

**UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRION
FACULTAD DE INGENIERÍA**

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA METALÚRGICA



**INCREMENTO DEL TONELAJE DE TRATAMIENTO MEDIANTE LA
CONVERSION DEL MOLINO DE BARRAS MARCY 6,5' X 14' A
MOLINO DE BOLAS MANTENIENDO LOS RESULTADOS
METALURGICOS - CÍA MINERA HUARON, 2017**

TESIS

**PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO
METALURGISTA**

**PRESENTADO POR:
CHAVEZ COTRINA, Omar**

CERRO DE PASCO – PERU

2018

UNIVERSIDAD NACIONAL DANIEL ALCIDES CARRIÓN
FACULTAD DE INGENIERÍA
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERÍA METALÚRGICA



**INCREMENTO DEL TONELAJE DE TRATAMIENTO MEDIANTE LA
CONVERSIÓN DEL MOLINO DE BARRAS MARCY 6,5' X 14' A
MOLINO DE BOLAS MANTENIENDO LOS RESULTADOS
METALURGICOS - CÍA MINERA HUARON, 2017**

TESIS

PRESENTADO POR:

Bach. Omar, CHAVEZ COTRINA

SUSTENTADO Y APROBADO ANTE LA COMISIÓN DE JURADOS:

**Magister. Marco Antonio SURICHAQUI HIDALGO
PRESIDENTE**

**M. Sc. Ramiro SIUCE BONIFACIO
MIEMBRO**

**Magister. Manuel Antonio HUAMÁN DE LA CRUZ
MIEMBRO**

CERRO DE PASCO – PERÚ

Dedicatoria

A mis padres por su infinito apoyo para cumplir con mis metas de ser un profesional.

RESUMEN

El desarrollo del trabajo de investigación se realizó en la planta concentradora de Pan American Silver Unidad Huarón, que consistió en el incremento de tonelaje de tratamiento mediante la conversión del molino de barras Marcy 6,5' x 14' a molino de bolas, manteniendo los resultados metalúrgicos, para ello se contó con el apoyo de los operadores y supervisores que laboran en la Empresa.

El objetivo del trabajo consistió en Incrementar el tonelaje de tratamiento mediante la conversión del molino de barras Marcy 6,5 x 14 a molino de bolas, manteniendo los resultados metalúrgicos. Se realizó un diagnóstico de los molinos y ver sus radios de reducciones que es de la siguiente manera: Molino Dominion $R_{80}= 60,62$, molino Comesa $R_{80}=1,416$, molino Hardinge $R_{80} = 1,972$ y la clasificación del hidrociclón D-20" se mantiene sobre 60% de (74μ)

El rediseño del molino de barras Marcy consistió en determinar la potencia del molino, velocidad crítica, velocidad de operación, carga de bolas, tamaño de bolas y eficiencia de operación del molino.

Se incrementó el tonelaje de tratamiento de 2300 a 2650 TMPD siendo el tonelaje máximo a tratar por el molino de bolas 6.5 x 14 de 516 TM se mantuvo los los resultados metalúrgicos por encima de 60% (74μ) donde se encuentra la granulometría liberada comercial.

Omar CHAVEZ COTRINA

ÍNDICE

Pág.	
DEDICATORIA.	I
RESUMEN.	II
INDICE.	IV
INTRODUCCIÓN.	V

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Determinación del Problema	01
1.2. Formulación del Problema	02
1.2.1. Problema General	02
1.2.2. Problemas Específicos	02
1.3. Objetivos	03
1.3.1. Objetivo General	03
1.3.2. Objetivos Específicos	03
1.4. Justificación del Estudio	03
1.5. Importancia y Alcances de la Investigación	04
1.6. Limitación de la Investigación	05

CAPITULO II

MARCO TEORICO

2.1. Antecedentes.	06
2.2. Bases Teórico – Científicas.	09
2.2.1. Distribución de tamaños	09
2.2.2. Molinos	12
2.2.3. Molinos de bolas	13
2.2.4. Molino de barras	15

2.2.5. Molienda	17
A) Elementos importantes en la molienda	18
Velocidad crítica	19
Relación entre elementos variables	19
Tamaño máximo de los elementos moledores	20
Volumen de carga	21
Potencia	22
B) Tipos de molienda: Húmeda y seca	22
2.2.6 Revestimiento interno de un molino	23
2.2.7. Blindajes y revestimiento	24
2.2.8. Dimensionamiento de molinos	26
A. Potencia necesaria para su funcionamiento	26
a) Potencia teórica para accionar un molino	28
b) Potencia teórica necesaria para el accionamiento	29
B. Procedimientos para el dimensionamiento del molino	34
2.3. Definición de términos	42
2.4. Hipótesis.	43
2.4.1. Hipótesis General.	43
2.4.2. Hipótesis Específicos.	43
2.5. Identificación de las Variables.	43
2.5.1. Variable Independiente.	43
2.5.2. Variable Dependiente.	43
2.5.3. Variable interviniente	44

CAPITULO III

METODOLOGIA

3.1. Tipo de investigación.	45
3.2. Diseño de la Investigación.	45
3.3. Población y Muestra.	47
Población.	47
Muestra.	47

3.4. Método de Investigación.	47
3.5. Técnicas e instrumento de recolección de datos	48
3.6. Técnicas de procesamiento y análisis de datos	49
3.8. Tratamiento estadístico de datos	49

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

4.1. Presentación de resultados	50
4.1.1. Molino Dominion	52
4.1.2. Datos técnicos del molino Comesa	54
4.1.3. Datos técnicos del molino Hardinge	56
4.1.4. Evaluación de la clasificación del hidrociclón D-20	58
4.2. Presentación de los cálculos del rediseño del molino de barras Marcy 6,5 x 14 a molino de bolas	63
a) Calculo de la potencia teórica para accionar el molino	63
b) Calculo de la potencia del molino	64
c) Calculo de la carga inicial de bolas	65
d) Calculo del peso de cada bola	65
e) Calculo del diámetro máximo de bolas	65
f) Calculo de la energía consumida con la carga de bolas	65
4.3. Presentación de los resultados del circuito Molienda-Clasificación de 2650 TMPD	66
4.3.1. Evaluación de los molino y clasificador del circuito Molienda clasificación de 2650 TMPD	66
4.4. Incremento del tonelaje	79
4.5. Prueba de Hipótesis	79
4.6 Discusión de resultados	81
 CONCLUSIONES	 85
RECOMENDACIONES	88

BIBLIOGRAFIA	89
ANEXOS	91
ANEXO I: Fotos	92

INTRODUCCION

La caída de precios de los metales es un problema para la minería peruana, que se dedica a la explotación y recuperación de los minerales polimetálicos, esto debido a que las exportaciones mineras decayeron en un 12,7%. La única manera de contrarrestar esta caída de precios de los metales es incrementando el tonelaje de tratamiento como lo viene haciendo la Empresa Minera Pan American Silver Unidad Huarón.

La empresa tiene en sus instalaciones un molino de barras Marcy que se adquirió para instalarlo a la entrada de la alimentación de la carga para no generar una sobre molienda de las partículas de mineral, pero no se logró instalarlo debido a la baja de precio de los metales. Ante este problema se tomó la decisión de incrementar el tonelaje de tratamiento convirtiendo el molino de barras Marcy a molino de bolas.

Para alcanzar el objetivo de la presente tesis se estructuro de la siguiente manera:

En el capítulo I, se presenta el planteamiento del problema, objetivos y las razones por la que se decide realizar el estudio del control del circuito molienda clasificación que influye en la recuperación del mineral valioso.

En el Capítulo II, compuesto por del marco teórico se presenta el sustento teórico y científico relacionado con los parámetros de diseño para el dimensionamiento de un molino.

En el Capítulo III, concerniente a la metodología, en esta sección se sustenta como se desarrolló el estudio, la metodología y la toma y recolección de datos informativos y el tratamiento estadístico de los datos,

En el Capítulo IV, discusión y resultados, se presentan todos los datos informativos de la investigación llegándose posteriormente a una conclusión final.

Omar CHAVEZ COTRINA

CAPITULO I

PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Determinación del problema

La caída de los precios de los metales sigue golpeando a las exportaciones mineras. En los primeros cinco meses del año estas descendieron 12,7%, impactadas por los menores precios del cobre y los metales preciosos, según la Sociedad Nacional de Minería, Petróleo y Energía (SNMPE).

“Según información al día de hoy, el precio del cobre está cayendo 23% en términos interanuales, mientras que el zinc ha caído 13%, el plomo 19% y el oro 16%. Todos los productos metálicos que exportamos están con tendencia a la baja y eso afecta el valor de las exportaciones”, indicó Hugo Perea, gerente de estudios económicos del BBVA. Y esta tendencia se mantendría todo el año.

Ante esta caída de precios de los metales como Cu, Pb y Zn, la empresa minera Pan American Silver Unidad Huarón, tiene la necesidad de incrementar el tonelaje de tratamiento de la planta concentradora de 2,300 TPD a 2,650 TPD siendo esto una alternativa para contrarrestar los gastos de materiales, reactivos, mano de obra del personal de mina e incrementar sus ingresos por la mayor producción de sus concentrados.

Por estas razones nos planteamos el presente estudio para incrementar el tonelaje de tratamiento mediante la conversión del molino de barras Marcy 6,5' x 14' a molino de bolas.

1.2. Formulación del problema

1.2.1. Problema General

¿Cuál es la influencia del incremento de tonelaje de tratamiento mediante la conversión del molino de barras Marcy 6,5' x 14' al molino de bolas manteniendo los resultados metalúrgicos?

1.2.2. Problemas Específicos

- ¿Cuáles son las condiciones actuales de operación del circuito de molienda?
- ¿Es posible rediseñar el molino de barras Marcy 6,5' x 14' para el incremento de tonelaje a 2,650 TM?

- ¿Se puede mantener la granulometría por encima de 60% (74 μ) de la granulometría liberada comercial?

1.3. OBJETIVOS

1.3.1. Objetivo General

Incrementar el tonelaje de tratamiento mediante la conversión del molino de barras Marcy 6,5' x 14' a molino de bolas manteniendo los resultados metalúrgicos.

1.3.2. Objetivo Especifico

- Analizar las condiciones actuales de operación del circuito de molienda-clasificación.
- Rediseñar el molino de barras Marcy 6,5' x 14' a Molino de bolas para el incremento del tonelaje a 2,650 TM
- Mantener la granulometría adecuada de liberación por encima 60% (74 μ) de la granulometría liberada comercial.

1.4. JUSTIFICACIÓN DEL ESTUDIO

El incremento de tonelaje de tratamiento de la planta concentradora es necesario para mantener sus costos operativos y seguir produciendo concentrados de plomo y zinc ante la baja de precios de los metales por más del 12,7 %. El incremento de tonelaje lo que asegura es seguir

trabajando sin que nos afecte los costos operativos y manos de obra del personal que labora tanto en mina como en planta.

La política de la empresa es seguir produciendo concentrados de plomo y zinc ante esto propuso el incremento de tonelaje de tratamiento de la planta concentradora ya que se cuenta con un molino de barras Marcy de 6,5' x 14' y la reconversión a molino de bolas y de esta manera se incrementará el tonelaje de tratamiento.

1.5. IMPORTANCIA Y ALCANCES DE LA INVESTIGACIÓN

El estudio es importante porque ante épocas de crisis minera y contando con los equipos adecuados de planta si es posible afrontar este problema ante la baja de precios de los metales. En la empresa contamos con un molino de barras Marcy que es posible reconvertirlo a molino de bolas realizando los respectivos estudios y cálculos.

La reconversión del molino de barras a molino de bolas nos va permitir incrementar el tonelaje de tratamiento de 2,300 TM a 2,650 TM. Este incremento de tonelaje nos va permitir obtener mayor producción de concentrados y contrarrestar al menos la baja de precio que vienen sufriendo los metales en el mercado mundial.

1.6. LIMITACIONES

En este estudio no se tiene limitaciones debido a que se cuenta con el apoyo de los directivos, ingenieros de la Empresa Pan American Silver- Unidad Huarón, quienes están apoyando para que el proyecto de ampliación de la planta mediante la reconversión del molino de barras a molino de bolas se haga una realidad.

CAPITULO II

MARCO TEÓRICO

2.1. ANTECEDENTES

Salinas Yadaisela, Francisco Agustín (2015) de la Universidad Técnica de Machala Ecuador, presenta la tesis intitulada “*Evaluación operacional de un sistema de molienda molino de bolas hardinge para mantener la eficiencia y la clasificación del mineral en la empresa MINALTA S.A. del cantón Zaruma, provincia del Oro en el año 2014*”. Quién se plantea como objetivo: Evaluar la operacionalidad de un sistema de molienda del molino de bolas Hardinge para mantener la eficiencia y la clasificación del mineral en la empresa MINALTA S.A. del cantón Zaruma, provincia de el oro en el año 2014”.

Realizado la investigación de tesis llega a las siguientes conclusiones:

- El único objetivo de la clasificación, es la separación de un sistema de partículas en una cierta distribución de granulometría mediante dos procesos los cuales consisten:
 1. los prevalecen los tamaños mayores
 2. y los tamaños menores.
- Esta operación cumple una amplia importancia en la minería y en gran importancia en la hidrometalurgia, ya que en este proceso se prepara las partículas sólidas para el otro proceso de extracción que es la flotación. En esta se manipula la distribución de tamaños de los flujos en una planta con el fin de optimizar el comportamiento de otras operaciones.
- El factor predominante en la evaluación de proceso de molienda es el consumo energético el cual se ve influenciado por la densidad del material a moler, ahorrar energía operando el molino en su optima capacidad va a depender mayoritariamente la utilidad en el proceso, evitando una sobre molienda lo que se traduce en un mayor gasto de energía y aumento en los costos de operación.

Chambi Condori, Deysi (2015), presenta la tesis intitulada “*Diseño de un Molino de Bolas para la Corporación Minera Ananea S.A.*” en la Universidad Nacional del Altiplano, quien se plantea como objetivo: Diseñar un molino de bolas para uso industrial en la Corporación Minera Ananea S.A.

Concluida con el desarrollo de la tesis llega a las siguientes conclusiones:

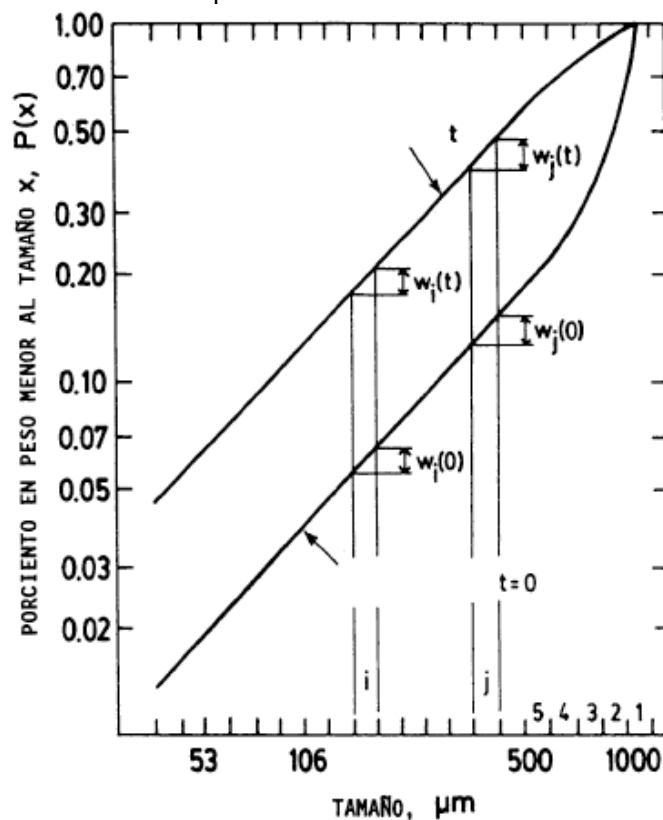
- Para desarrollar el diseño del molino de bolas se estudiaron los diferentes equipos que existen en la industria para la molienda de minerales encontrando al molino de bolas como la mejor opción para tratar 3 Tn/h o 50 Tn/día de mineral.
- Se calculó las dimensiones del molino que nos da 5' x 9' o su equivalente a 6' x 7', motor de 70 Hp, 53 Kw de consumo de energía
- Se redujo de manera significativa cualquier desgaste ocasionado durante la trasmisión de movimiento, tomando en consideración diferentes aspectos básicos en el cálculo de engranes, ejes, rodamientos, acoplamientos, selección del motor eléctrico y el reductor de velocidad.

