados experimentales del Fino Zaranda #1 se ajustan acordemente con los demás resultados arrojados por el programa. Los datos balanceados van siguiendo la secuencia y en los ajustes presenta un mínimo desvío.

Sin embargo, en la Fig. 2.13 los resultados del Grueso Zaranda #1 desde ya presentan inconsistencias en cada una de sus curvas de la gráfica. Los resultados balanceados demuestran un incremento en los productos finos de la criba.

2.6.3. Modelamiento Trituradora #1

En este sistema de la Trituradora #1 el A1 ingresa en el sistema y como producto se obtiene DT1. A continuación se presenta el diagrama de modelamiento:

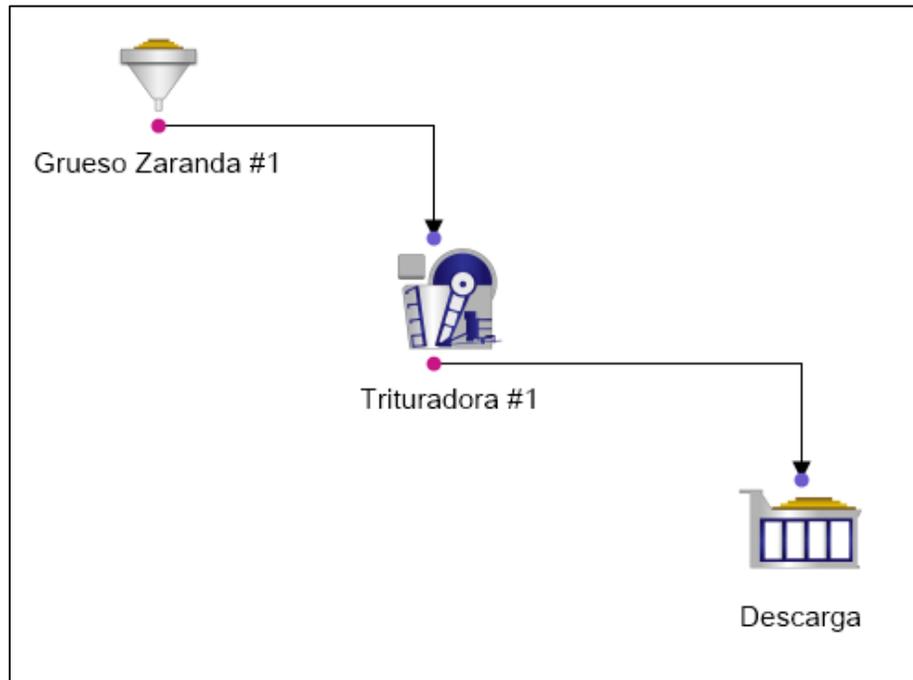


Figura 2.14: Modelamiento Trituradora #1

Fuente: Elaboración propia

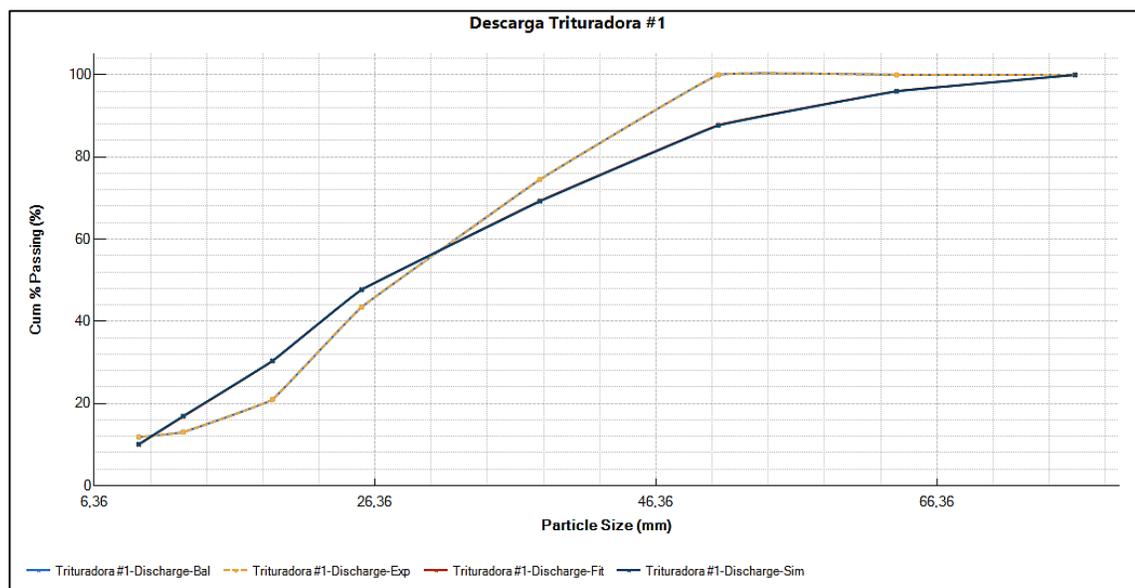


Figura 2.15: Gráfica de resultados de Descarga Trituradora #1

Fuente: Elaboración propia

Los resultados experimentales y balanceados coinciden perfectamente, con la introducción de los parámetros del equipo, se realizó el ajuste y presentó una desviación sobre todo en las partículas de mayor tamaño.

2.6.4. Modelamiento Zaranda #2

La Zaranda #2 es un equipo que tiene doble piso, es decir doble malla, por lo que vamos a tener dos productos de rechazo. Tiene como ingreso de material DT1 y tiene tres productos: el Fino, Grueso 1 y Grueso 2.

A continuación, se presenta el modelamiento del sistema:

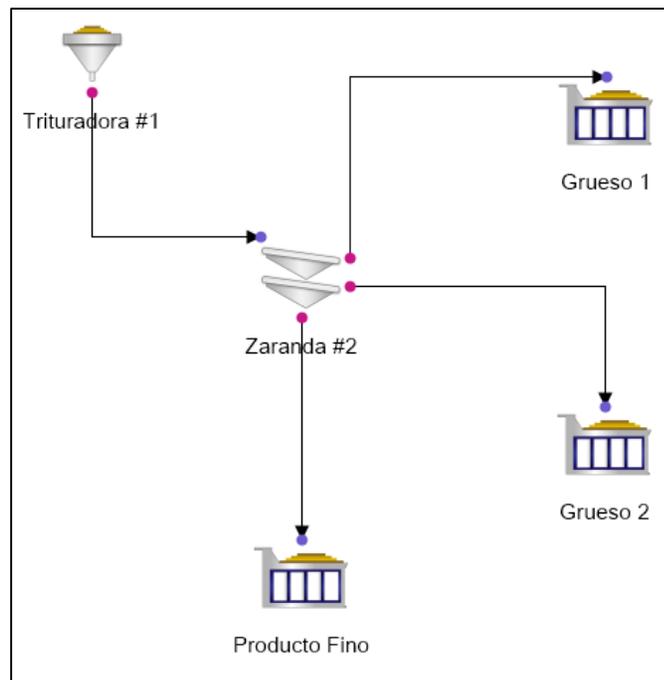


Figura 2.16: Modelamiento Zaranda #2

Fuente: Elaboración propia

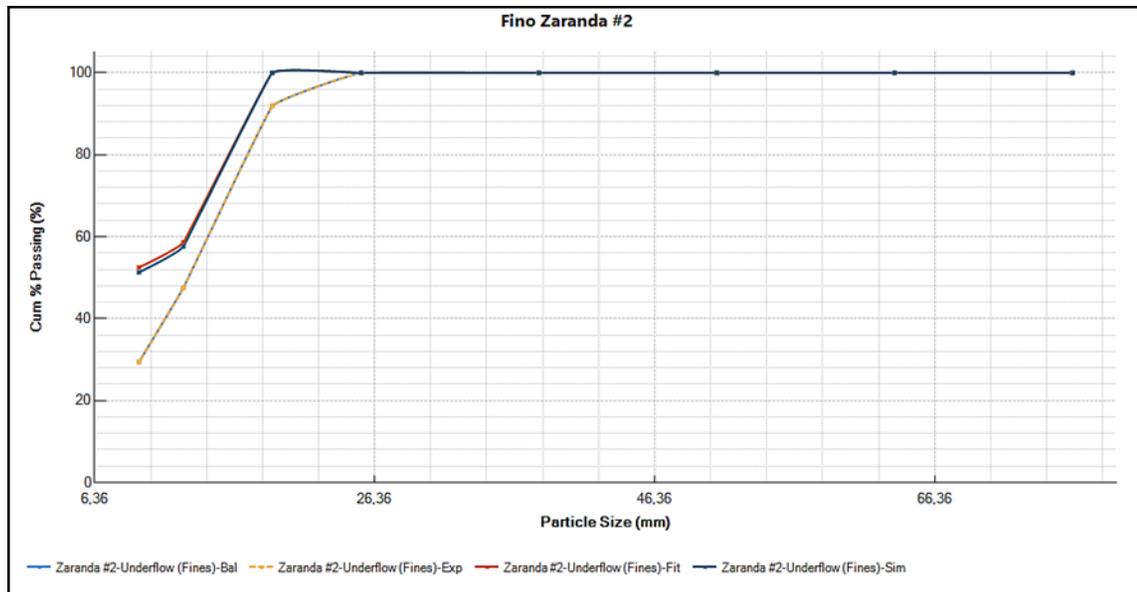


Figura 2.17: Gráfica de resultados de Fino Zaranda #2

Fuente: Elaboración propia

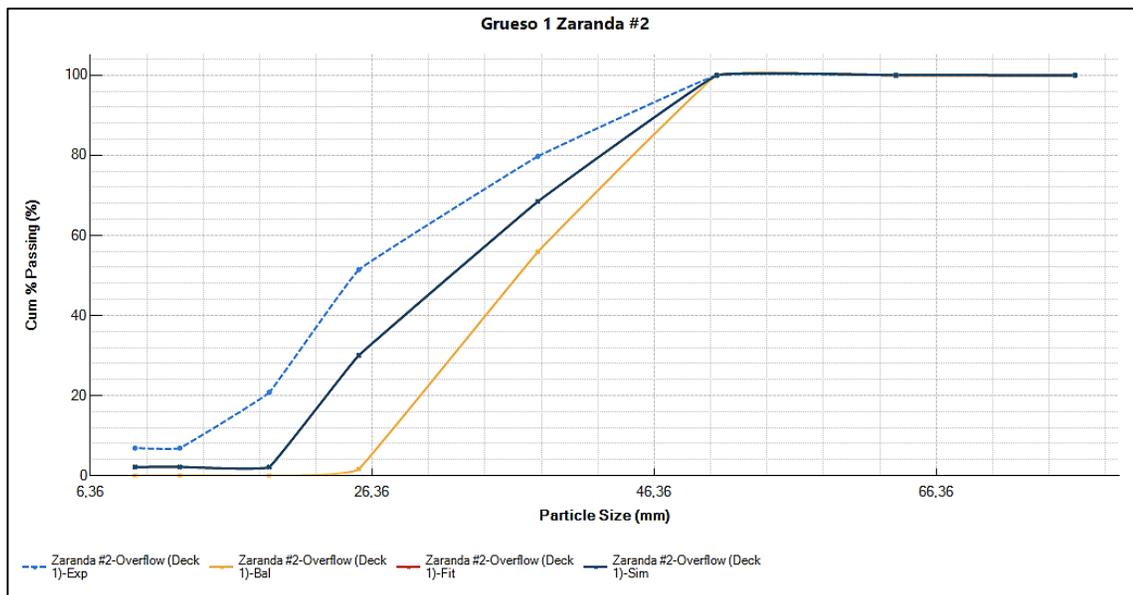


Figura 2.18: Gráfica de resultados de Grueso 1 Zaranda #2

Fuente: Elaboración propia

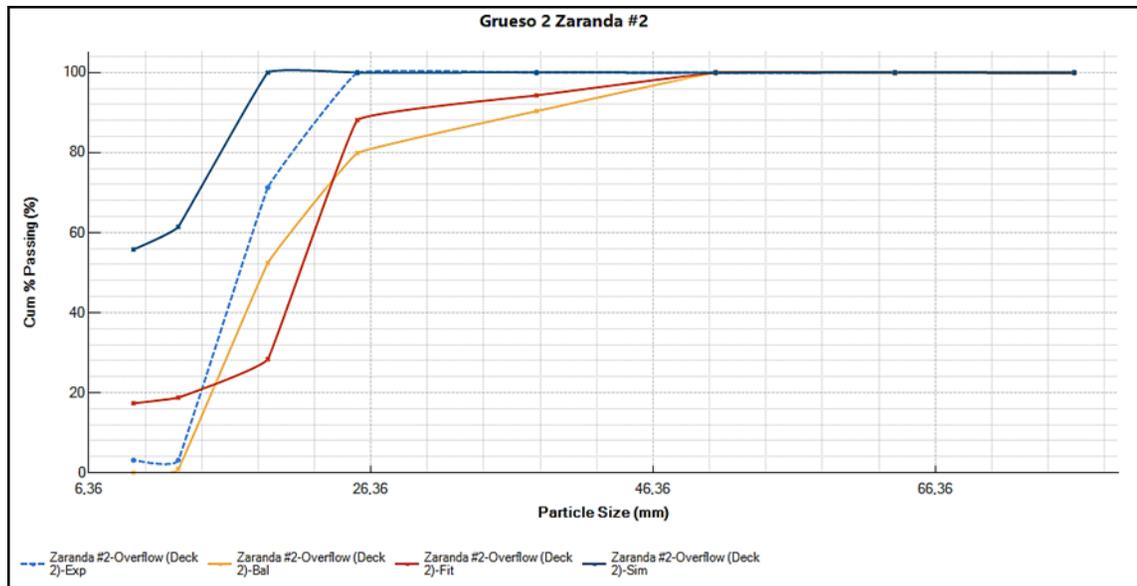


Figura 2.19: Gráfica de resultados de Grueso 2 Zaranda #2

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica de resultados de Grueso 1 se observa que existe una tendencia, pero con un desplazamiento marcado, en donde la curva de los resultados balanceados se ubica por debajo, mientras los resultados con los ajustes se ubican en la mitad de los resultados experimentales y balanceados.

En el Grueso 2 se observa que las curvas de todos los resultados se disparan en algunos sentidos, haciendo notar una gran inconsistencia que está sucediendo en el equipo y especialmente en la segunda malla inferior de la criba. Esto se puede estar originando probablemente por la misma abertura que se está utilizando en ambas mallas.

2.6.5. Modelamiento Trituradora #2

En el sistema de la Trituradora #2 ingresa el material de A2 y da como producto la DT2.