2.2. BASES TEÓRICAS Y CIENTÍFICAS

2.2.1. DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS

Esta distribución de tamaños puede ser representada por una curva continua o por un conjunto de números $P(x)$ que representan la fracción acumulativa en peso bajo el tamaño x . A menudo es conveniente usar una escala log-log para la representación gráfica de $P(x)$, tal como se muestra en la Figura 1.

Fig. 1 Gráfico log-log de la distribución de tamaño acumulativa. El tiempo de molienda es t .



Fuente: Agustín concha

El método de análisis granulométrico más sencillo y seguro es el tamizado, de modo que el tamaño se refiere por lo general al tamaño de la malla de cada tamiz utilizado (ver Tabla 1) La fracción en peso retenida en los intervalos de los diversos tamaños de tamices, denotada por w , contiene la misma información que la Figura 1, de manera que un conjunto de números w también representa la distribución de tamaño. Es conveniente usar intervalos de tamaño en una progresión geométrica correspondiente a la secuencia normalizada de tamices. Utilizaremos la convención arbitraria de designar el tamaño del intervalo mayor como 1, el próximo más pequeño como 2, etc., como se muestra en la Figura 1. Si se considera cualquier intervalo de tamaño, por ejemplo, el intervalo i , la fracción en peso de material retenido en este intervalo es W_i . No es fácil extender la distribución granulométrica a tamaños muy pequeños, menores a $38 \mu\text{m}$ (400 mallas), debido a la dificultad experimental de medir con exactitud estos tamaños pequeños. El intervalo de tamaño final, que contiene el peso del material más pequeño, es definido como la fracción en peso w_n de tamaños menores al más pequeño tamiz utilizado. Este intervalo se denomina sumidero ya que él recibe material fracturado de todos los

tamaños mayores, pero no entrega material a ningún otro intervalo.

Tabla 1. Serie Internacional de Tamices Normalizada

Tamaño normalizado	Designación malla U.S.	Tamaño normalizado	Designación malla U.S.
125 mm	5"	850 μm	20
106 mm	4.24"	710 μm	25
100 mm	4 "	600 μm	30
90 mm	3½ "	500 μm	35
63 mm	2½ "	355 μm	45
53 mm	2.12 "	300 μm	50
50 mm	2 "	250 μm	60
45 mm	1¾ "	212 μm	70
37.5 mm	1½ "	180 μm	80
31.5 mm	1¼ "	150 μm	100
26.5 mm	1.06 "	125 μm	120
25.0 mm	1 "	106 μm	140
22.4 mm	7/8 "	90 μm	170
19.0 mm	3/4 "	75 μm	200
16.0 mm	5/8 "	63 μm	230
13.2 mm	0.530 "	53 μm	270
12.5 mm	1/2 "	45 μm	325
11.2 mm	7/16 "	38 μm	400
9.5 mm	3/8 "		
8.0 mm	5/16"		
6.7 mm	0.265 "		
6.3 mm	1/4 "		
5.6 mm	Nº 3½		
4.75 mm	4		
4.00 mm	5		
3.35 mm	6		
2.80 mm	7		
2.36 mm	8		
2.00 mm	10		
1.70 mm	12		
1.40 mm	14		
1.18 mm	16		
1.00 mm	18		

Fuente: Agustín CONCHA

2.2.2. MOLINOS

Se llaman así a las máquinas en donde se produce la operación de molienda. Existen diversos tipos según sus distintas aplicaciones, los más importantes son:

- de Rulos y Muelas.
- de Discos.
- de Barras.
- de Bolas.
- de Rodillos.

Las de Rulos y Muelas consisten en una pista similar a un recipiente de tipo balde, y un par de ruedas (muelas) que ruedan por la pista aplastando al material.

En la antigüedad, para brindar la fuerza necesaria para hacer rodar las muelas por la pista se empleó la molienda manual o impulsada por animales. Más tarde este método fue reemplazado por el molino de viento, donde las aspas del mismo captan y transforman la energía eólica en energía mecánica. Por medio de un sistema de engranajes adecuado se genera el movimiento necesario para moler el grano. Así es como se obtenía en la antigüedad la harina a partir de cereales. www:/Users/Downloads/molienda4-0143104.pdf

El molino de Discos consiste en dos discos, lisos o dentados, que están enfrentados y giran con velocidades opuestas; el material a moler cae por gravedad entre ambos. Actualmente no se utiliza. Este tipo de molinos ha ido evolucionando hacia el molino que hoy conocemos como molino de Rodillos. Los más utilizados en el ámbito industrial son: los de Bolas, Barras y los de Rodillos. Esquemáticamente, los dos primeros mencionados pueden concebirse como un cilindro horizontal que gira alrededor de su eje longitudinal, conteniendo en su interior elementos moledores, los cuales se mueven libremente; el material a moler ingresa por un extremo del cilindro, es molido por fricción y percusión de los elementos moledores y sale por el extremo opuesto con un tamaño menor. Los cuerpos de molienda son grandes y pesados con relación a las partículas de mena. (Industria I, p. 3)

2.2.3. MOLINOS DE BOLAS

Son molinos que llevan bolas de acero de fundición o acero forjado de 3 pulgadas de diámetro, además están aleadas al Cromo o Molibdeno (Mc Cabe, 1 991) las cuales impactan con el material al caer desde la parte superior de la carcasa del molino. El cilindro del molino se mueve a cierta velocidad, lo que produce que una caiga repetitiva de las bolas al impactar

el material. Por esta razón, este cilindro debe ser resistente a los golpes producidos por el material moedor. (Balcazar & Guamba, 2 009).

El producto final posee un diámetro entre 0-30 μ m y 0-200 μ m. La velocidad a la que giran el cilindro del molino esta entre 4 y 20 r.p.m.

Su funcionamiento es similar al molino de barras, sin embargo, su principal ventaja es que produce un material mucho más fino.

Estos molinos pueden descargar por tres métodos:

- Rebalse: Útil para moliendas finas y vía húmeda, se aplica a circuito cerrado.
- Diafragma: Para moliendas gruesas y en seco.
- Varios compartimientos: El cilindro está dividido en secciones que contienen bolas de distintos tamaños para efectuar moliendas finas y gruesas simultáneamente.

Ventajas:

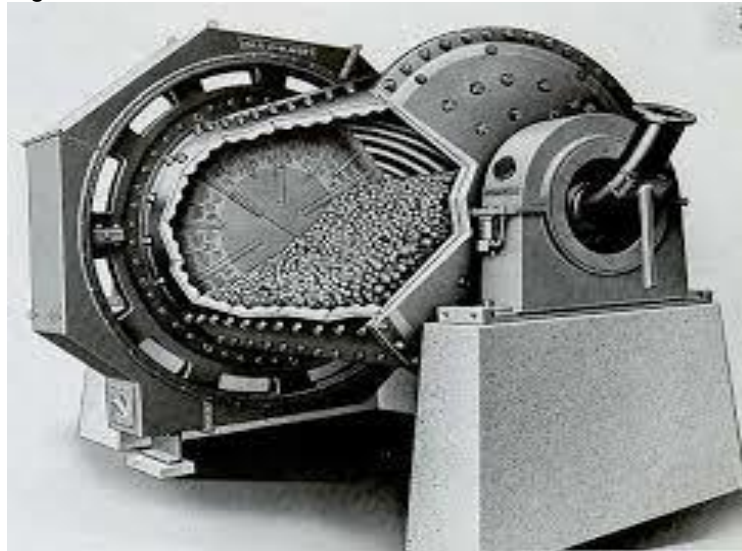
- Apto para obtener material fino.

Desventaja:

- Contaminación del material por las bolas de acero

- Desgaste de la superficie por cizallamiento del material fracturado. (Balcazar & Guamba, 2 009).

Figura 2. Molino de Bolas



Fuente: Bravo Gálvez, Antonio Cesar-Planta concentradora

2.2.4. MOLINO DE BARRAS

Son molinos que en su interior poseen barras cilíndricas de varios tamaños y con un diámetro entre 25 a 125mm (McCabe, 1991). Estas barras se disponen a lo largo del molino y se fabrican en acero, previamente tratadas para protegerlas del desgaste y la corrosión (Universidad Politécnica de Cartagena, 2013).

Cuando las barras caen sobre el material, este se rompe por frotamiento entre las barras y la superficie del cilindro y por percusión a consecuencia de la caída de las barras.

Al igual que, el molino de bolas, su descarga se divide en:

- Rebalse: aplicable a circuitos abiertos.
- Periférica central y final: en vías húmedas y secas.

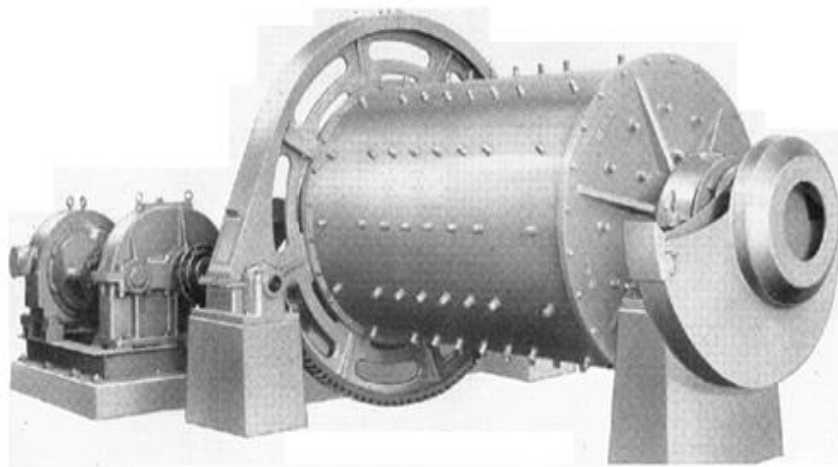
Ventajas:

- Útil para obtener molienda gruesa (Universidad Politécnica de Cartagena, 2013), ya que, al caer las barras, el material queda atrapado entre ellas, evitando que la trituración sea más fina.

Desventajas:

- No apto para sustancias pegajosas, pues se adhieren a las barras evitando su trituración (Balcazar & Guamba, 2009).

Figura 3. Molino de Barras



Fuente: Bravo Gálvez, Antonio Cesar-Planta concentradora

2.2.5. MOLIENDA

Es una operación unitaria que se encarga de reducir el tamaño de partículas hasta un tamaño deseado para un proceso en específico, en donde se aumenta la superficie de contacto del material para que de esta forma sea aprovechado más óptimamente en un proceso industrial.

Los productos obtenidos de estos molinos son más pequeños y de forma regular que los surgidos de la trituración, generalmente se habla de este proceso cuando se trata de partículas inferiores a 2,54 cm (Mc Cabe, 1 991), teniendo esta un mayor grado desintegración con respecto a la trituración. (Industria. p. 2)

Este tamaño deseado se va a conseguir por medio de la combinación de fuerzas de compresión, cizalladora y abrasión, estos equipos pueden trabajar de forma discontinua y continua, siendo la forma discontinua en la cual el molino se carga y se cierra al hacerlo girar, terminada esta operación el molino se abrirá para a continuación separar el material deseado de las impurezas; mientras que en la forma de continua el molino se alimenta de forma constante por un extremo y simultáneamente se va descargando el material

molido por el otro extremo, esta operación solo se detendrá por mantenimiento o recarga de los cuerpos encargados de la trituración.

La molienda se puede dividir al mismo tiempo en vía seca y vía húmeda siendo la vía seca molienda de material con 2% de agua o con una determinada humedad de hasta 30% de agua, por otra parte, la vía húmeda se realiza sobre material que conforma una pulpa con un contenido de 30 hasta un 300% de agua (Mc Cabe, 1 991).

A. Elementos importantes en la molienda

Existe una serie de elementos importantes que influyen en la molienda de los materiales. Estos son: (Industrias, p.3)

- Velocidad Crítica.
- Relaciones entre los elementos variables de los molinos.
- Tamaño máximo de los elementos moledores.
- Volumen de carga.
- Potencia.
- Tipos de Molienda: húmeda y seca.

Velocidad Crítica

La velocidad crítica para un molino y sus elementos moledores es aquella que hace que la fuerza centrífuga que actúa sobre los elementos moledores, equilibre el peso de los mismos en cada instante. Cuando esto ocurre, los elementos moledores quedan “pegados” a las paredes internas del molino y no ejercen la fuerza de rozamiento necesaria sobre el material para producir la molienda. El molino, entonces, deberá trabajar a velocidades inferiores a la crítica. (p.49).

$$\boxed{n_c (rpm) = \frac{42,3}{\sqrt{D(m)}}} \Leftrightarrow \boxed{n_c (rpm) = \frac{76,63}{\sqrt{D(ft)}}}$$

La velocidad crítica es función de la inversa de la raíz cuadrada del diámetro del molino.

Relaciones entre los Elementos Variables

El diámetro del molino, su velocidad, y el diámetro de los elementos moledores son los elementos variables del proceso. Teniendo en cuenta que en la molienda se emplean elementos moledores de distintos tamaños, las relaciones entre los elementos variables son: (p.6).

- A mayor diámetro de bolas, mayor es la rotura de partículas grandes (percusión).
- A menor diámetro de bolas, mayor es la molienda de partículas pequeñas por una mayor superficie de los elementos moledores (fricción).
- A mayor diámetro de bolas, mejora la molienda de material duro (percusión).
- Para igual molienda, a mayor diámetro del molino o mayor velocidad, menor el diámetro necesario de bolas.

Tamaño Máximo de los Elementos Moledores

En los molinos de barras y bolas, el elemento molidor no tiene todos los mismos tamaños, sino que a partir de un diámetro máximo se hace una distribución de los mismos en tamaños inferiores. Para determinar el diámetro máximo se aplica la siguiente fórmula: (p.6).

$$M(\text{m}) = \sqrt{\frac{F(\mu) \cdot W_i}{K \cdot C_s(\%)}} \cdot \sqrt{\frac{S(\text{ton} / \text{m}^3)}{\sqrt{D(\text{ft})}}}$$

Donde:

M: diámetro máximo de elementos moledores.

F: tamaño de alimentación del 80% de la carga.

Wi: Work Index - constante adimensional función de la naturaleza del material molido. Se obtiene por tablas.

K: constante adimensional que vale: bolas→200, barras→300

Cs: porcentaje de la velocidad crítica.

S: peso específico del material a moler.

D: diámetro interno del molino.

Luego, ingresando en tablas con el tamaño máximo de los elementos moledores, se obtiene la distribución porcentual y los respectivos diámetros de los componentes para efectuar la molienda.

Volumen de Carga

Los molinos de bolas y barras no trabajan totalmente llenos. El volumen ocupado por los elementos moledores y el material a moler referido al total del cilindro del molino, es lo que se denomina Volumen de Carga (p.6):

$$V (\%) = \frac{(V_{\text{material a moler}} + V_{\text{elementos moledores}})}{V_{\text{interior del cilindro}}} \times 100$$

Habitualmente es del 30% al 40%, y de este volumen, el material a moler ocupa entre una 30% a un 40%.

Potencia

La potencia máxima se desarrolla cuando el volumen de carga es del 50% aproximadamente, sin embargo, generalmente se trabaja entre un 30% y un 40% ya que como la curva es bastante plana, la potencia entregada es similar a la del 50%.

B. Tipos de Molienda: Molienda Húmeda y Molienda Seca

La molienda se puede hacer a materiales secos o a suspensiones de sólidos en líquido (agua), el cual sería el caso de la molienda Húmeda. Es habitual que la molienda sea seca en la fabricación del cemento Portland y que sea húmeda en la preparación de minerales para concentración. En la molienda húmeda el material a moler es mojado en el líquido elevando su humedad, favoreciéndose así el manejo y transporte de pulpas, que podrá ser llevado a cabo por ejemplo con bombas en cañerías. En la molienda húmeda moderna, luego del proceso de desintegración, la clasificación de partículas se llevará a cabo en hidrociclones y si se desea concentrar el mineral se podrá hacer una flotación por

espumas. El líquido, además, tiene un efecto refrigerante con los calores generados en el interior. (p.7).

Molienda Húmeda	Molienda Seca
• Requiere menos potencia por tonelada tratada.	• Requiere más potencia por tonelada tratada.
• No requiere equipos adicionales para el tratamiento de polvos.	• Si requiere equipos adicionales para el tratamiento de polvos
• Consume más revestimiento (por corrosión).	• Consume menos revestimiento.

2.2.6. REVESTIMIENTO INTERNO DE UN MOLINO

El revestimiento de los cilindros de molino está sujeto a un alto nivel de abrasión en las duras condiciones de operación diaria. Se desarrollan una serie de mejoras propias, en particular para las fijaciones semi atornilladas, ya que une las mayores ventajas para todos los días de operación (Guerrero, y otros, 2 011):

- Alto grado de seguridad de la instalación,
- Una rápida sustitución de las placas,
- Breve período de parada de producción durante el cambio de placas

El revestimiento compuesto por placas, corazas, o líneas protectores del casco interior de molinos cilíndricos empleados para la molienda de minerales, por medio de

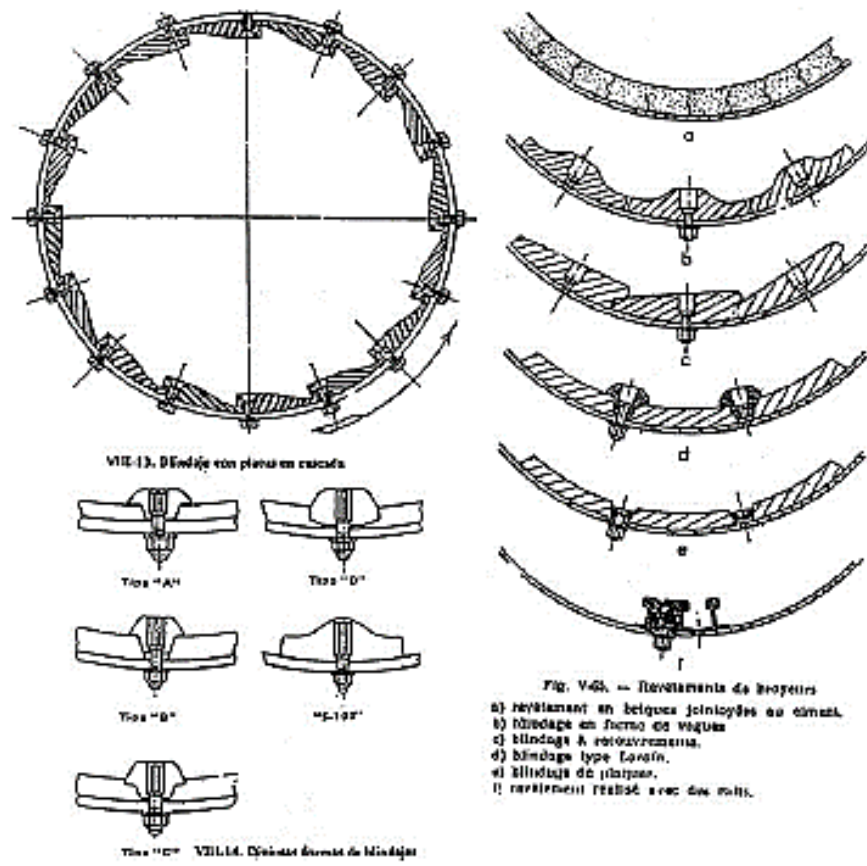
cuerpos molidores esféricos (bolas) u otros semejantes, caracterizado porque dichas placas están estriadas helicoidalmente en su sentido longitudinal y cuyo paso, tamaño, cantidad, profundidad, distribución y ubicación, se determina en función de las dimensiones del molino y tipo de molienda que se requiere, de manera que su superficie interior queda estructurada por caminos helicoidales múltiples, continuos y no interrumpidos, a todo el largo del cuerpo del molino (Marín, 2 013).

2.2.7. BLINDAJES Y REVESTIMIENTOS

Estos sistemas tienen una doble misión, proteger la carcasa, elemento resistente del molino, de las acciones de la molienda, golpes, desgastes, etc., y favorecer el movimiento de la carga dentro del molino.

En la figura que se adjunta se dan algunos modelos, identificando el tipo de anclaje, que a ser posible y como método de diseño, debe tener la sujeción embutida, escaqueado a la acción de molienda, para evitar el daño por el efecto de la molienda y facilitar así su reposición por desgaste. (Andrea, 2 014, p.35).

Figura 4. Blindajes



Fuente: Andrea Blanco. Molinos

Figura 5. Chaquetas de doble ondulaciones



Fuente: Propia

2.2.8. DIMENSIONAMIENTO DE MOLINOS

A partir de la llamada tercera ley de la conminución, Fred Bond desarrolló un procedimiento para estimar las dimensiones de varios equipos industriales, entre los que se incluye el "molino de bolas".

Este procedimiento si bien tiene un error de estimación cercana al $\pm 20\%$ continúa aun siendo utilizado en la actualidad debido a la gran simplicidad en sus cálculos [1].

A. Potencia necesaria para su funcionamiento

Para elegir las dimensiones de un molino que pueda realizar una determinada operación de fragmentación, hay que relacionar la potencia necesaria para la molienda obtenida a través de la fórmula de Bond, que considera ya las necesidades del equipo (molino) con las correcciones y aproximaciones necesarias y determinar por otra parte, en base al método de funcionamiento de un molino, (su forma de trabajo) cual son las dimensiones y potencias para mantener un equipo de esta características en funcionamiento.

Se han propuesto diversas fórmulas empíricas (del tipo y forma que se incluyen a continuación) para evaluar las necesidades y dimensiones, pero todas parten de un principio básico correspondiente al sistema dinámico del molino y luego ajustan el funcionamiento a la realidad de la molienda mediante las correcciones oportunas.

El funcionamiento de un molino, su efecto de rotación, produce un desplazamiento de la carga a una posición excéntrica. El mantenimiento de estas condiciones físicas, el par necesario, más la potencia necesaria para la moliendo propiamente, y los ajustes necesarios para accionar los acoplamientos, pérdidas e imponderables permiten un planteamiento teórico del tipo siguiente.

Las potencias calculadas por este procedimiento se consideran en el piñón de ataque al molino, a la que es preciso aumentar en las pérdidas en los reductores de velocidad, embragues y acoplamientos y multiplicar por un parámetro de seguridad que absorbe las irregularidades de la carga y del funcionamiento y que para los molinos se considera el valor de 1,3.

a) Potencia teórica necesaria para accionar un molino

El efecto de giro en el molino, produce un desplazamiento de la carga y de los elementos molturadores hasta alcanzar un equilibrio. El equilibrio se obtiene cuando se igualan las potencias resistentes con la potencia entregada por el motor. Las potencias resistentes las podemos encuadrar dentro de dos grupos, (conceptos):

- P1. La potencia necesaria para mantener en posición desequilibrada la carga más los elementos molturadores, incluyendo los desplazamientos internos entre las bolas y el mineral, los rozamientos y el propio efecto de trituración.
- P2. Las pérdidas del sistema, que son equivalentes a las producidas para mantener una masa equivalente a la suma del peso del molino más la carga de bolas y mineral, girando a la misma velocidad que el sistema. Es la potencia necesaria para mover un volante concéntrico del mismo peso que el molino y su carga.

Estas se corresponden con los rozamientos en el eje, las pérdidas de transmisión, los rendimientos de los reductores y el rendimiento del propio motor de accionamiento. Tiene un valor limitado, y multiplica el valor obtenido en el punto anterior P1. Suele ser del orden de magnitud de 1,1 - 1,05 el coeficiente multiplicador, se considera que las pérdidas por rendimientos y rozamientos tienen un valor entre el 5% y el 10% pero está determinado una vez que se evalúen las necesidades principales y se determine el molino y su tipo de accionamiento, los fabricantes de motores y de transmisiones facilitan esta información con precisión suficiente.

b) Potencia teórica necesaria para el accionamiento

La potencia, expresada en función de parámetros ligados al molino y la operación que realiza será, sustituyendo cada uno de los elementos de la expresión:

$$Pot = F \cdot d \cdot \omega;$$

Luego:

$$Pot(kW) = k_1 \cdot fV_c(1/raiz(D)) \cdot k_2 \cdot D \cdot sen(\alpha) \cdot k_3 \cdot D^2 \cdot L \cdot (fV_{mol}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m) \cdot g$$

Reordenando y simplificando:

$$Pot(kW) = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot g \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot (fV_c) \cdot D^{2,5} \cdot L \cdot (fV_{mol}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m)$$

Y que en su forma simplificada aplicando los valores anteriores, y expresando la densidad en t/m³ (kg/m³/1.000) se puede escribir:

$$Pot(kW) = \{k_1 \cdot k_2 \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot k_3 \cdot g\} \cdot [(fV_c) \cdot D^{2,5} \cdot L \cdot (fV_{mol}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m)]$$

$$Pot(kW) = 4,096 \cdot (fV_c) \cdot D^{2,5} \cdot L \cdot (fV_{mol}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m)$$

La expresión anterior, obtenida por métodos analíticos, es susceptible de ser aproximada a la realidad de la molienda mediante la aplicación de aquellos factores ligados al proceso de molienda, que son función de características geométricas o dinámicas del proceso, y que la práctica ha demostrado su ajuste a la realidad. Así se aplica la corrección por diámetro del molino, por similitud con el procedimiento utilizado al aplicar la fórmula de Bond, factor que corresponde a (2,44/D)^{0,2}. En este caso la fórmula queda como sigue:

$$Pot(kW) = \{k_1 \cdot k_2 \cdot \text{sen}(\alpha) \cdot k_3 \cdot g\} \cdot [(fV_c) \cdot D^{2,5} \cdot L \cdot (fV_{mol}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m)] \cdot (2,44/D)^{0,2}$$

$$Pot(kW) = 4,896 \cdot (fV_c) \cdot D^{2,3} \cdot L \cdot (fV_{mol}) \cdot (fV_b \cdot \rho_b + fV_m \cdot \rho_m);$$

Siendo las variables:

fV_c : Fracción, tanto por uno, de la velocidad de giro con relación a la velocidad crítica.

D: Diámetro interno del molino en m.

L: Longitud útil del molino en m.

fV_{mol} : Fracción del volumen del molino utilizado por la carga, tanto por uno.

fV_b : Fracción ocupada por las bolas dentro de la carga, tanto por uno.

ρ_b : Densidad del elemento molturador, bolas / barras, t/m^3 .

fV_m : Fracción ocupada por el mineral dentro de la carga, tanto por uno.

ρ_m : Densidad media del mineral a moler, t/m^3 .

Expresiones prácticas utilizadas en los equipos de molienda

Para los diferentes tipos de molino se han desarrollado formulaciones específicas sobre el principio obtenido anteriormente. A continuación, se dan algunas de las utilizadas para molinos de bolas y de barras, adaptadas a la realidad práctica de la molienda.

Ligeras variaciones en la fórmula, frente a la expresión teórica pura, son debidas a la utilización de densidades aparentes, o coeficientes relativos formulados de manera distinta, más algunos aspectos que contemplan realmente su utilización práctica.

Fórmulas de utilización práctica (semi empíricas):

– Fórmula analítica (teórica):

$$Pot(kW) = 4,896 \cdot (fVc) \cdot D^{2,3} \cdot L \cdot (fVmol) \cdot (fVb \cdot \rho_b + fVm \cdot \rho_m)$$

Molinos de barras:

$$Pot(kW) = 1,367 \cdot L \cdot D^{7/3} \cdot (6,3 - 5,5 \cdot fVbar) \cdot fVbar \cdot fVc \cdot \rho_{a,b} \cdot F$$

$fVbar$: Fracción, en tanto por uno, del volumen del molino que ocupan las barras en reposo. Equivale al producto de $fVmol \cdot fVb$.

$\rho_{a,b}$: Densidad aparente de las barras (7,85 kg/l-0,8 = 6,28 kg/l).

F: 1 (barras nuevas);

1,06 (barras usadas).

Molino de bolas:

$$Pot(kW) = L \cdot D^2 \cdot fVbol \cdot \rho_{a,b} \cdot \left(3 \cdot 832 \cdot D^{0,3} \cdot (3 \cdot 2 - 3 \cdot fVbol) \cdot fVc \cdot \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10fVc)}} \right) + S \right) \cdot F_1 \cdot F_2$$

Donde:

fVc: Fracción, tanto por uno, de la velocidad de giro con relación a la velocidad crítica.

D: Diámetro interno del molino en m.

L: Longitud útil del molino en m.

fV_{bol}: Fracción, en tanto por uno, del volumen del molino que ocupa las bolas. En una primera selección y para esferas nuevas se puede usar 0.4

ρ_{a.b}: Densidad aparente de las bolas (7.58 kg / 1.06 = 4.71, para forjado), (6.94kg / 1.06 = 4.17, para fundición.

S: coeficiente función del diámetro del molino y del tamaño de bolas

$S = 1$, para diámetro inferiores a 3.3 m

$S = 0.01704 (B-12.5D)$, B: Tamaño de bola en mm; D en m; para diámetros mayores de 3.3 m.

F₁: 1 (Molino en húmedo y de rebose)

1.16 (Trabajo en húmedo y con rejilla de bajo nivel).

1.08 (Trabajo en seco con rejilla total).