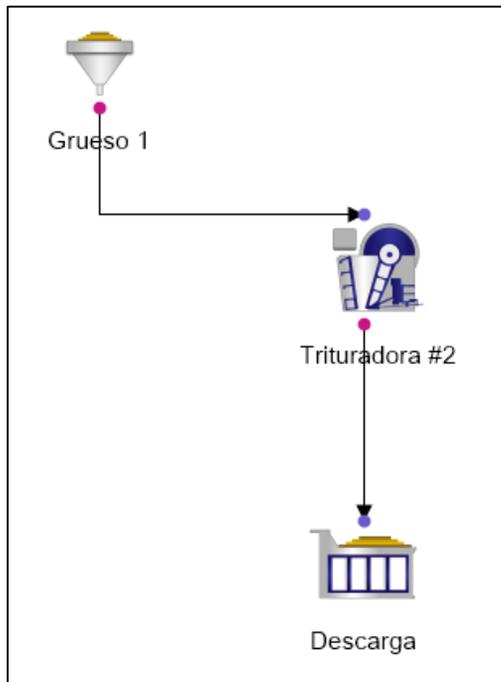


Figura 2.20: Modelamiento Trituradora #2

Fuente: Elaboración propia

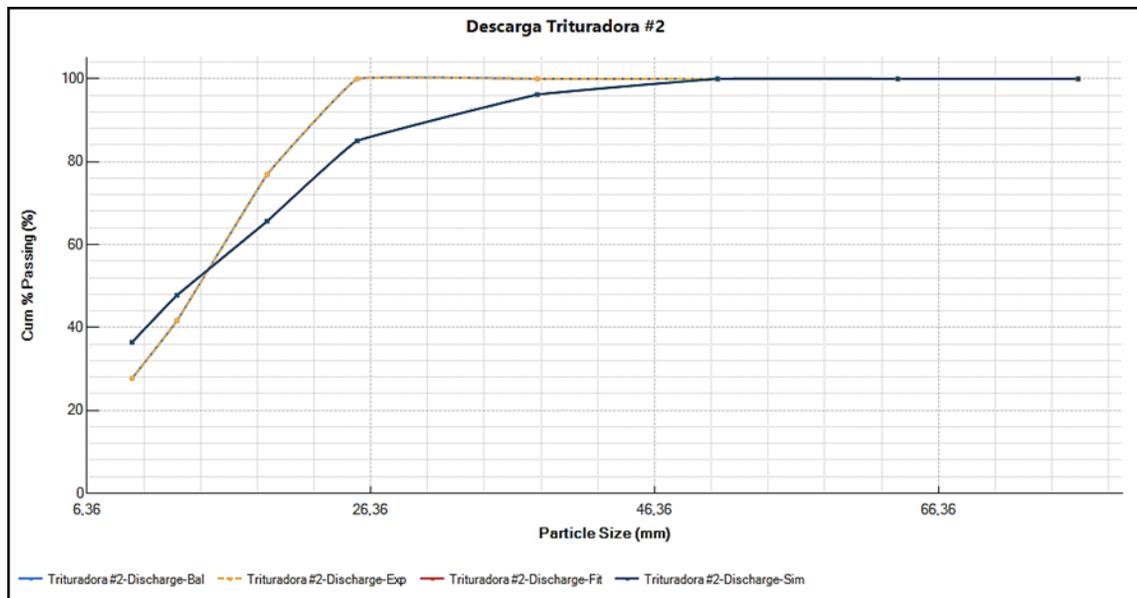


Figura 2.21: Gráfica de resultados de Descarga Trituradora #2

Fuente: Elaboración propia

En estos resultados, la curva del ajuste presenta una mejor tendencia en comparación con los resultados experimentales. En los análisis experimentales se observa que a un determinado tamaño (1”) ya consigue pasar el 100% del material que entró a la trituradora.

2.6.6. Modelamiento Trituradora #3

En el sistema de la Trituradora #3 ingresa al sistema el material A3 y como producto tenemos DT3.

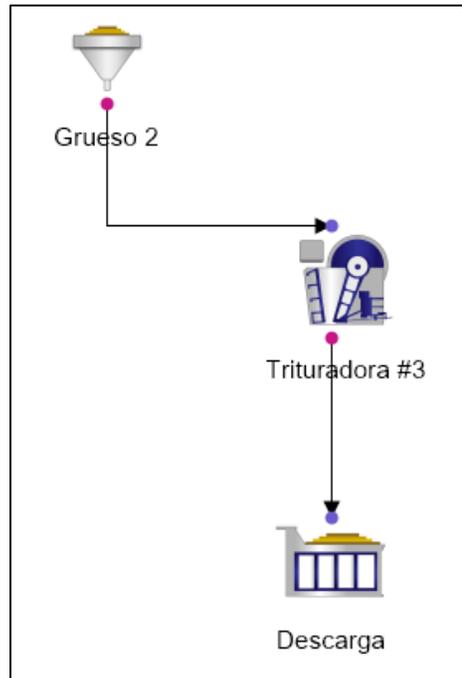


Figura 2.22: Modelamiento Trituradora #3

Fuente: Elaboración propia

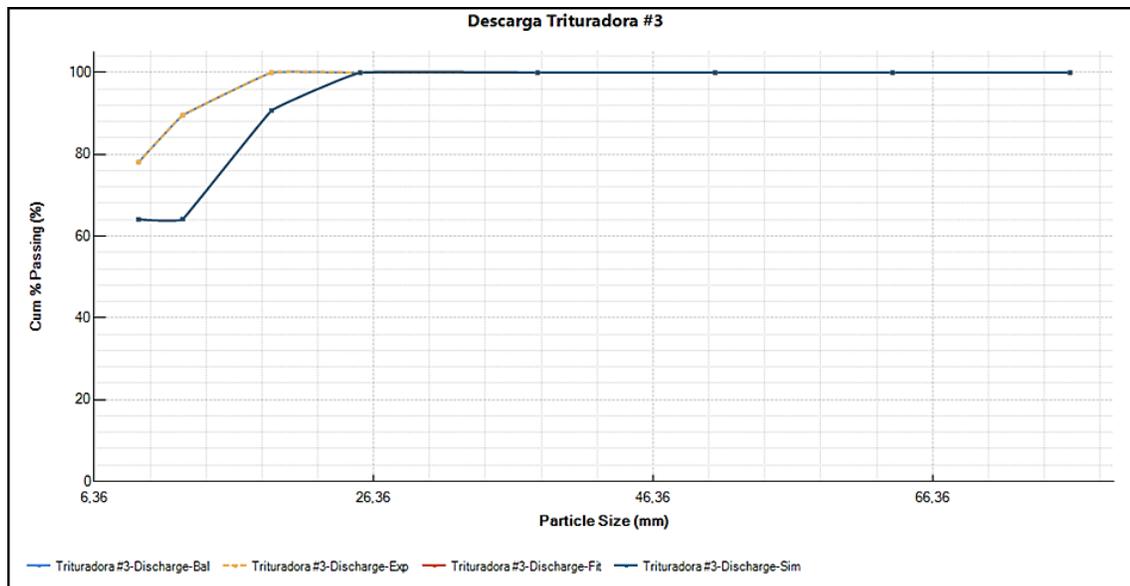


Figura 2.23: Gráfica de resultados de Descarga Trituradora #3

Fuente: Elaboración propia

En la gráfica se observa los resultados experimentales, siendo una curva muy pequeña en donde nos representa que los productos de la DT3 están relativamente finos. Con el ajuste la curva se desplaza hacia una parte inferior.

2.6.7. Carga Circulante: Zaranda #2 – Trituradora #2 y Trituradora #3

La Zaranda #2 tiene como alimento principal DT1, pero está diseñada bajo un circuito cerrado con dos equipos trituradores. Es decir, existe una recirculación del material en donde los productos de DT2 y DT3 regresan nuevamente a la Zaranda #2 y se suman con el alimento DT1.

A continuación, se presenta el modelamiento de este circuito cerrado, en el que se puede apreciar de una mejor manera cada flujo:

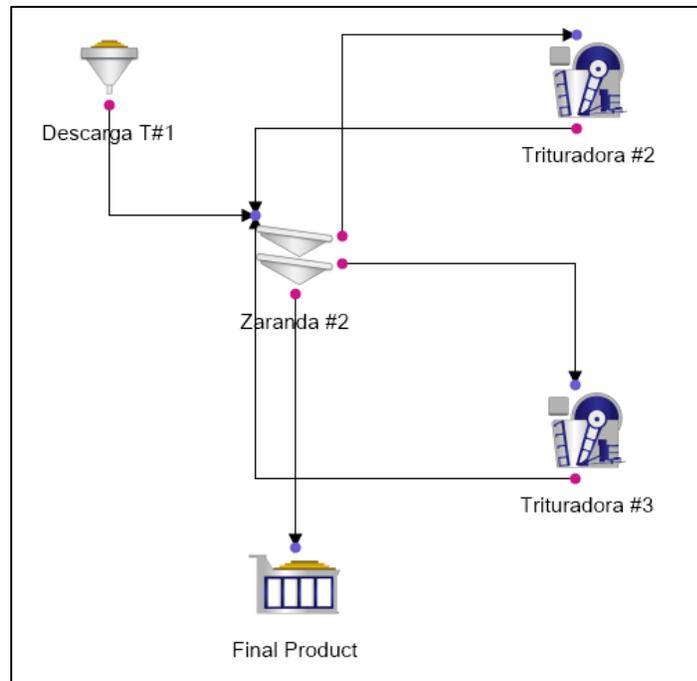


Figura 2.24: Modelamiento Carga Circulante Zaranda #2

Fuente: Elaboración propia

En total ingresa una carga circulante de 8.433 t/h en la Zaranda #2 la cual corresponde a una CC Z2= 74.5 %.