F₂: Coeficiente función del tipo de forros

1 Forros nuevos

1.06 Forros usados

B. Procedimiento para calcular el dimensionamiento del molino de bolas

A continuación, se presenta el procedimiento establecido por F. Bond para obtener las dimensiones del molino de bolas ideal. (Manzaneda. p 80-85)

1. Determinación del W_i del material a través de pruebas estándar de laboratorio.
2. El valor del W_i calculado es para un molino de bolas en condiciones estándar, es decir, considerando tipo descarga por rebalse, de 8 pies de diámetro interior, molienda en húmedo y en circuito cerrado. Este valor se conoce como Valor base de W_i .
3. En caso que estas condiciones no se cumplan, se deberán considerar los siguientes factores de corrección:

Factor f_1 ; molienda en seco

Factor f_2 ; molienda en circuito abierto

Factor f_3 ; factor eficiencia por diámetro del molino

Factor f_4 ; alimentación demasiado gruesa

Factor f_5 ; sobre molienda de finos, obteniéndose $P_{80} \leq$

75 μ m

Factor f_6 ; baja razón de reducción en el molino

Si el factor no tiene influencia entonces, el factor es igual a 1.

$$W_i(\text{corr}) = W_i(\text{base}) \cdot f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 f_6$$

Donde:

$W_i(\text{corr})$: *Work index corregido*

Facto f_1 ; Para el mismo rango de trabajo de molienda húmeda, F. Bond estimó que la molienda seca requiere 1,3 veces más potencia que la molienda húmeda. Es decir, $f_1 = 1,3$.

Factor f_2 ; En circuito abierto, la molienda húmeda requiere una cantidad extra de potencia si se le compara cuando se efectúa en circuito cerrado. El valor del factor depende del producto de molienda producido y su valor se entrega en la siguiente tabla:

Tamaño de Control del Producto (Referencia a % pasante)	Factor f_3
50	1,035
60	1,050
70	1,100
80	1,200
90	1,400
92	1,460
95	1,570
98	1,700

Factor f_3 ; El diámetro interno del molino afecta la eficiencia de molienda. Para condiciones no estándar, es decir, $D \neq 8$ pies, el factor f , está dado por:

$$f_3 = \left(\frac{8}{D}\right)^{0.2}$$

Donde:

D: diámetro interno del molino en pies, medido entre revestimientos.

En operación de Planta, cuando $D > 12,5$ pies, la eficiencia llega a un máximo manteniéndose en un valor constante y $f_3 = 0,914$.

Como D es un parámetro desconocido al comienzo, F. Bond sugiere. Considerar $f_3 = 1$, durante la primera iteración cuando $D \neq 8$ pies y luego re calcular dicho valor más adelante.

Factor f_4 ; Este factor se utiliza cuando el material con que se alimenta el molino es más grueso que un cierto valor óptimo. Este factor se relaciona directamente con el Work index, según la siguiente ecuación:

$$f_4 = \frac{R_r + (W_i - 7) * \frac{(F_{80} - F_o)}{F_o}}{R_r}$$

Donde:

R_r : razón de reducción del 80 % = F_{80}/P_{80}

F_{80} : tamaño 80 % de alimentación (μm)

P_{80} : tamaño 80 % del producto (μm)

W_i : Work index del material (KWh/ton. corta)

F_o : tamaño optima de alimentación (pm)

Siendo:

$$F_o = 4000 \cdot \sqrt{13/W_i}$$

Factor f_5 : Cuando hay una sobre molienda de finos, es decir, el tamaño 80% pasante del producto es menor que 75 micrones (200 mallas) se aplica el factor f_5 de acuerdo a la siguiente ecuación:

$$f_5 = \frac{P_{80} + 10.3}{1.145 \cdot P_{80}}$$

Factor f_6 : Cuando la razón de reducción del molino es

baja, es decir menor a 6, se aplica el factor f_6 , como ocurre en el proceso de remolienda de concentrados y relaves de circuitos industriales.

$$f_6 = \frac{20(R_r - 1.35) + 2.60}{20(R_r - 1.35)}$$

El Work Index corregido está dado por la siguiente

$$W_i(\text{corr}) = W_i(\text{base}) \cdot f_1 f_2 f_3 f_4 f_5 f_6$$

El consumo de energía específica en la molienda industrial, para ir desde un tamaño 80% pasante F_{80} hasta un tamaño 80% pasante P_{80} está dado por:

$$W = W_i(\text{corr}) \cdot 10 \left(\frac{1}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{1}{\sqrt{F_{80}}} \right)$$

Donde

W: Consumo de energía (KW-h) necesario para reducir una tonelada corta de material, desde un tamaño 80% pasante F_{80} (μm) hasta 80% pasante P_{80} (μm).

W_i , P_{80} y F_{80} corresponden al Work index (KW-h/ton corta), a los tamaños 80% pasante del producto final y alimentación fresca del circuito industrial de molienda (μm).

La potencia mecánica requerida para la molienda del material está dada por:

$$P_M(KW) = W(Kw - h/ton \text{ cortas}) \cdot C(\text{ton cortas}/h)$$

O bien:

$$P_M(HP) = 1.341 \cdot P_M(KW)$$

Donde

C: Capacidad deseada del circuito para la conminución del material de molienda /clasificación (TPH de sólidos procesados), expresado en ton corta/h.

La potencia mecánica calculada de esta forma es la potencia requerida en el eje piñón del molino, la cual incluye perdidas por eficiencia en rodamientos, engranajes y piñón, pero No incluye las pérdidas de eficiencia en el motor y otros componentes accesorios, tales como reductores de velocidad, perdidas de transmisión, etc.

La potencia eléctrica requerida en la entrada del motor, suponiendo una eficiencia en η % (normalmente $\eta = 95\%$) está dado por:

$$P_E(HP) = P_M(HP) \cdot \left(\frac{100}{\eta}\right)$$

Donde:

$P_E(\text{Hp})$: Potencia eléctrica requerida en la entrada del motor, medido en Hp.

PM (Hp): potencia mecánica requerida para la conminución del material medido en Hp.

A partir de la siguiente ecuación para calcular el consumo de potencia eléctrica en molino de bolas y utilizada por algunas empresas de ingeniería.

$$P_E(\text{HP}) = K_M \cdot (D)^{3.5} \cdot (\%V_p)^{0.461} \cdot (\%C_S)^{1.305} \cdot (L/D)$$

Se determina el valor de D, una vez especificado los valores de P_E : (HP), K_B , $\%V_p$, $\%C_S$ y la razón L/D.

$$D = \left[\frac{P_E(\text{HP})}{K_B \cdot (\%V_p)^{0.461} \cdot (\%C_S)^{1.505} \cdot (L/D)} \right]^{1/3.3}$$

Donde:

P_E (HP): Potencia eléctrica requerida a la entrada del motor (Hp)

D: Diámetro interno del molino (pies). Se aconseja D= 20 pies.

$\%V_p$: % del volumen interno del molino cargado con bolas (volumen aparente de la carga de bolas), expresado como porcentaje. Se aconseja utilizar un

valor de %Vp entre 40 y 50%.

%Cs: % de velocidad crítica del molino, expresado como porcentaje. Se aconseja utilizar un valor entre 68 y 78% de la velocidad crítica.

L: Longitud interna del molino (pies). Para la mayoría de los casos prácticos, se puede variar la razón L/D entre 1 y 3.

K_B: Constante de proporcionalidad, cuyo valor depende del tipo de molino seleccionado, de acuerdo a la siguiente tabla.

Tipo de molino de bolas	Valor de K _B
- Descarga por rebalse, molienda húmeda	4,365 x 10 ⁻⁵
- Descarga por Diafragma (parrilla), molienda húmeda	4,912 x 10 ⁻⁵
- Descarga por Diafragma, molienda seca	5,456 x 10 ⁻⁵

La ecuación anterior implica hacer una primera estimación de D, la cual se reemplaza en la fórmula (L/D) y se vuelve a calcular interactivamente hasta que el algoritmo de cálculo converja.

Las veces que deberá repetirse este cálculo, hasta obtener una variación máxima relativa de 1 % para valores de D calculado entre interacciones sucesivas. Iteraciones sucesivas.

2.3. DEFINICIÓN DE TÉRMINOS

Tonelaje. - Es una medida del tamaño o la capacidad de carga de tratamiento.

Molienda. - Manera de reducir el mineral en partículas muy pequeñas por medio de presión o impacto. Se usan distintos tipos de molidoras en las plantas de procesamiento para obtener la dimensión deseada.

El rediseño. - Volver a diseñar algo o modificar un diseño previo, abarca diferentes tipos de cambios en la disposición de los elementos que lo componen. A través del rediseño se puede modificar el color de fondo, la tipografía de los textos y la forma en la que se exhiben las imágenes.

Conversión. - Tras comprobar el estado del intérprete de datos de fabricación (BDI) de una configuración alternativa para una pieza de equipo, puede convertir la pieza de equipo a la nueva configuración. La conversión en una nueva configuración puede causar la creación o eliminación de eventos o puestos de mantenimiento.

Concentradora. - Las instalaciones en las que se procesa el mineral para separar los minerales de la roca madre.

Chaqueta. - Son los forros de acero que protegen a la carcasa de un molino

2.4. HIPÓTESIS

2.4.1. Hipótesis General

Con la conversión del molino de barras Marcy 6.5' x 14' a molino de bolas se incrementará el tonelaje de tratamiento, manteniendo los resultados metalúrgicos.

2.4.2. Hipótesis Especifico

- Determinando las condiciones actuales de operación del circuito de molienda se sabrá cómo están trabajando.
- Con el rediseño del molino de barras Marcy 6.5'x14' a molino de bolas se incrementará el tonelaje de tratamiento a 2650 TM.
- Manteniendo la granulometría por encima 60% (75 μ) se obtendrá la granulometría liberada comercial.

2.5. IDENTIFICACIÓN DE VARIABLES

2.5.1. Variable independiente:

- Conversión del molino Marcy 6.5' X 14' a molino de bolas

2.5.2. Variable dependiente:

- Incremento del tonelaje manteniendo los resultados metalúrgicos de la Cía minera Huaron

2.5.3. Variable interviniente

- Ley de Mineral
- % de finos del mineral
- Condiciones de chaqueta
- Impurezas
- Gangas

CAPITULO III

METODOLOGÍA

3.1. Tipo de investigación

El tipo de investigación es experimental y de acuerdo al nivel de investigación es explicativo, mediante este diseño, se determinó, la conversión del molino de Barras Marcy (6,5' x 14') a molino de bolas, y su influencia en el incremento de tonelaje de tratamiento manteniendo los resultados metalúrgicos actuales.

3.2. Diseño de Investigación

El diseño de investigación es experimental , debido a que se realiza directamente en operación del circuito de molienda clasificación.

Grafica 3.1 Diseño de la planificación del estudio



Fuente: Elaboración propia

3.3. Población y Muestra

Población

La población está constituida por el tonelaje/día de mineral que ingresa al circuito de molienda-clasificación para su fracturamiento de la planta concentradora de 2300 TMPD.

Tonelaje de tratamiento= 95,8 Tn/Hr

Muestra

La muestra lo constituye la cantidad de mineral muestreado a evaluar a cada equipo de molienda y clasificación, realizándose en la primera guardia de 12 horas.

$$n = \frac{Z^2 \cdot p \cdot q \cdot N}{E^2(N - 1) + Z^2 \cdot p \cdot q}$$

Donde:

Z=1,96

p= 0,05

q= 0,95

E = 0,05

N=95,8 Tm

Muestra= 73,72 K

3.4. Metodología de Investigación

Se aplicó el método científico, siendo esto de naturaleza inductiva y deductiva, siendo este método la lógica más confiable de producir conocimiento.

Para obtener resultados confiables extraídos de la realidad, se tomó muestras de los puntos establecidos en cada equipo, teniendo los respectivos cuidados de no contaminar las muestras, puesto que, lo que se pretende es estudiar el incremento de tonelaje mediante la conversión del molino Marcy 6,5 x 14 a molino de bolas manteniendo los resultados metalúrgicos.

3.5. Técnicas e instrumentos de recolección de datos

Análisis documental. Se realizó el análisis de datos de fuentes primarias.

Análisis Granulométrico. Mediante estas técnicas se analizó el grado de liberación de la molienda aplicando el radio de reducción.

Observación participativa. Mediante esta técnica se tomó apuntes de datos de los análisis granulométricos de los diferentes equipos involucrados en el circuito de molienda-clasificación.

Entrevista estructurada. Se realizó a los profesionales que laboran en la empresa y operadores con una amplia experiencia en operaciones de plantas de concentración.

Muestreador. Se utilizó en la toma de muestras en los puntos establecidos

Mallas Tyler. Se utilizó para el análisis granulométrico de las muestras de mineral tomado en los puntos muestreados.

Toma de muestra. Se realizó en los puntos establecidos del circuito de molienda clasificación, mediante un muestreador apropiado.

Libreta de apuntes. Se utilizó en la toma de apuntes de datos, cálculos y bosquejos utilizados para la orientación en planta.

3.6. Técnica de procesamiento y análisis de datos

Se realizó cálculos de la media, varianza y cálculo del estadístico t-estudent. El % acumulado negativo, F_{80} , P_{80} , Corto circuito, eficiencia de clasificación aplicando el software Excel.

3.7. Tratamiento estadístico de Datos

El tratamiento de datos se realizara aplicando el software del MINITAB, aplicando al análisis por comparación del $t_{calculado}$ VS t_{tablas} a partir del tonelaje de tratamiento del circuito de molienda - clasificación.

CAPITULO IV

RESULTADOS Y DISCUSIÓN

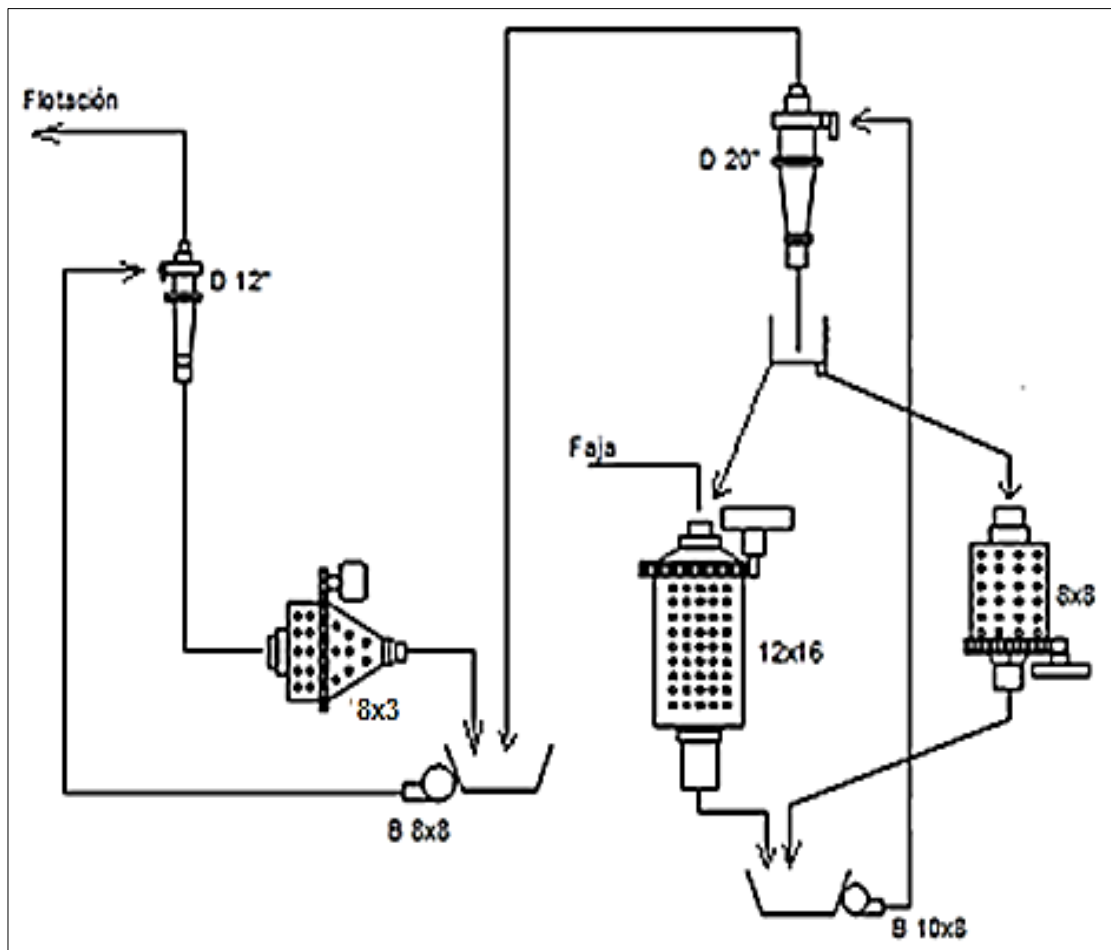
La planta concentradora de Huarón viene trabajando con 3 molinos como son: molino Hardinge de 8' x 3', molino de bolas de 12' x16' y un molino de bolas de 8' x 8', siendo su tonelaje de tratamiento de 2300 TMD como se puede ver en el grafico 4.1.

El molino de 12' x 16' DOMINION trabaja como molino primario y el molino COMESA de 8' x 8' trabaja como molino secundario y el molino Hardinge de 8' x 3' trabaja como remolienda con la descarga del overflow de los ciclones D20, que posteriormente se genera la carga circulante con un hidrociclón D12.

El overflow compuesto por partículas finas va directamente al acondicionador, una vez acondicionado la pulpa con los reactivos como: espumante, colectores, aerofloats etc., pasan este flujo al circuito de flotación y su posterior recuperación del concentrado de Pb y seguidamente el Concentrado de Zn.

A continuación, presentamos el diagrama de flujo del circuito actual de molienda-clasificación de 2,300 TMD, de la planta concentradora que está en operación.

Gráfico 4.1. Circuito de molienda de 2,300 TMDP



Fuente: Elaboración propia (2017)

4.1. PRESENTACION DE RESULTADOS

Las condiciones actuales de molienda son:

4.1.1. MOLINO DOMINION

- a) Se tomaron especificaciones técnicas del molino y del motor que se presenta en la tabla.

Tabla 4.1. Datos técnicos del molino DOMINION

	MOLINO PRIMARIO
Marca	DOMINION
Tamaño	12'x16'
Tipo de descarga	Libre
Sentido de rotación	Horario
Velocidad critica RPM	22,12
Velocidad actual	14,80
%Velocidad critica	66,94%
Velocidad periférica	833,9
Revestimiento	Fierro
Tamaño molturante	3,5" y 4"
Motor	
Marca	Siemens
Hp	1,440
Voltaje	5,500
Potencia kw	1,073
Amperaje nominal	134
Amperaje de operación	111
FP	0,84

Fuente: Planta concentradora

b) El análisis granulométrico del molino utilizando la serie Tyler es como sigue:

Tabla 4.2 Análisis granulométrico del molino primario Dominion 12'x16'

Malla	Micrones	Alimento			Descarga			Calculo 80%	
		PESO (gr)	% peso	Acum (-)	PESO (gr)	% peso	Acum (-)	F(80%)	P(80%)
1 1/4"	31750	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
1"	25400	374,8	18,74	81,26	0,00	0,00	100,00	25072,64	0,00
3/4"	19050	476,0	23,80	57,46	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
1/2"	12700	317,8	15,89	41,57	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
3/8"	9525	66,6	3,33	38,24	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
1/4"	6350	127,4	6,37	31,87	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
4	4760	58,8	2,94	28,93	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
6	3360	50,8	2,54	26,39	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
8	2809	47,0	2,35	24,04	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
10	2000	16,6	0,83	23,21	14,20	2,84	97,16	0,00	0,00
25	707	95,2	4,76	18,45	37,60	7,52	89,64	0,00	0,00
35	500	24,8	1,24	17,21	24,80	4,96	84,68	0,00	413,61
50	297	38,6	1,93	15,28	61,20	12,24	72,44	0,00	0,00
70	250	23,0	1,15	14,13	50,20	10,04	62,40	0,00	0,00
100	150	23,2	1,16	12,97	52,20	10,44	51,96	0,00	0,00
140	105	24,0	1,20	11,77	54,40	10,88	41,08	0,00	0,00
200	75	23,6	1,18	10,59	47,20	9,44	31,64	0,00	0,00
270	53	20,6	1,03	9,56	27,60	5,52	26,12	0,00	0,00
400	38	18,6	0,93	8,63	19,80	3,96	22,16	0,00	0,00
-400		172,6	8,63	0,00	110,80	22,16	0,00	0,00	0,00
TOTAL		2000,0	100,00		500,00	100,00		25072,64	413,61

Malla -200=

10,59

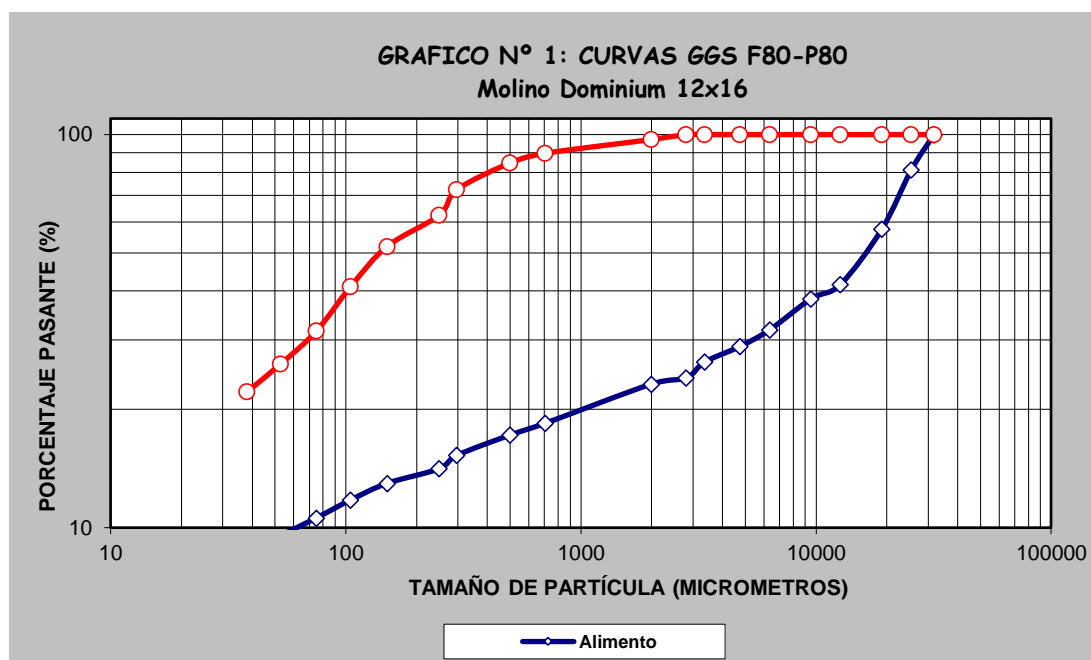
31,64

Ratio= 60,62

Fuente: Elaboración propia

A continuación presentamos el gráfico del molino primario Dominion de 12'x16'.

Gráfico 4.1. Curvas GGS F₈₀-P₈₀



Fuente: Elaboración propia

4.1.2. DATOS TECNICOS DEL MOLINO SECUNDARIO COMESA

Tabla 4.3 Datos técnicos del molino COMESA

MOLINO PRIMARIO	
Marca	COMESA
Tamaño	8'x8'
Tipo de descarga	Libre
Sentido de rotación	Horario
Velocidad crítica RPM	27,08
Velocidad actual	20,88
%Velocidad crítica	77,10
Revestimiento	Fierro
Tamaño molturante	2,5" y 2"
Motor	
Marca	Siemens
Hp	400
Voltaje	440
Potencia kw	298,28
Amperaje nominal	470
Amperaje de operación	369
FP	0,83

Fuente: Planta concentradora

En la tabla siguiente presentamos el análisis granulométrico realizado utilizando también la serie Tyler.

Tabla 4.4 Análisis granulométrico del molino secundario COMESA 8'x8'

Malla	Micrones	Alimento			Descarga			Calculo 80%	
		PESO (gr)	% peso	Acum (-)	PESO (gr)	% peso	Acum (-)	F(80%)	P(80%)
1 1/4"	31750	0,0	0,00	100,0	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
1"	25400	0,0	0,00	100,0	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
3/4"	19050	0,0	0,00	100,0	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
1/2"	12700	0,0	0,00	100,0	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
3/8"	9525	0,0	0,00	100,0	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
1/4"	6350	0,0	0,00	100,0	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
4	4760	2,6	0,52	99,5	11,6	2,32	97,68	0,00	0,00
6	3360	2,6	0,52	99,0	1,0	0,20	97,48	0,00	0,00
8	2809	5,2	1,04	97,9	1,2	0,24	97,24	0,00	0,00
10	2000	2,8	0,56	97,4	0,4	0,08	97,16	0,00	0,00
25	707	41,6	8,32	89,0	14,0	2,80	94,36	0,00	0,00
35	500	31,4	6,28	82,8	17,8	3,56	90,80	462,16	326,27
50	297	83,2	16,64	66,1	65,0	13,00	77,80	0,00	0,00
70	250	66,4	13,28	52,8	63,2	12,64	65,16	0,00	0,00
100	150	70,2	14,04	38,8	71,6	14,32	50,84	0,00	0,00
140	105	74,0	14,80	24,0	77,6	15,52	35,32	0,00	0,00
200	75	55,8	11,16	12,8	63,6	12,72	22,60	0,00	0,00
270	53	21,6	4,32	8,5	29,8	5,96	16,64	0,00	0,00
400	38	10,4	2,08	6,4	16,8	3,36	13,28	0,00	0,00
-400		32,2	6,44	0,0	66,4	13,28	0,00	0,00	0,00
TOTAL		500,0	100,00		500,0	100,00		462,16	326,27

Malla -200=

12,84

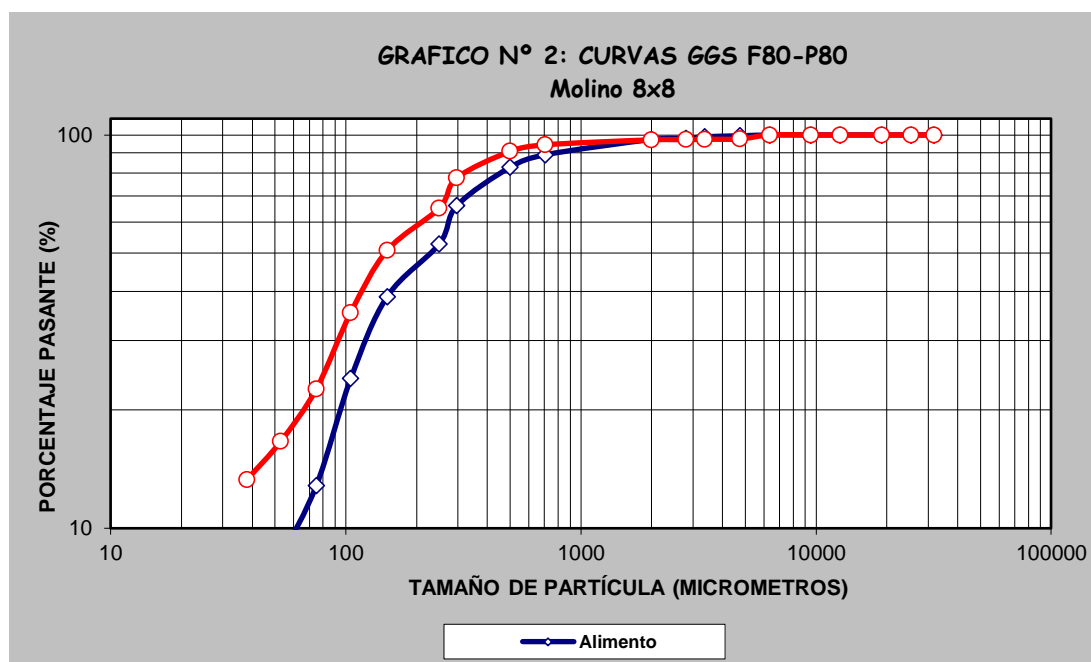
22,60

Ratio= 1,416

Fuente: Elaboración propia

De la gráfica de GGS obtenemos los valores del alimento y del producto como lo podemos ver en el gráfico 4.2.

Gráfico 4.2. Curvas de GGS F₈₀-P₈₀



Fuente: Elaboración propia

4.1.3. DATOS TÉCNICOS DEL MOLINO HARDINGE

Tabla 4.5 Datos del molino Hardinge

REMOLIENDA	
Marca	HARDINGE
Tamaño	8'x3'
Tipo de descarga	Libre
Sentido de rotación	Horario
Velocidad crítica RPM	27,08
Velocidad actual	20,58
%Velocidad crítica	76,10
Revestimiento	Fierro
Tamaño molturante	2"
Motor	
Marca	Siemens
Hp	130
Voltaje	550
Potencia kw	410,1
Amperaje nominal	172
Amperaje de operación	145
FP	0,82

Fuente: Planta concentradora

A continuación, presentamos los análisis granulométricos realizados utilizando la serie Tyler.