En cambio, en la Trituradora #2 se tiene la siguiente carga circulante:

$$CC T2 = \frac{\% Gruesos}{\% Finos} * 100$$

$$CC T2 = \frac{23.09}{71.25} * 100$$

$$CC T2 = 32 \% \quad (25)$$

En cambio, con el equipo Trituradora #3, se tiene la siguiente carga circulante:

$$CC T3 = \frac{0}{91.90} * 100$$

$$CC T3 = 0 \% \quad (26)$$

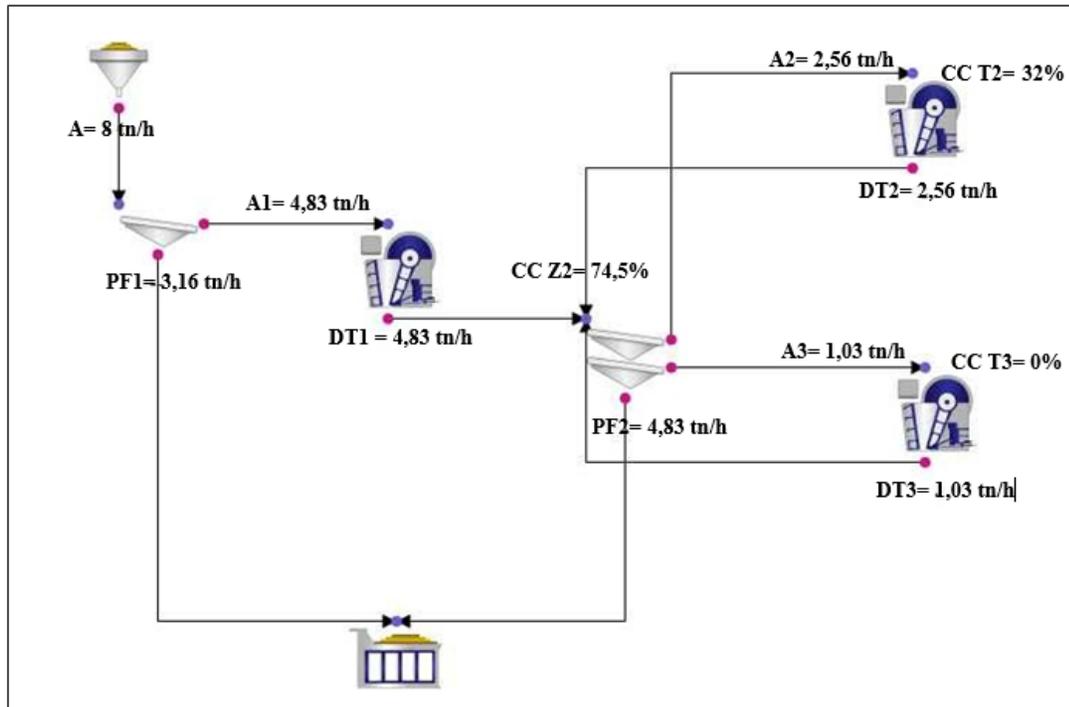


Figura 2.25: Diagrama de flujos del proceso de conminución

Fuente: Elaboración propia

CAPÍTULO 3

3. Análisis de resultados

Con la parte experimental culminada totalmente y efectuado el modelamiento de todo el circuito, se identificó los problemas que hacen que el proceso de conminución no sea óptimo. A continuación, se presentan las alternativas de solución, realizando un profundo análisis de las mismas y una simulación del proceso en el software para alcanzar la optimización del proceso de conminución.

3.1. Interpretación de resultados

Se evidenciaron en los datos algunas anomalías que se reflejan en los parámetros de ciertos equipos. Se describe las anomalías presentadas para posteriormente realizar un análisis de alternativas.

3.1.1. Zaranda primaria

En el circuito de la zaranda #1 se pudo comprobar mediante el análisis granulométrico una ineficiencia en el equipo y específicamente en los productos gruesos, la zaranda #1 tiene una malla de corte de 19.05 mm (3/4") y se encontró productos finos dentro de los gruesos, en el resultado experimental hubo un 6.04 % de materiales finos, mientras que en el resultado balanceado llega a un 13% de finos. A continuación, se muestran estos valores.

Stream's Name:

Size data	(Cum % Passing)			
	Sieve Size (mm)	Exp	SD	Bal
TopSize	76,200	100,000	10,000	99,960
1	63,500	78,630	10,000	65,000
2	50,800	57,200	10,000	50,010
3	38,100	29,050	10,000	41,110
4	25,400	12,480	10,000	26,450
5	19,050	6,040	10,000	12,990
6	12,700	1,890	10,000	2,350
7	9,530	1,820	10,000	1,600
8	0,000	0,000	0,010	0,000
D80 (mm)		64,337		69,339

Figura 3.1: Análisis granulométrico modelado Grueso Zaranda #1

Fuente: Elaboración propia

3.1.2. Zaranda secundaria

La Zaranda #2 es una criba con doble piso, las dos mallas que posee resulta ser de la misma abertura, tiene una abertura de 19.05 mm (3/4”). Existe una controversia al usar las mallas de la misma abertura ya que se crea un flujo de material irregular, pues todo el material que consigue pasar la primera malla prácticamente debe pasar la segunda malla, ya que tienen el mismo tamaño de orificio, pero en los resultados experimentales no lo refleja así.

En el producto del Grueso 1 de la Zaranda #2 en el resultado experimental se genera un 20.81 % de finos, mientras que en el Grueso 2 hay un 71.25 % de finos siendo un valor alto al estar presente en una corriente de productos gruesos.

	Sieve Size (mm)	Exp
TopSize	76,200	100,000
1	63,500	100,000
2	50,800	100,000
3	38,100	79,750
4	25,400	51,440
5	19,050	20,810
6	12,700	6,870
7	9,530	6,870
8	0,000	0,000
	D80 (mm)	38,252

Figura 3.2: Análisis granulométrico experimental Grueso 1 Zaranda #2

Fuente: Elaboración propia

	Sieve Size (mm)	Exp
TopSize	76,200	100,000
1	63,500	100,000
2	50,800	100,000
3	38,100	100,000
4	25,400	100,000
5	19,050	71,250
6	12,700	3,130
7	9,530	3,130
8	0,000	0,000
	D80 (mm)	21,018

Figura 3.3: Análisis granulométrico experimental Grueso 2 Zaranda #2

Fuente: Elaboración propia

Adicional se puede interpretar también el flujo de material en cada producto, teniendo en el Grueso 1 un producto de 2.565 (t/h) y el producto del Grueso 2 en 1.036 (t/h).

Dando a denotar un incremento de trabajo en la Trituradora #2 y una minoría en la Trituradora #3

	Exp	SD	Bal
Solids (ton/h)	0,000	10,000	2,565
%Solids (per weighth)	96,000	0,010	96,000

Figura 3.4: Alimentación Trituradora #2

Fuente: Elaboración propia

	Exp	SD	Bal
Solids (ton/h)	0,000	10,000	1,036
%Solids (per weighth)	96,000	0,010	96,000

Figura 3.5: Alimentación Trituradora #3

Fuente: Elaboración propia

3.1.3. Trituración terciaria

Actualmente la trituración terciaria de la planta posee un equipo de conminución, específicamente una trituradora de mandíbulas del modelo PEX - 150x750 y cuenta mandíbulas tipo lisas.

La trituradora terciaria actualmente presenta problemas en sus ajustes de abertura para la descarga del material, al igual que el flujo de alimentación, cuando hay un incremento de flujo en la granulometría el equipo no alcanza a procesar el material.