Tabla 4.6 Análisis granulométrico del molino Hardinge 8'x3'

Malla	Micrones	Alimento			Descarga			Calculo 80%	
		PESO (gr)	% peso	Acum (-)	PESO (gr)	% peso	Acum (-)	F(80%)	P(80%)
1 1/4"	31750	0,0	0,00	100,0	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
1"	25400	0,0	0,00	100,0	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
3/4"	19050	0,0	0,00	100,0	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
1/2"	12700	0,0	0,00	100,0	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
3/8"	9525	4,0	0,80	99,2	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
1/4"	6350	4,6	0,92	98,3	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
4	4760	5,4	1,08	97,2	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
6	3360	4,6	0,92	96,3	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
8	2809	6,8	1,36	94,9	0,0	0,00	100,00	0,00	0,00
10	2000	3,4	0,68	94,2	2,6	0,52	99,48	0,00	0,00
25	707	48,8	9,76	84,5	12,0	2,40	97,08	562,21	0,00
35	500	33,4	6,68	77,8	14,6	2,92	94,16	0,00	0,00
50	297	79,0	15,80	62,0	55,6	11,12	83,04	0,00	285,06
70	250	67,0	13,40	48,6	60,2	12,04	71,00	0,00	0,00
100	150	65,0	13,00	35,6	71,6	14,32	56,68	0,00	0,00
140	105	66,8	13,36	22,2	79,2	15,84	40,84	0,00	0,00
200	75	55,8	11,16	11,1	66,4	13,28	27,56	0,00	0,00
270	53	19,6	3,92	7,2	33,0	6,60	20,96	0,00	0,00
400	38	9,0	1,80	5,4	20,0	4,00	16,96	0,00	0,00
-400		26,8	5,36	0,0	84,8	16,96	0,00	0,00	0,00
TOTAL		500,0	100,00		500,0	100,00		562,21	285,06

Malla -200=

12,84

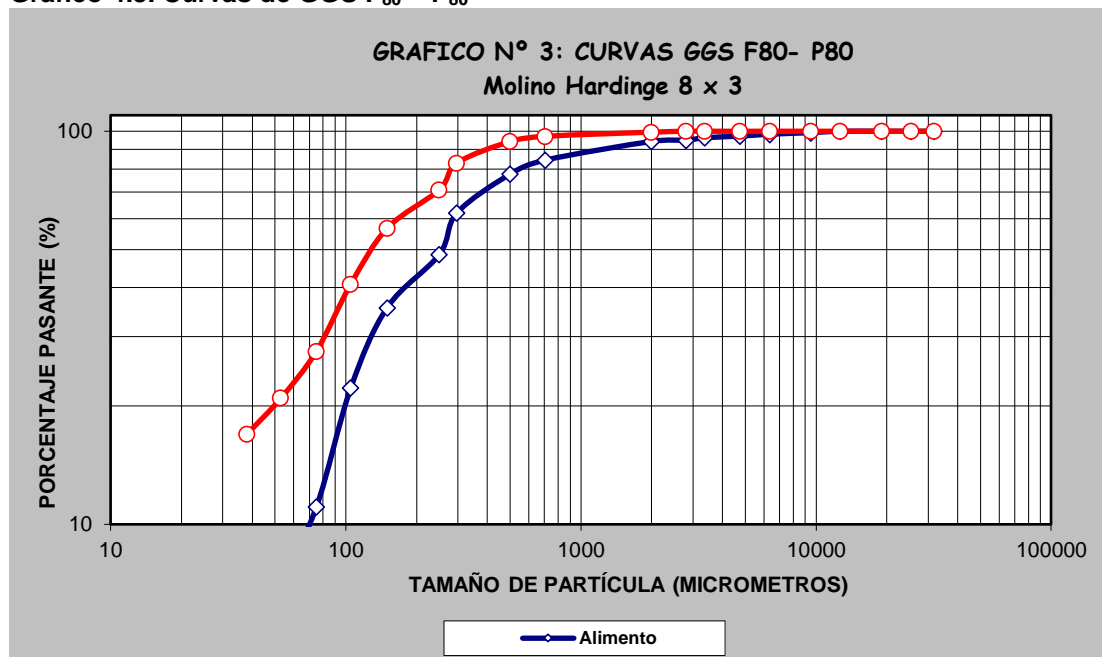
22,60

Ratio= 1,972

Fuente: Elaboración propia

Realizado el análisis granulométrico se procedió a graficar las curvas de GGS en el paquete Excel, para calcular el F₈₀ y P₈₀ que a continuación lo podemos ver en el gráfico 4.3.

Gráfico 4.3. Curvas de GGS F₈₀ – P₈₀



Fuente: Elaboración propia

4.1.4. EVALUACIÓN DE LA CLASIFICACIÓN DEL HIDROCICLON D-20

Datos técnicos:

2 Hidrociclones KREBS	: D-20
Ápex	: 2 3/4"
Vortex	: 5"
2 Bombas DENVER	: 10"x8"
D ₅₀	: 60 μ
F(d ₅₀)	: 26,48
U(d ₅₀)	: 9,64
O(d ₅₀)	: 56,10

Tabla 4.7 Análisis Granulométrico de la clasificación del Hidrociclón

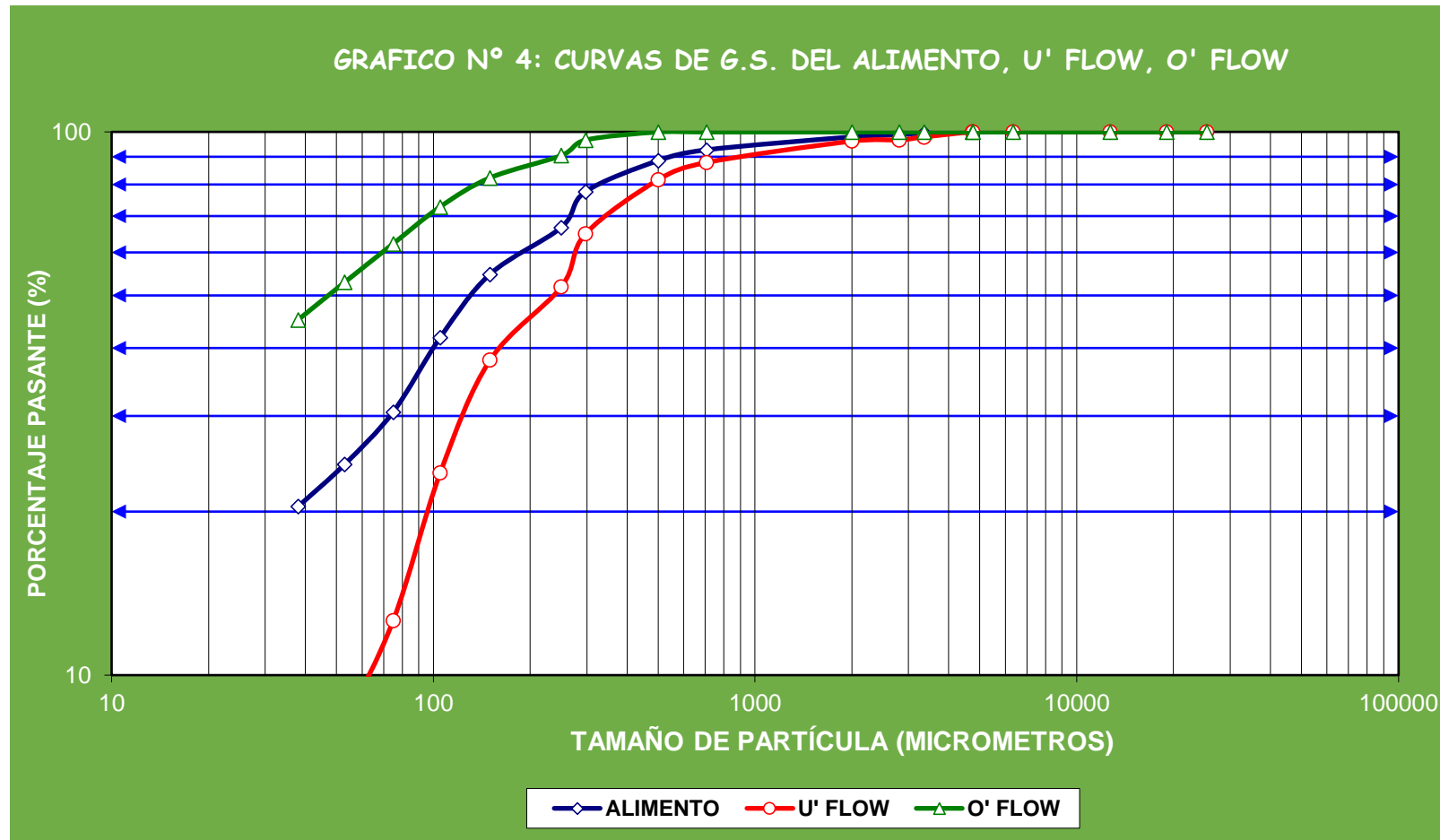
Malla	Abert.	ALIMENTO		UNDERFLOW		OVERFLOW		D/F	DATOS PARA EFICIENCIA			EFICIENCIA %			
		% Peso	Acum (-)	% Peso	Acum (-)	% Peso	Acum (-)		F _{R(x)} R/F	F _{D(x)} D/F	F _{F(x)} CAL	E _{R(x)}	E _{D(x)}	P	E _{D(x)c}
6	3360	0,48	99,52	2,08	97,92	0,00	100	0,231	0,00	1,16	1,16	0,00	100,00		100,00
8	2809	0,60	98,92	1,20	96,72	0,00	100	0,329	0,00	0,67	0,67	0,00	100,00		100,00
10	2000	0,96	97,96	0,52	96,20	0,00	100	0,537	0,00	0,29	0,29	0,00	100,00		100,00
25	707	5,24	92,72	8,32	87,88	0,00	100	0,601	0,00	4,65	4,65	0,00	100,00		100,00
35	500	4,12	88,60	6,20	81,68	0,00	100	0,622	0,00	3,46	3,46	0,00	100,00		100,00
50	297	10,96	77,64	16,76	64,92	3,36	96,64	0,599	1,49	9,36	10,84	13,70	86,30		83,53
70	250	10,88	66,76	13,04	51,88	6,12	90,52	0,615	2,71	7,28	9,99	27,09	72,91	0,16853	67,42
100	150	12,04	54,72	13,88	38,00	8,16	82,36	0,623	3,61	7,75	11,36	31,76	68,24		61,80
140	105	12,88	41,84	14,44	23,56	9,52	72,84	0,629	4,21	8,06	12,27	34,29	65,71		58,75
200	75	11,32	30,52	10,96	12,60	10,56	62,28	0,639	4,67	6,12	10,79	43,27	56,73		47,96
270	53	6,08	24,44	4,32	8,28	9,40	52,88	0,638	4,15	2,41	6,57	63,27	36,73		23,90
400	38	4,00	20,44	1,92	6,36	7,76	45,12	0,637	3,43	1,07	4,50	76,19	23,81		8,37
-400	0	20,44	0,00	6,36	0,00	45,12	0,00								
TOTAL		100,00		100,00		100,00		0,558							
malla -200		30,5		12,6		62,28									

R/F 0,442

BALANCE DE FLUJO Y MASA									
	TMSPH	FLUJO					CAUDAL (m3Hr)		
			%sp	%sv	G.E.	D.P.	PULPA	SOLIDOS	AGUA
Feed	258.17	73.97	52.34	24.3	3.49	1.60	309.10	73.97	235.12
O' Flow	96.41	31.61	35.12	15.1	3.05	1.31	209.74	31.61	178.13
U' Flow	151.76	43.85	78.43	47.4	3.69	2.34	88.34	43.85	44.49

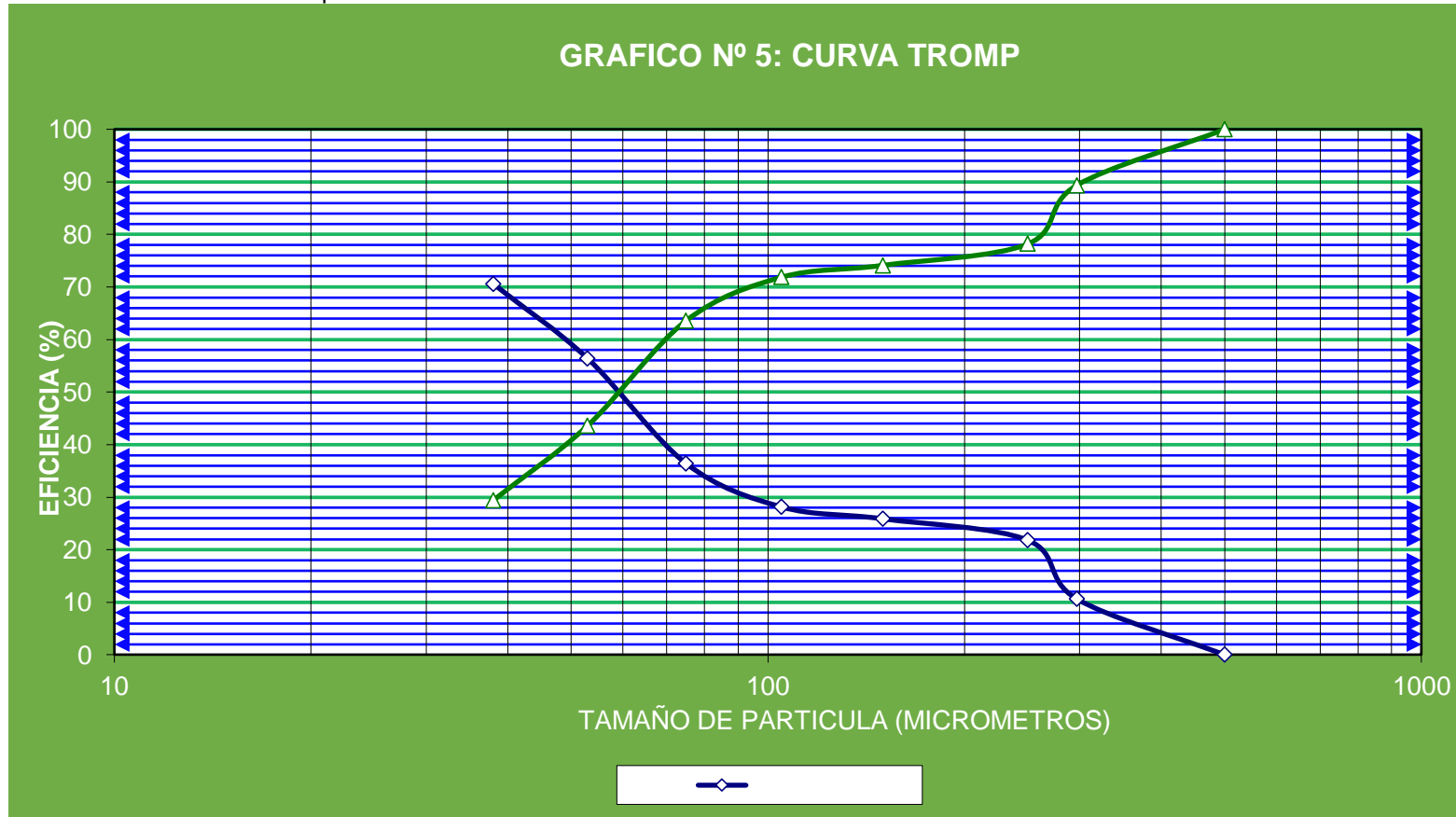
LEYENDA
 %sp PORCENTAJE DE SOLIDOS EN PESO
 %sv PORCENTAJE DE SOLIDOS EN VOLUMEN
 G.E. GRAVEDAD ESPECÍFICA
 D.P. DENSIDAD DE PULPA