3.2. Análisis de alternativas

Antes de profundizar en cada una de las alternativas a presentar, las alternativas se las divide en tres secciones generales que servirán para alcanzar la optimización del proceso teniendo en cuenta tres aspectos principales: el económico, el técnico y los resultados.

El primer aspecto es el económico, es el que engloba todos los temas de presupuesto de la planta, es decir, es el capital que la empresa está dispuesto a invertir ya sea en nuevos equipos o modificaciones de los equipos actuales con el fin de mejorar el proceso de conminución.

El aspecto técnico considera toda la infraestructura planteada para que se pueda llevar a cabo el circuito de trituración, con el incremento de un nuevo equipo o con la modificación de algún sistema toda esta infraestructura puede variar, generando cambios representativos.

Y el último son los resultados, toda alternativa que se analice debe generar estrictamente los mejores resultados de optimización del proceso. A continuación, se presenta las secciones generales para un análisis de alternativas.

Alternativa 1.- Utilización de equipos actuales – cambiar configuración

Esta sección nos manifiesta utilizar los mismos equipos de la planta, es decir no se debe incrementar ningún otro equipo nuevo, sino solo cambiar la configuración de los equipos actuales. La configuración hace referencia a modificar los parámetros de los equipos o también el cambio de ubicación de un equipo dentro del circuito.

Alternativa 2.- Cambio de equipos – mantener configuración

Se introducen nuevos equipos en el circuito de conminución, ya sean cribas o alguna de las trituradoras. Hay que tener en cuenta que en esta alternativa se debe analizar el aspecto económico.

Alternativa 3.- Cambio de equipos y cambio de configuración

Es la unión de las dos secciones anteriores, en las que se agrega algún equipo nuevo y adicional se cambia la configuración de los equipos actuales.

3.2.1. Opción 1.- Cambio configuración Zaranda #1

Para la primera opción se basa en la alternativa 1 en donde se usan los mismos equipos y solo debe cambiar la configuración, el cambio se lo realiza en el equipo de la zaranda #1. El parámetro a modificar va a ser las dimensiones de la criba, la abertura de la malla continuará siendo del mismo tamaño de 3/4". Como se comprobó en los análisis de los resultados de los productos gruesos de la zaranda #1, se encontraban materiales finos debido a que la zaranda no tiene las dimensiones apropiadas para poder clasificar correctamente los materiales finos de los gruesos.

3.2.2. Opción 2.- Cambio configuración Zaranda #2

La configuración a realizarse consiste en eliminar la malla inferior de la zaranda #2 para disminuir el trabajo al equipo y adicionalmente se debe colocar un separador en la malla que queda, esto con la finalidad de dividir los productos gruesos para cada una de las trituradoras.

El motivo de eliminar una malla, es por el hecho de que ambas poseen la misma abertura, el material que pasa la primera malla debe pasar también la segunda malla, pero por cuestiones de geometría del material y del equipo clasificador no consigue pasar. Con esta modificación se garantiza el paso del material de 3/4" y las trituradoras operarán a una capacidad por igual.

3.2.3. Opción 3.- Cambio de equipo Trituradora #3 y configuración Zaranda #2

El cambio del equipo está dirigido exclusivamente para la trituración terciaria, se plantea cambiar la trituradora de mandíbulas por una trituradora de conos. Según la teoría estudiada y revisada, con la trituración terciaria se puede obtener productos con granulometría de hasta 1/2" o 3/8", y con un mayor flujo de procesamiento de material, sin atascamientos y garantizando un producto continuo y de granulometría adecuada.

3.3. Determinación de parámetros óptimos

En este apartado se procederá a realizar una simulación en el software con cada una de las opciones planteadas anteriormente. Con la ayuda del programa y de sus resultados simulados se podrá determinar los factores óptimos.

3.3.1. Parámetros óptimos – Zaranda #1

Los parámetros óptimos de dimensión de la zaranda #1 son los siguientes:

Screen Parameters	
Parameters	
Original	
Screen open area (%)	79,00
Screen width (m)	0,900
Screen length (m)	1,100
Screen aperture size (mm)	19,050
Lower feed rate (t/hm)	0,000
Upper feed rate (t/hm)	205,000
Simulated	
Screen open area (%)	79,00
Screen width (m)	0,900
Screen length (m)	1,800
Screen aperture size (mm)	19,050
Lower feed rate (t/hm)	0,000
Upper feed rate (t/hm)	205,000

Figura 3.6: Parámetros originales y simulados

Fuente: Elaboración propia

El Screen length (longitud de criba) varía su tamaño a una corrección de 1.8 metros, como se puede apreciar en la Fig. 3.6 en los cuadros de parámetros del equipo en la opción de simulado (Simulated). Los resultados obtenidos con la simulación se los puede observar en la columna de Sim de la figura 3.7:

Stream's Name:

Size data		(Cum % Passing)				
	Sieve Size (mm)	Exp	SD	Bal	Fit	Sim
TopSize	76.200	100.000	10.000	99.960	100.000	100.000
1	63.500	78.630	10.000	65.000	64.057	60.166
2	50.800	57.200	10.000	50.010	48.638	43.056
3	38.100	29.050	10.000	41.110	39.482	32.881
4	25.400	12.480	10.000	26.450	24.404	16.149
5	19.050	6.040	10.000	12.990	9.853	0.000
6	12.700	1.890	10.000	2.350	0.239	0.000
7	9.530	1.820	10.000	1.600	0.000	0.000
8	0.000	0.000	0.010	0.000	0.000	0.000
D80 (mm)		64.337		69.339	69.548	70.336

Figura 3.7: Resultados simulados con parámetros nuevos – Zaranda #1

Fuente: Elaboración propia

Al igual también la producción en los gruesos disminuye:

Stream data		Exp	SD	Bal	Fit	Sim
Solids (ton/h)		0,000	10,000	4,832	4,701	4,246
%Solids (per weighth)		96,000	0,010	96,000	96,000	96,000

Figura 3.8: Flujo nuevo en Grueso Zaranda #1

Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Parámetros óptimos – Zaranda #2

Con la eliminación de la malla inferior de la Zaranda #2 la convierte en una zaranda de características simples, obteniendo un producto fino con un flujo de 1.538 t/h, mientras que el producto grueso tiene 3.294 t/h y con la ayuda del separador mencionado anteriormente, hace que el flujo de gruesos sea dividido por mitad y conducido cada una de las partes a la trituradora #2 y trituradora #3.

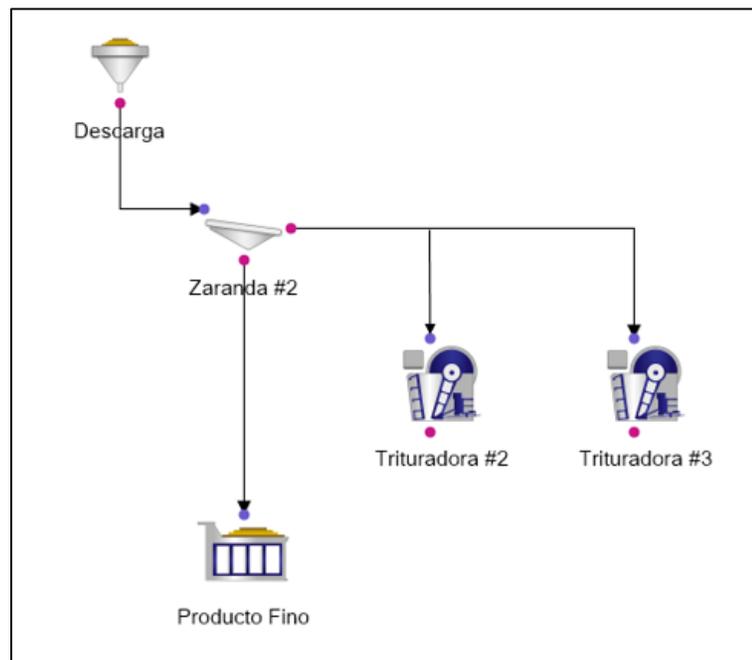


Figura 3.9: Nuevo modelamiento Zaranda #2

Fuente: Elaboración propia

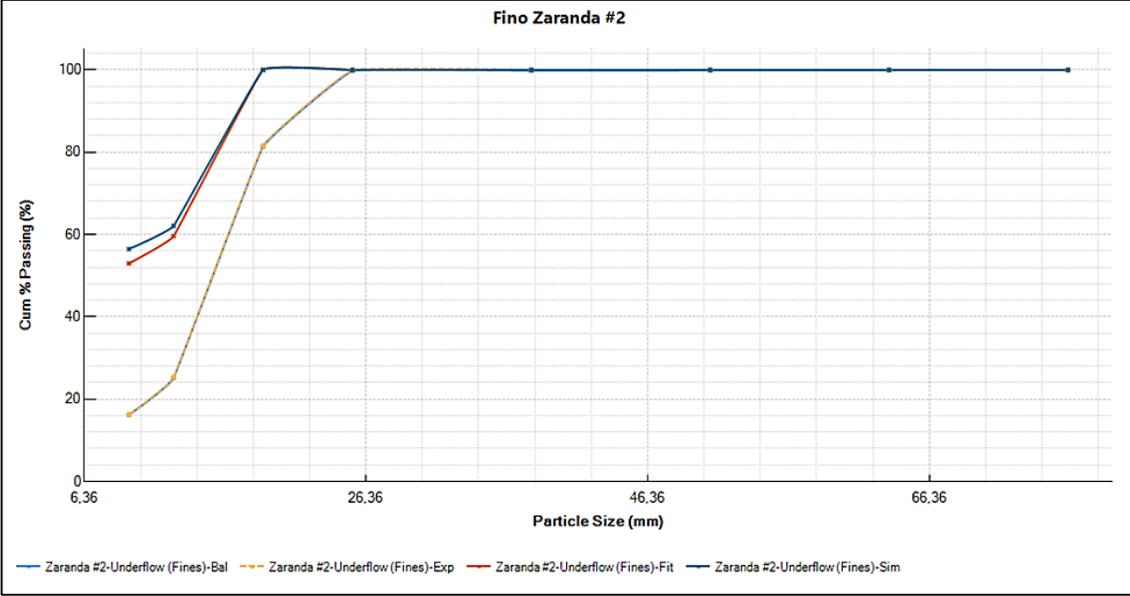


Figura 3.10: Nuevos resultados Fino Zaranda #2

Fuente: Elaboración propia

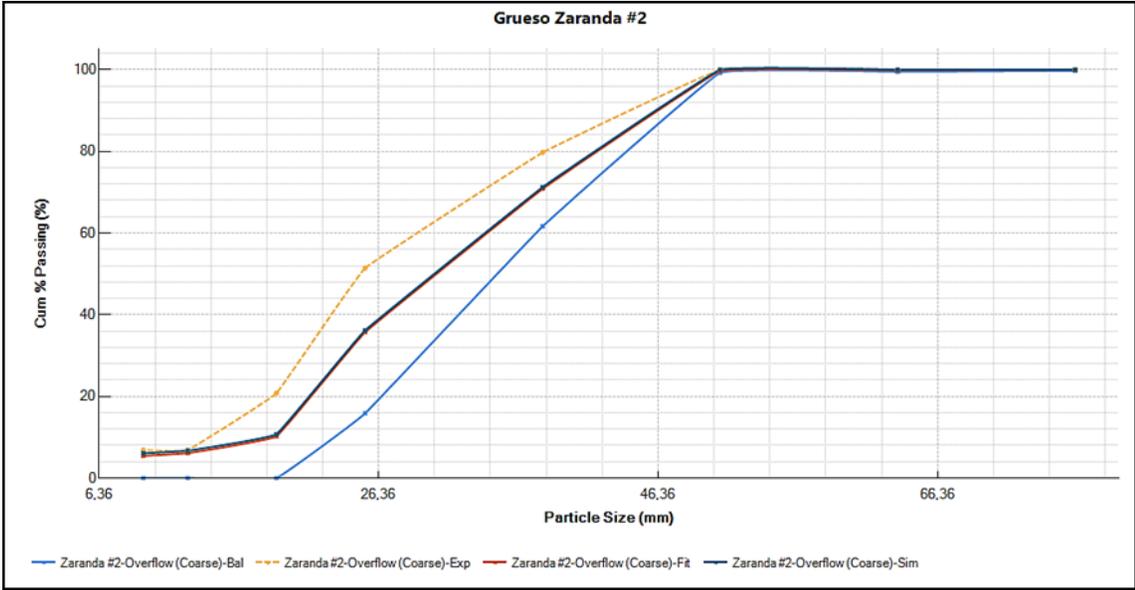


Figura 3.11: Nuevos resultados Grueso Zaranda #2

Fuente: Elaboración propia

Con estas modificaciones se logra hacer trabajar a cada equipo triturador por igual y ningún otro equipo va a tener un sobre esfuerzo con el trabajo que esté realizando.

3.3.3. Parámetros óptimos – Trituradora #3 y configuración Zaranda #2

Se presenta el modelamiento de la Trituradora #3, pero incluyendo un nuevo equipo, una trituradora de cono específicamente, adicional se cambia un parámetro en la zaranda #2 en el cual consiste en cambiar la malla superior y poner una abertura de malla de 1”.

Original	
Screen Open Area (%)	79,00
Screen Width (m)	1,100
Screen Length (m)	2,800
Screen Aperture Size (mm)	19,050
Lower feed rate (t/hm)	0,000
Upper feed rate (t/hm)	640,000

Simulated	
Screen Open Area (%)	79,00
Screen Width (m)	1,100
Screen Length (m)	2,800
Screen Aperture Size (mm)	25,400
Lower feed rate (t/hm)	0,000
Upper feed rate (t/hm)	640,000