Gráfico 4.5. Curvas de GGS Alimento, Arenas y Rebose



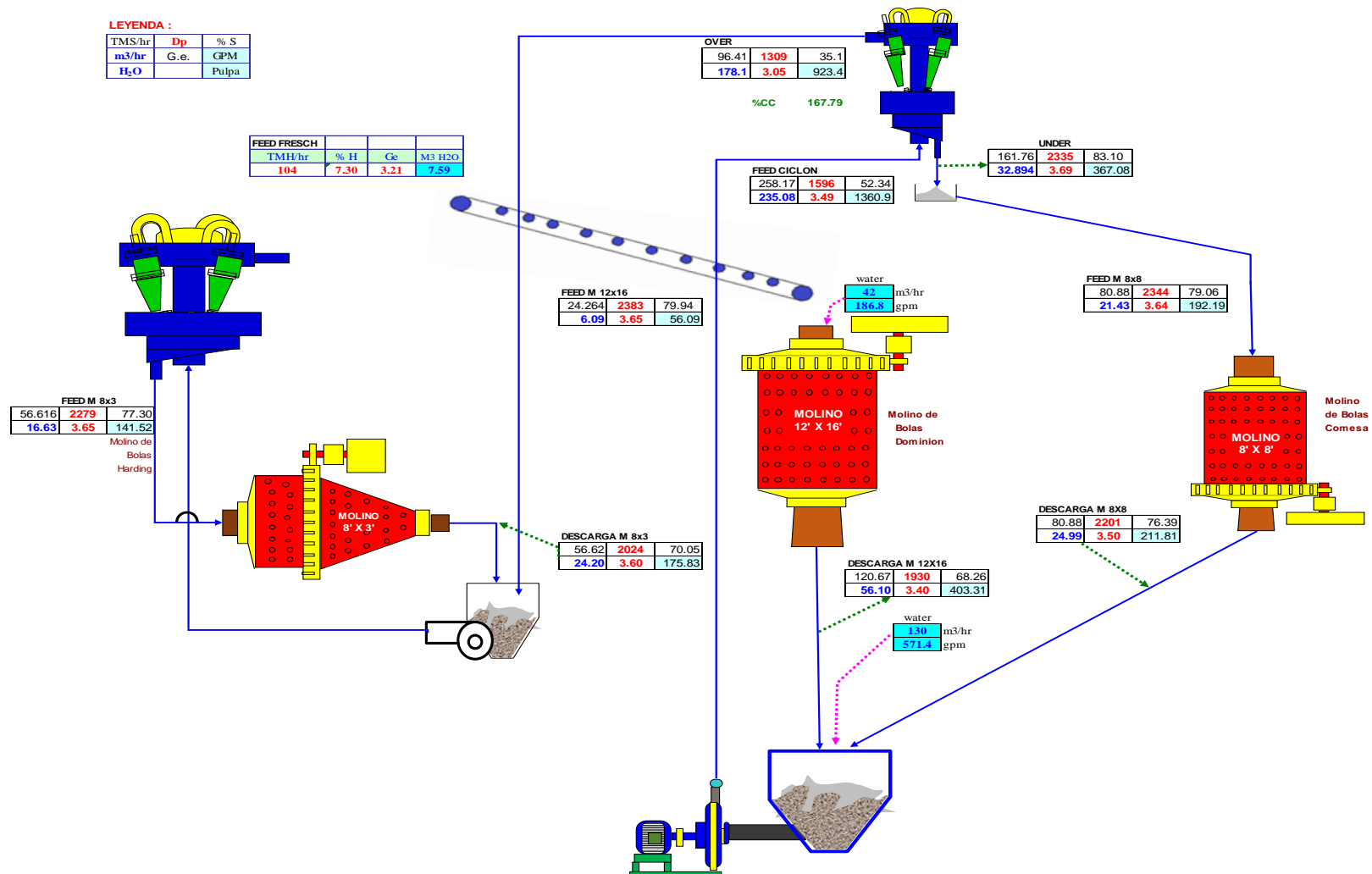
Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.5. Curvas de Tromp



Fuente: Elaboración propia

Gráfico 4.5. Balance de Materia del Circuito de Molienda – Clasificación de la Cía. Minera Huarón



4.2. PRESENTACIÓN DE LOS CÁLCULOS DEL REDISEÑO DEL MOLINO DE BARRAS MARCY 6.5'x14' A MOLINO DE BOLAS

a) Calculo de la Potencia Teórica para accionar el Molino

Fórmula para molino de bolas:

$$Pot(kW) = L \cdot D^2 \cdot fVbol \cdot \rho_{a.b} \cdot \left(3,832 \cdot D^{0,3} \cdot (3,2 - 3 \cdot fVbol) \cdot fVc \cdot \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10 \cdot fVc)}} \right) + S \right) \cdot F_1 \cdot F_2$$

Datos:

$$L = 14 \text{ pies} = 4,2672 \text{ m}$$

$$D = 6,5 \text{ pies} = 1,9812 \text{ m}$$

$$fVbol = 0,4$$

$$\rho_{a.b} = 4,17$$

$$fVc = 0,70$$

$$F_1 = 1,16$$

$$F_2 = 1,06$$

Remplazando tenemos:

$$Pot(kW) = 4,2672 \times 1,9812^2 \times 0,4 \times 4,17 \times \left(3,832 \times 1,9812^{0,3} \times (3,2 - 3(0,4) \times 0,40) \times 0,70 \times \left(1 - \frac{0,1}{2^{(9-10 \times 0,70)}} \right) + 1 \right) \times 1,16 \times 1,06$$

$$Pot(kW) = 424,129 \text{ kW}$$

$$Pot(Hp) = 568,75 \text{ Hp}$$

b) Cálculo de la potencia del molino

$$W_i = 16,51 \text{ kw-hr/Tc}$$

$$F_{80} = 337,05 \text{ micras}$$

$$P_{80} = 292,10 \text{ micras}$$

$$\text{Tonelaje} = 10416,93 \text{ TCD}$$

Aplicación de factores de eficiencia:

$$F_1 = 1 \text{ (molienda húmeda)}$$

$$F_2 = 1 \text{ (Circuito cerrado)}$$

$$F_3 = 1,04$$

$$F_4 = \text{No aplica (} F_{80} < F_o \text{)}$$

$$F_5 = \text{No aplica (} P_{80} > 74\mu \text{)}$$

$$F_6 = \text{No aplica (} R_r \neq R_o \pm 2 \text{)}$$

$$F_7 = \text{No Aplica (Solo para remolienda de concentrados y colas)}$$

Potencia consumida será:

$$W = 0,5253 \text{ kw-h/TC}$$

$$H_p = W \times F_1 \times F_2 \times F_3 \times 1,102 \times 1,341 \times \text{Ton}$$

$$H_p = 0,5253 \frac{\text{Kw} - h}{\text{Tc}} \times 1 \times 1 \times 1 \times 1.102 \frac{\text{Tc}}{1 \text{ Tm}} \times 1,341 \frac{\text{Hp}}{\text{Kw}} \times 393,76 \text{ Tm}$$

$$H_p = 305.66$$

Por eficiencia del diámetro 1,06

$$H_p = 305,66 \times 1,06 = 323,99$$

c) Calculo del de la carga inicial de bolas

$$W = 80 \times D^2 \times L$$

$$W = 80 \times 6,5^2 \times 14 = 47,320 \text{ lb} \approx 21,460 \text{ kg}$$

d) Calculo del peso de cada bola: ($\rho_{\text{acero}} = 0.2818 \text{ lb/pulg}^3$)

$$\text{Peso de cada Bola } 2'' = 0,2818 \frac{\text{lb}}{\text{pulg}^3} \times \frac{1}{6} \times 3,1416 \times (2)^3 = 1,1804 \text{ lbs}$$

$$\text{Peso de cada bola} = 1,1804 \text{ lb} = 0,536 \text{ kg.}$$

e) Calculo del diámetro máximo de bolas para una carga inicial

$$B = \left(\frac{F_{80}}{K} \right)^{\frac{1}{2}} \cdot \left(\frac{P_e \times W_1}{\%V_c \times \sqrt{D}} \right)^{\frac{1}{3}}$$

Donde:

D: 6,5 pies

K: 350

Wi: 16, 51 kW-h/Tc

Pe = 3, 2

%Vc: 70%

$$B = \sqrt{\frac{9525}{350}} \times \left(\frac{3,2 \times 16,51}{70 \times \sqrt{6,5}} \right) = 1,544 \approx 2''$$

f) Calculo de la energía consumida con la carga inicial de bolas

$$Kw = 1,07(D)^{0,34}(6,3 - 5,4 \times V_{\text{carga}}) \times V_{\text{critica}}$$

$$Kw = 1,07 \times (6,5)^{0,34}(6,3 - 5,4 \times 0,40) \times 0,70 = 5,8596 \text{ kw}$$

Potencia que consumirá el molino:

$$Hp = 5,8596 \text{ Kw} \times 21,460 \text{ Tn} \times 1,341 \frac{Hp}{Kw} = 168,6267$$

$$\mathbf{Hp = 168,6267}$$

La potencia instalada del motor es de 568,75 Hp por lo que solo está trabajando con el 30% de su capacidad instalada.

4.3. PRESENTACIÓN DE LOS RESULTADOS DEL CIRCUITO MOLIENDA- CLASIFICACIÓN DE 2 650 TMPD

Rediseñado e instalado el molino de Bolas 6,5'x14', se puso nuevas chaquetas de 2 undulaciones para que pueda realizar el levantamiento de bolas y generar la fractura del mineral tanto por abrasión, fricción, impacto y cizallamiento. También se cargó bolas de acero de 2" (21,460 Tn).

4.3.1. EVALUACIÓN DE LOS MOLINOS Y CLASIFICADOR DEL CIRCUITO MOLIENDA CLASIFICACIÓN DE 2 650 TMPD

- a) Para determinar en cuanto a variado la granulometría del molino DOMINION después del incremento de tonelajes a

2, 650 TMD, se realizó el análisis granulométrico utilizando la serie Tyler.

Tabla 4.8 Análisis granulométrico del Molino Dominion 12' x 16'

Malla	Micrones	Alimento			Descarga			Calculo 80%	
		PESO (gr)	% peso	Acum (-)	PESO (gr)	% peso	Acum (-)	P(80%)	F(80%)
1	25400	128,60	1,83	98,17	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
3/4	19050	741,97	10,54	87,64	0,00	0,00	100,00	16139,52	0,00
1/2	12700	1233,12	17,51	70,12	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
3/8	9500	580,61	8,25	61,88	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
1/4	6300	618,82	8,79	53,09	0,45	0,02	99,98	0,00	0,00
4	4750	350,26	4,97	48,11	2,03	0,09	99,88	0,00	0,00
6	3350	407,21	5,78	42,33	5,06	0,24	99,65	0,00	0,00
8	2360	350,53	4,98	37,35	11,82	0,55	99,10	0,00	0,00
12	1700	250,19	3,55	33,80	14,04	0,66	98,44	0,00	0,00
16	1180	332,03	4,72	29,08	37,23	1,74	96,70	0,00	0,00
20	850	261,21	3,71	25,37	50,59	2,36	94,34	0,00	0,00
30	600	255,69	3,63	21,74	83,26	3,88	90,46	0,00	0,00
40	425	264,14	3,75	17,99	132,10	6,16	84,30	0,00	343,04
50	300	211,12	3,00	14,99	147,27	6,87	77,42	0,00	0,00
70	212	246,15	3,50	11,50	214,19	9,99	67,43	0,00	0,00
100	150	197,82	2,81	8,69	191,10	8,92	58,51	0,00	0,00
140	106	158,37	2,25	6,44	158,53	7,40	51,12	0,00	0,00
200	75	160,36	2,28	4,16	160,65	7,50	43,62	0,00	0,00
270	53	173,80	2,47	1,69	201,65	9,41	34,21	0,00	0,00
400	38	102,25	1,45	0,24	92,98	4,34	29,87	0,00	0,00
-400	0	16,81	0,24	0,00	640,25	29,87	0,00	0,00	0,00
TOTAL		7041,1	100,00		2143,2	100,00		16139,52	343,04

Malla -200=

4,16

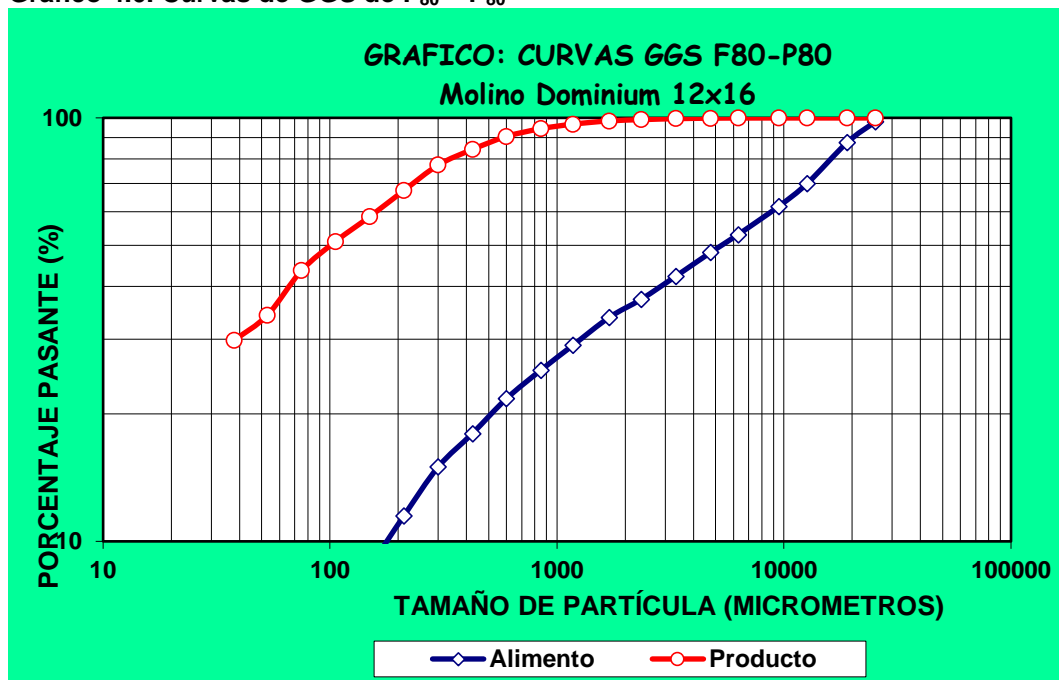
43,62

Ratio= 47,05

Fuente: Elaboración propia

A continuación, con el análisis granulométrico graficamos los resultados tanto la alimentación y descarga. Ver gráfico 4.6.

Gráfico 4.6. Curvas de GGS de F₈₀ – P₈₀



Fuente: Elaboración propia

De las curvas de Gaudin Schumman obtenemos los $F_{80}=16139,52$ micras $P_{80}=343,04$ micras

b) De igual manera para el molino COMESA 8' x 8' se realizó el análisis granulométrico tanto del alimento y del producto y ver la variación de la granulometría en cuanto ha variado, ver tabla.