Figura 3.12: Cambio de parámetros en malla superior – Zaranda #2

Fuente: Elaboración propia

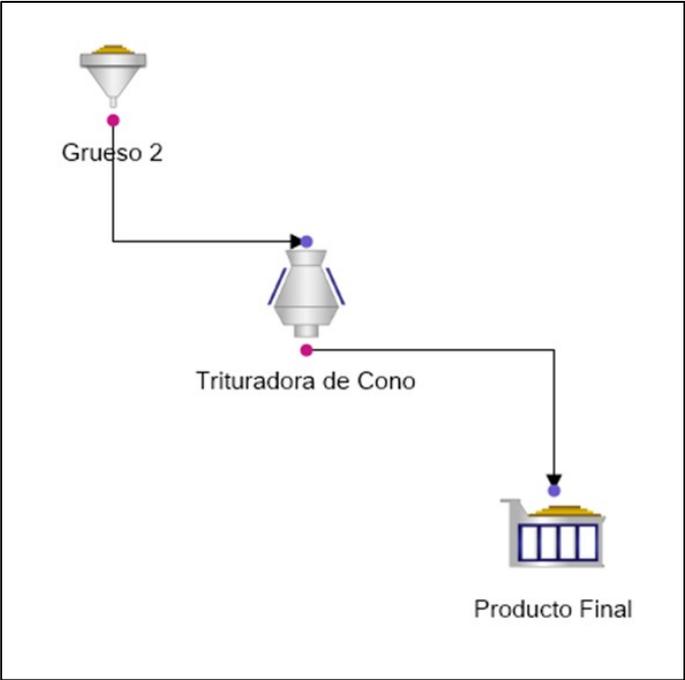


Figura 3.13: Modelamiento Trituradora de Cono

Fuente: Elaboración propia

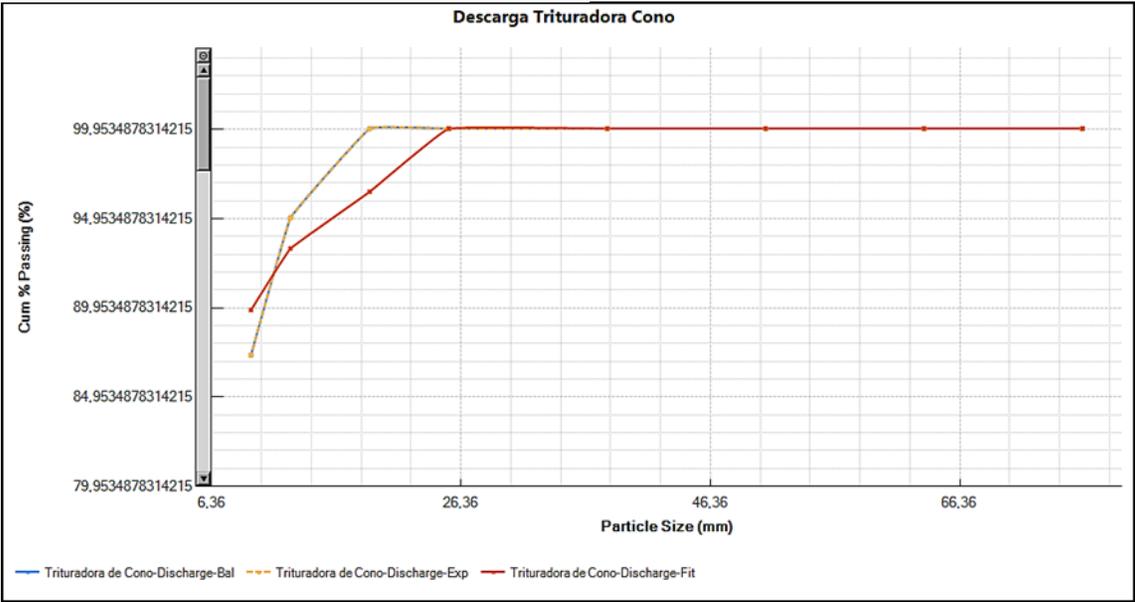


Figura 3.14: Resultados simulados Descarga Trituradora de Cono

Fuente: Elaboración propia

3.4. Optimización del proceso de conminución

El desarrollo del presente trabajo tiene como propósito la optimización del proceso de conminución de la planta de beneficio PROMINE, basándose en el modelamiento del circuito en el software MinProSim. En el programa se introdujeron los datos experimentales tomados en campo, además del levantamiento de información técnica y de los parámetros de cada uno de los equipos para una correcta simulación.

Se realizó un muestreo sistemático de cada corriente tanto la alimentación como los productos de cada proceso, se llevó al laboratorio de la escuela y se hizo el análisis granulométrico de cada muestra respectivamente. El análisis granulométrico más el modelamiento en el programa y sus gráficas de resultados permitió determinar las imperfecciones dentro del proceso de conminución.

En el ítem anterior se presentó las opciones para corregir esos errores identificados y poder mejorar el proceso. Ahora bien, se elige las alternativas idóneas para optimizar la operación, tomando en cuenta los aspectos económicos, técnicos y los resultados.

En la opción uno se tiene al equipo Zaranda #1, donde debido a sus parámetros de dimensiones no cumple la función correcta para clasificar el material que procesa la planta, se opta por la decisión de configurar la longitud de la criba a 1.8 metros como se indicó en la Fig. 3.6 conservando el ancho actual de la criba. Generando una mejora en la clasificación especialmente de las partículas finas, reduciendo la carga de trabajo para los equipos posteriores.

La opción dos radica en la Zaranda #2, se procede a retirar la malla inferior y en la malla superior se conserva con la misma abertura de 3/4" y se añade un separador para dividir el producto grueso de la criba para el alimento de la Trituradora #2 y Trituradora #3. La trituradora #2 y #3 son de características técnicas iguales por lo que no van a presentar inconveniente alguno y además se garantiza un trabajo equitativo para ambas trituradoras. Actualmente la Trituradora #2 está sufriendo un desgaste mayor debido al incremento de trabajo cargado en ese equipo.

Las opciones más adecuadas son la uno y dos, con estas dos modificaciones se garantiza la optimización en la reducción de trabajo en los equipos, principalmente en la Trituradora

#2 alargando su vida útil al igual que los elementos de desgaste; se certifica el paso del 100% de todos los productos de granulometría de 3/4" en las zarandas evitando una carga circulante en el circuito y optimizando completamente el proceso de conminución.

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- Mediante el uso y manejo del software MinProSim se ha logrado modelar el circuito actual con todas sus características, se ha generado modelos nuevos con parámetros modificados que optimizan el proceso de conminución en la planta PROMINE, consiguiendo de esta manera el objetivo general planteado en el presente trabajo de titulación.
- Actualmente la tecnología ha logrado conectarse con la industria minera de una manera significativa mediante los softwares de simulación, que son una herramienta informática que permiten interpretar el procesamiento desde otra perspectiva, optimizan los trabajos en este tipo de procesos, donde se realiza el modelamiento de las etapas con sus respectivos equipos y se generan diferentes alternativas de solución por lo que su utilización ha sido eficiente.
- Uno de los limitantes encontrados en el manejo del software MinProSim es que no se puede hacer un modelamiento integral de todo el circuito de trituración, se lo debe realizar por etapas e ir complementado un sistema con otro. No se puede realizar un análisis global del proceso, convirtiendo el manejo de los resultados por etapas en una situación compleja.
- La alternativa 1 en los aspectos económicos, técnicos y de resultados es la más conveniente para la empresa, ya que utiliza sus mismos equipos y simplemente se realizan ciertas configuraciones en los equipos que actualmente se encuentran operando, además es la alternativa con tiempo más corto de respuesta.
- Con la determinación de los parámetros óptimos de las opciones planteadas, la opción 1 integrada con la opción 2, basadas en la alternativa 1, son las apropiadas para garantizar la optimización en el proceso de conminución de la planta PROMINE, con resultados favorables y demostrados en las simulaciones.
- La opción 1 establece un cambio de configuración en el equipo de la zaranda #1, en donde se modifica sus dimensiones originales, del screen width (ancho de criba) se mantiene su medida en 0,9 metros, mientras que el screen length (longitud de criba) su medida original es 1,1 metros, con el simulador del software se corrige a

una medida de 1,8 metros la nueva longitud de la criba, consiguiendo la clasificación del 100 % de los productos finos de la zaranda, por lo que se optimiza el proceso en los equipos posteriores.

- La zaranda #2 en los resultados del software presentan grandes inconsistencias, especialmente en los productos gruesos o de rechazo, la criba posee dos mallas (superior e inferior) y ambas tienen el mismo tamaño de abertura 3/4". El equipo no se encuentra trabajando eficientemente.
- La opción 2 y su configuración genera una clasificación perfecta en el equipo, certificando un flujo correcto de productos finos, igualmente se genera un trabajo uniforme para los equipos siguientes de fragmentación mediante una alimentación proporcional debido al separador instalado.
- De acuerdo al trabajo de tesis de (Montoya, 2017), los resultados obtenidos en el software JKSimmet mediante la simulación de dos circuitos que fueron usados para la selección y dimensionamiento de equipos, pueden ser comparados con el software MinProSim, que adicionalmente ofrece introducir más parámetros y equipos, con mejores prestaciones de diseño de todo el circuito de procesamiento del material, basado en modelos industriales ya desarrollados.

Recomendaciones

- La planta PROMINE debe considerar la implementación del software MinProSim, así como su manejo y adiestramiento para que se pueda realizar el modelamiento actual caracterizando el comportamiento de sus procesos y generar nuevos modelos de simulación con parámetros correctos para alcanzar la optimización en el proceso de conminución.
- Los softwares que se vayan originando a futuro deben venir con una configuración de idioma ajustable a las necesidades de cualquier persona, con el fin de poder interpretar mejor las diferentes opciones y funciones que incluye el programa.
- Se recomienda en el software MinProSim poder realizar un modelamiento general de cualquier proceso de trituración, incluyendo todos los equipos operativos con el fin de asegurar el manejo de los resultados de un sistema con respecto a otro, para al final obtener un resultado preciso y poder plantear alternativas correctas.
- Al momento de entrar al análisis de alternativas, la planta debe considerar principalmente el aspecto económico, debido a que en estos tiempos los equipos e insumos para el sector minero se han incrementado ostensiblemente, por lo que se recomienda la alternativa en donde se configura el uso de los equipos actuales.
- Se recomienda agrupar las opciones 1 y 2 para garantizar una optimización completa del proceso de conminución de la planta PROMINE.
- En la opción 1, la configuración de la zaranda #1 se recomienda el aumento de la longitud de la criba a 1,8 metros trabajando con el mismo equipo, reconstruyendo su chasis principal y por ende alargando la malla de la criba de 3/4" de abertura.
- Modelar un nuevo diagrama con el equipo de la zaranda #2 y cambiar el parámetro de abertura de la malla superior a 1", realizar el balance metalúrgico en el programa con los ajustes del equipo, obtener las gráficas de cada producto y comparar los resultados con los resultados actuales que se han presentado.
- En la opción 2 se debe cambiar su configuración a una sola malla de la misma abertura con la que se trabaja 3/4", las dimensiones de la criba deben ser las mismas y en la parte de descarga de los productos gruesos se coloca un separador de un material resistente para evitar el desgaste y dividir por igual los productos de granulometría gruesa que serán conducidas hacia los trituradores.

- Se recomienda incorporar en el software MinProSim más parámetros de los equipos de los circuitos para obtener resultados más acertados, generar diseños nuevos bajo modelos industriales que incorporen más de un equipo en el modelamiento.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 911 Metallurgist. (2012). *Trituradora de Mandíbulas*. Obtenido de <https://www.911metallurgist.com/metallurgia/trituradora-de-mandibula/>
- Alcalá, E., Flores, A., & Beltrán, A. (2009). *Manual de Entrenamiento en Concentración de Minerales*. Obtenido de Servicio Nacional de Geología y Técnico de Minas: [https://www.emagister.com/uploads_courses/Comunidad_Emagister_56661_MINERAL ES_-_II_.pdf](https://www.emagister.com/uploads_courses/Comunidad_Emagister_56661_MINERAL_ES_-_II_.pdf)
- Alegria, D. (07 de 2014). *Propuesta de mejora para la recuperación aurífera de la zona "La Bella" de la concesión Bella Rica*. Obtenido de Universidad Central del Ecuador: <http://www.dspace.uce.edu.ec/bitstream/25000/6543/1/T-UCE-0012-400.pdf>
- Apaza, Y. (2018). *EVALUACION DEL CIRCUITO DE CONMINUCION Y FLOTACION DE LA PLANTA CONCENTRADORA DE LA EMPRESA MINERA MINSUR S.A.* Obtenido de Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa: <http://repositorio.unsa.edu.pe/bitstream/handle/UNSA/9722/IEapquye.pdf?sequence=1&isAllowed=y>
- Blanco, E. (2014). *Circuitos de fragmentación*. Obtenido de Universidad de Cantabria: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/4._circuitos_fragmentacion.pdf
- Blanco, E. (2014). *Clasificación, Cribado*. Obtenido de Universidad de Cantabria: <https://docplayer.es/27278653-Bloque-ii-capitulo-9-clasificacion-cribado-emilio-andrea-blanco-clasificacion-i-principios-generales-definiciones.html>
- Blanco, E. (2014). *Trituración*. Obtenido de Universidad de Cantabria: https://ocw.unican.es/pluginfile.php/693/course/section/703/7._trituracion.pdf
- Colquehuanca, M. (2018). Obtenido de Universidad Privada del Norte: <https://repositorio.upn.edu.pe/handle/11537/15264>
- Economía de ahorro. (s.f.). Obtenido de <https://economiadeahorro.com/tasa-interna-de-retorno/>

- Gobierno de México. (03 de Septiembre de 2020). *Clasificación de Yacimientos Minerales*. Obtenido de https://www.sgm.gob.mx/Web/MuseoVirtual/Aplicaciones_geologicas/Clasificacion-de-yacimientos-minerales.html
- Iguarán, L. (2008). *Optimización del proceso de trituración de agregados pétreos para la producción de mezclas asfálticas en caliente*. Obtenido de Universidad de los Andes: <https://repositorio.uniandes.edu.co/bitstream/handle/1992/9808/u303364.pdf?sequence=1>
- Inacap. (s.f.). *Definiciones de metalurgia extractiva*. Obtenido de Metalurgia extractiva: http://www.inacap.cl/web/material-apoyo-cedem/alumno/Mineria-y-Geomatica/AAI_OPIM01_Introduccion_a_la_mineria_y_metalurgia_Capitulo_3.pdf
- Industrias I. (2015). *Trituración*. Obtenido de http://materias.fi.uba.ar/7202/MaterialAlumnos/05_Apunte%20Trituracion.pdf
- Martes, L., Cruz, A. d., & Valdez, D. (2015). *Trituración y Molienda*. Obtenido de <https://es.slideshare.net/sharo007/trituracin-y-moliendas>
- Metso. (s.f.). *Manual de Trituración y cribado*. Obtenido de Dokumen: <https://dokumen.tips/reader/f/manual-de-trituracion-y-cribado-metsopdf>
- Miranda, J. (02 de Diciembre de 2013). *Trituradoras de Mandíbulas I*. Obtenido de Apuntes de Ingeniería Mecánica: <https://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2014/01/trituradoras-quijadas-i.html?m=0>
- Miranda, J. C. (15 de 11 de 2013). *Trituración - Aspectos Generales*. Obtenido de Apuntes de Ingeniería Mecánica: <https://apuntes-ing-mecanica.blogspot.com/2014/01/trituracion-introduccion.html>
- Montoya, M. (2017). *Universidad Nacional Mayor San Marcos*. Obtenido de https://cybertesis.unmsm.edu.pe/bitstream/handle/20.500.12672/6324/Jefferson_mm%20-%20Resumen.pdf?sequence=2&isAllowed=y
- Navarro, A., & Delgadillo, J. (marzo de 2020). *Estrategias de reducción de costos al cobro de la energía eléctrica consumida por la industria minera de Zacatecas*. Obtenido

de Universidad Autónoma de San Luis Potosí:

https://www.researchgate.net/profile/Alfonso-Navarro-Montejo/publication/342820064_ESTRATEGIAS_DE_REDUCCION_DE_COSTOS_ASOCIADOS_AL_COBRO_DE_LA_ENERGIA_ELECTRICA_CONSUMIDA_POR_LA_INDUSTRIA_MINERA_DE_ZACATECAS_DURANGO_SONORA_CHIHUAHUA_Y_GUERRERO/links/5f077

Ortiz, E., & Tirado, R. (2005). *Diseño y Construcción de una Trituradora de Mandíbulas de Excéntrica Elevada*. Obtenido de Universidad Industrial de Santander: <http://tangara.uis.edu.co/biblioweb/tesis/2005/116924.pdf>

Quispe, P. (2019). Obtenido de Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/UNSA/9508>

Torres, S. (11 de Febrero de 2021). *Tiempo Minero*. Obtenido de <https://camiper.com/tiempominero-noticias-en-mineria-para-el-peru-y-el-mundo/conminucion-de-minerales-conoce-los-equipos/>

Universidad Politécnica de Cartagena. (s.f.). *Tecnología Mineralúrgica*. Obtenido de <https://ocw.bib.upct.es/mod/resource/view.php?id=13448>

Universidad Politécnica de Cartagena. (s.f.). *Tema 2: Reducción de Tamaño. Introducción*. Obtenido de https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5543/mod_resource/content/1/Tema_2_-_Reduccion_de_Tamano-Introduccion.pdf

Universidad Politécnica de Cartagena. (s.f.). *Tema 3: Reducción de Tamaño. Trituración*. Obtenido de https://ocw.bib.upct.es/pluginfile.php/5545/mod_resource/content/1/Tema_3_-_Reduccion_de_Tamano-Trituracion.pdf

Urday, J. (2021). Obtenido de Universidad Nacional de San Agustín de Arequipa: <http://repositorio.unsa.edu.pe/handle/20.500.12773/13105>

Zurita, M. (Octubre de 2012). *Proyecto de una planta de trituración para cantera de caliza*. Obtenido de Escuela Técnica Superior de Ingeniero de Minas:
https://oa.upm.es/14978/1/PFC_Miguel_Zurita_Eiranova.pdf