Tabla 4.9 Análisis granulométrico del Molino COMESA 8' x 8'

Malla	Micrones	Alimento			Descarga			Calculo 80%	
		PESO (gr)	% peso	Acum (-)	PESO (gr)	% peso	Acum (-)	F(80%)	P(80%)
1	25400	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
3/4	19050	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
1/2	12700	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
3/8	9500	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
1/4	6300	0,00	0,00	100,00	0,50	0,02	99,98	0,00	0,00
4	4750	1,61	0,05	99,95	1,04	0,04	99,95	0,00	0,00
6	3350	4,27	0,13	99,82	1,53	0,05	99,89	0,00	0,00
8	2360	6,97	0,21	99,60	3,88	0,14	99,75	0,00	0,00
12	1700	9,88	0,30	99,30	5,06	0,18	99,58	0,00	0,00
16	1180	31,88	0,98	98,32	17,56	0,62	98,95	0,00	0,00
20	850	51,54	1,59	96,73	28,75	1,02	97,94	0,00	0,00
30	600	105,28	3,24	93,49	59,32	2,10	95,84	0,00	0,00
40	425	223,80	6,89	86,60	148,64	5,25	90,59	337,05	0,00
50	300	315,50	9,72	76,88	238,75	8,44	82,15	0,00	287,67
70	212	582,67	17,94	58,93	457,75	16,18	65,97	0,00	0,00
100	150	802,00	24,70	34,23	658,51	23,28	42,69	0,00	0,00
140	106	589,76	18,16	16,07	547,34	19,35	23,35	0,00	0,00
200	75	230,70	7,11	8,97	269,24	9,52	13,83	0,00	0,00
270	53	135,60	4,18	4,79	135,18	4,78	9,05	0,00	0,00
400	38	36,40	1,12	3,67	48,74	1,72	7,33	0,00	0,00
-400	0	119,14	3,67	0,00	207,41	7,33	0,00	0,00	0,00
TOTAL		3247,0	100,00		2829,2	100,00		337,05	287,67

Malla -200=

8,97

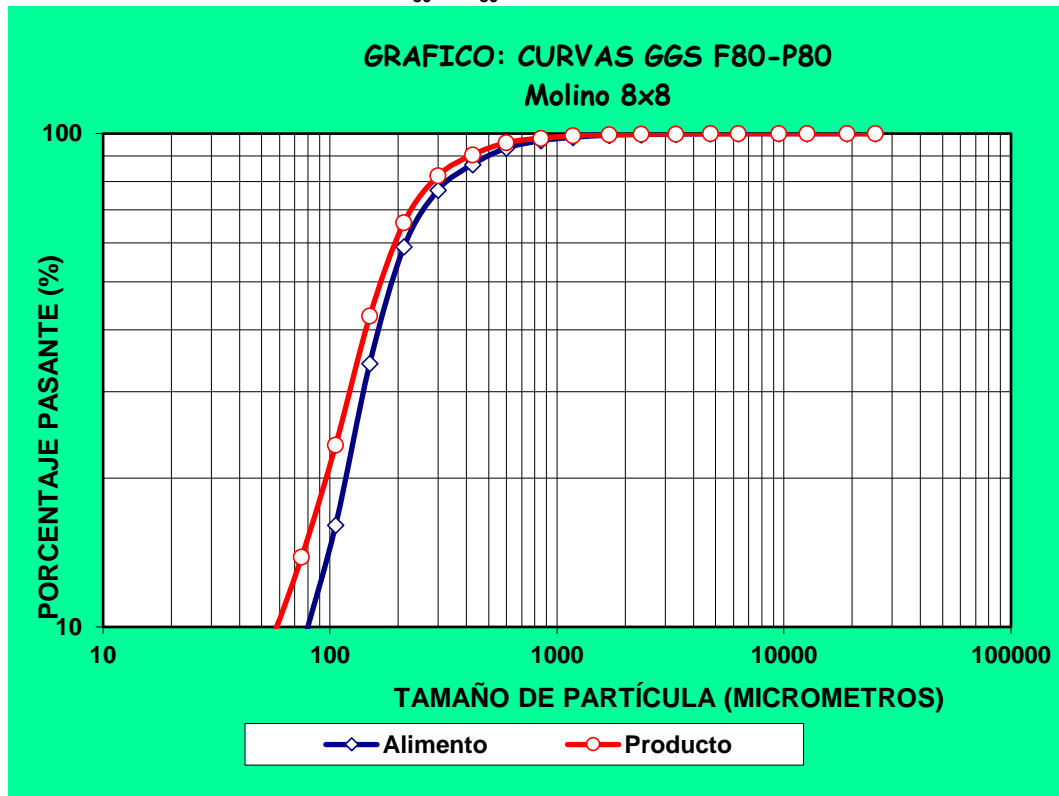
13,83

Ratio= 1,2

Fuente: Elaboración propia

Del análisis granulométrico obtenemos la gráfica del alimento y del producto para la obtención del 80% acumulado negativo como lo podemos ver en la gráfica 4.7.

Gráfico 4.6 Curvas de GGS de F₈₀ – P₈₀

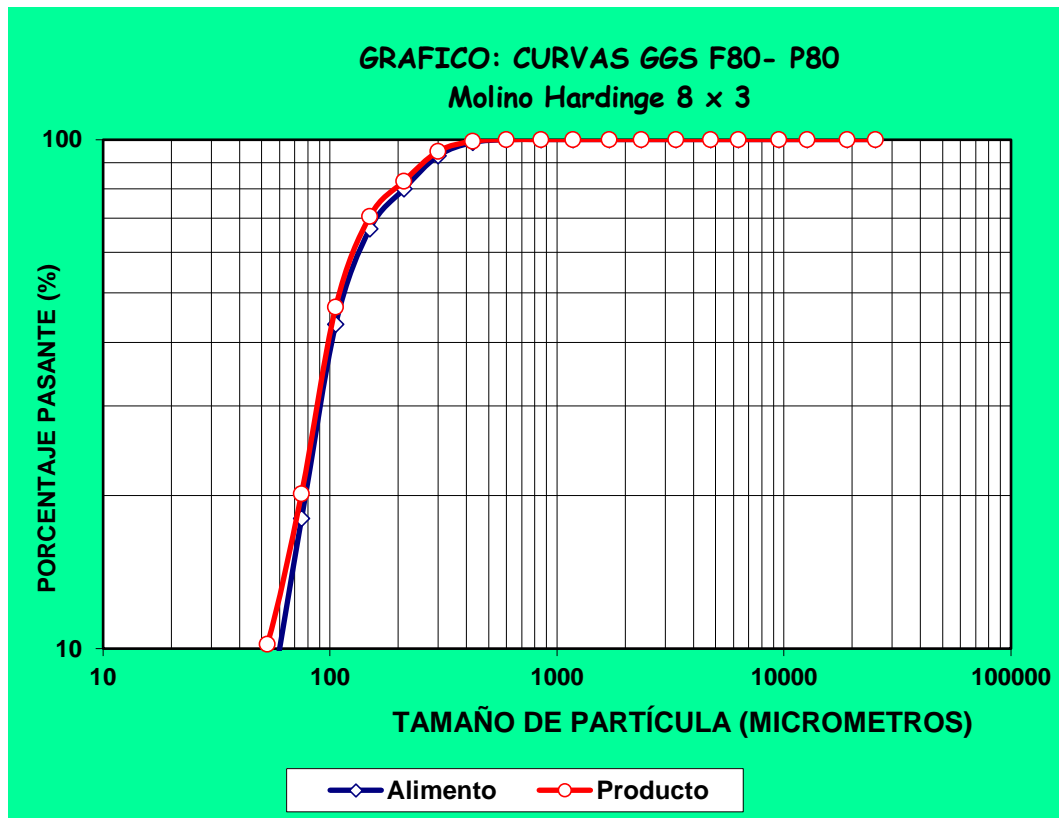


Fuente: Elaboración propia.

De las curvas de Gaudin Schumman obtenemos los
F₈₀=337,05 micras P₈₀=287,67 micras

- c) De igual manera para el molino HARDINGE 8' x 3' se realizó el análisis granulométrico tanto del alimento y del producto y ver la variación de la granulometría en cuanto ha variado, ver tabla.

Gráfico 4.7 Curvas de GGS de F₈₀ – P₈₀



Fuente: Elaboración propia

- d) En este punto realizamos el análisis granulométrico del molino MARCY 6,5' x 14' que entro en operación para el incremento del tonelaje a 2,650 TMPD. Este molino viene realizando el tratamiento de 80,88 TMPH en paralelo con el molino COMESA 8' X 8' realizando el mismo tratamiento. El molino rediseñado viene trabajando con una velocidad de operación 21,09 rpm, siendo el 70% de la velocidad crítica.

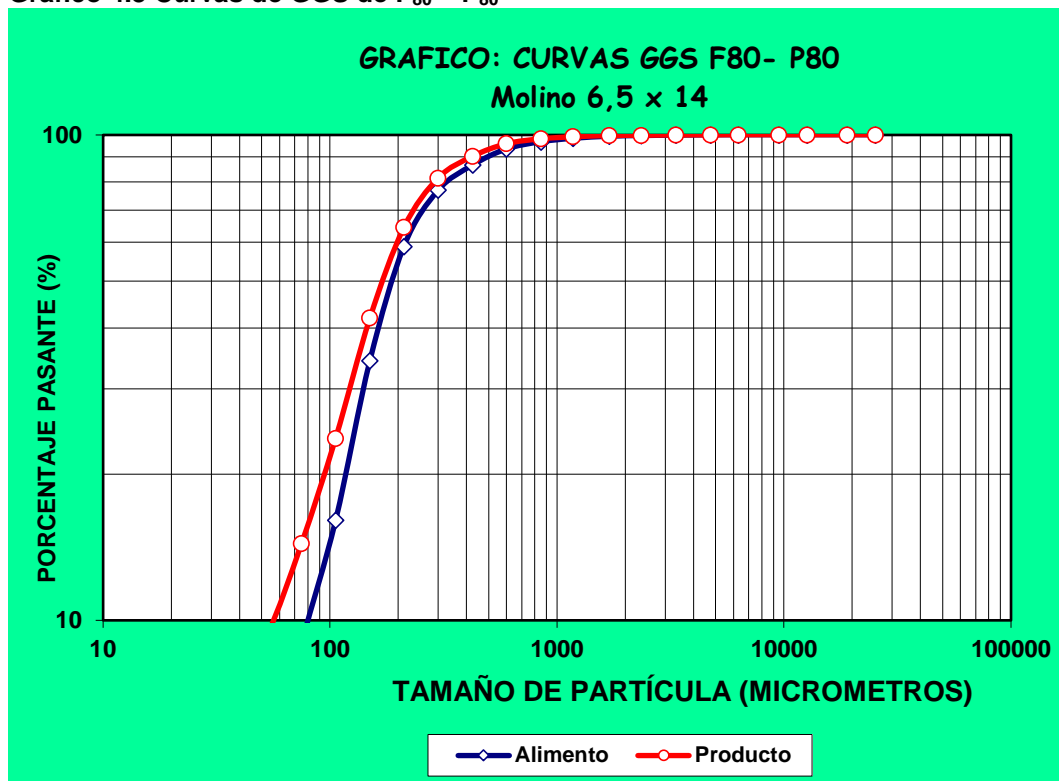
Tabla 4.11 Análisis granulométrico del Molino MARCY 6,5' x 14'

Malla	Micrones	Alimento			Descarga			Calculo 80%	
		PESO (gr)	% peso	Acum (-)	PESO (gr)	% peso	Acum (-)	F(80%)	F(80%)
1	25400	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
3/4	19050	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
1/2	12700	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
3/8	9500	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
1/4	6300	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00	100,00	0,00	0,00
4	4750	1,61	0,05	99,95	1,50	0,05	99,95	0,00	0,00
6	3350	4,27	0,13	99,82	2,12	0,08	99,87	0,00	0,00
8	2360	6,97	0,21	99,60	3,37	0,12	99,75	0,00	0,00
12	1700	9,88	0,30	99,30	4,34	0,16	99,59	0,00	0,00
16	1180	31,88	0,98	98,32	15,61	0,57	99,02	0,00	0,00
20	850	51,54	1,59	96,73	26,16	0,95	98,06	0,00	0,00
30	600	105,28	3,24	93,49	61,64	2,25	95,82	0,00	0,00
40	425	223,80	6,89	86,60	152,62	5,56	90,26	337,05	0,00
50	300	315,50	9,72	76,88	241,49	8,80	81,45	0,00	292,10
70	212	582,67	17,94	58,93	466,51	17,00	64,45	0,00	0,00
100	150	802,00	24,70	34,23	618,75	22,55	41,90	0,00	0,00
140	106	589,76	18,16	16,07	498,95	18,19	23,71	0,00	0,00
200	75	230,70	7,11	8,97	255,71	9,32	14,39	0,00	0,00
270	53	135,60	4,18	4,79	138,33	5,04	9,35	0,00	0,00
400	38	36,40	1,12	3,67	54,36	1,98	7,37	0,00	0,00
-400	0	119,14	3,67	0,00	202,14	7,37	0,00	0,00	0,00
TOTAL		3247,0	100,00		2743,6	100,00		337,05	292,10
	Malla -200=		8,97			14,39			
	Ratio=	1,15							

Fuente: Elaboración propia

Del análisis granulométrico del alimento y del producto, se procedió a realizar el grafico de Gates Gaudin Schumman que lo podemos ver en la gráfica 4.7.

Gráfico 4.8 Curvas de GGS de F₈₀ – P₈₀



Fuente: Elaboración propia

e) Para determinar en cuanto ha influido el incremento del tonelaje en la clasificación con la operación del molino MARCY, se realizó la evaluación de clasificación. La operación del hidrociclón D-20 siguió manteniendo el Ápex de 2 3/4" y el vórtex de 5 pulg.

Para la demostración de nuestra hipótesis específica que tenemos que mantener la granulometría por encima de 60% (74 μ). A continuación, presentamos la tabla de análisis granulométrico en la tabla.

Tabla 4.12 Análisis granulométrico de la clasificación de Hidrociclones

Malla	Abert.	ALIMENTO		UNDERFLOW		OVERFLOW		D/F	DATOS PARA EFICIENCIA			EFICIENCIA %			
		% Peso	Acum (-)	% Peso	Acum (-)	% Peso	Acum (-)		F _{R(x)} R/F	F _{D(x)} D/F	F _{F(x)} CAL	E _{R(x)}	E _{D(x)}	P	E _{D(x)c}
4	4750	0,01	99,94	0,05	99,95	0,00	100,00	1,1215	0,00	0,04	0,04	0,00	100,00		100,00
6	3350	0,04	99,91	0,13	99,82	0,00	100,00	0,5113	0,00	0,10	0,10	0,00	37,70		19,91
8	2360	0,10	99,81	0,21	99,60	0,00	100,00	0,4890	0,00	0,16	0,16	0,00	61,26		50,20
12	1700	0,20	99,60	0,30	99,30	0,02	99,98	0,5561	0,01	0,22	0,23	2,24	68,97		60,10
16	1180	0,66	98,94	0,98	98,32	0,02	99,97	0,6203	0,00	0,72	0,73	0,56	30,82		11,05
20	850	1,19	97,75	1,59	96,73	0,02	99,95	0,6819	0,00	1,17	1,17	0,37	61,62		50,66
30	600	2,42	95,33	3,24	93,49	0,04	99,90	0,7123	0,01	2,39	2,40	0,49	48,71		34,06
40	425	5,75	89,58	6,89	86,60	0,74	99,16	0,7624	0,20	5,07	5,27	3,71	45,30	0,2222	29,67
50	300	8,95	80,63	9,72	76,88	2,42	96,75	0,8111	0,64	7,15	7,79	8,20	65,12		55,16
70	212	15,55	65,08	17,94	58,93	8,66	88,08	0,7890	2,29	13,20	15,49	14,76	46,15		30,77
100	150	21,13	43,95	24,70	34,23	8,46	79,63	0,7859	2,23	18,17	20,40	10,94	64,70		54,62
140	106	15,88	28,08	18,16	16,07	8,80	70,82	0,7807	2,32	13,36	15,69	14,81	115,84		120,37
200	75	9,02	19,06	7,11	8,97	11,60	59,22	0,7992	3,06	5,23	8,29	36,95	161,18		178,65
270	53	5,90	13,16	4,18	4,79	11,89	47,33	0,8032	3,14	3,07	6,21	50,53	84,17		79,64
400	38	2,59	10,57	1,12	3,67	7,07	40,26	0,8114	1,87	0,82	2,69	69,37	114,11		118,15
-400	0	10,57	0,00	3,67	0,00	40,26	0,00								
TOTAL		100,00		100,00		100,00		0,736							

malla -200

28,1

16,07

70,82

R/F 0,264

BALANCE DE FLUJO Y MASA									
	TMSPH	FLUJO	%Sp	%Sv	G.E.	D.P.	CAUDAL (m ³ /Hr)		
							PULPA	SOLIDOS	AGUA
Feed	258.17	73.97	82.34	24.3	3.49	1.60	309.10	73.97	235.12
O' Flow	96.41	31.61	35.12	15.1	3.05	1.31	209.74	31.61	178.13
U' Flow	161.76	43.85	78.43	47.4	3.69	2.34	88.34	43.85	44.49

LEYENDA

- %Sp PORCENTAJE DE SOLIDOS EN PESO
- %Sv PORCENTAJE DE SOLIDOS EN VOLUMEN
- G.E. GRAVEDAD ESPECIFICA
- D.P. DENSIDAD DE PULPA

Grafico 4.7 Curvas de GGS del alimento, Descarga y Rebose

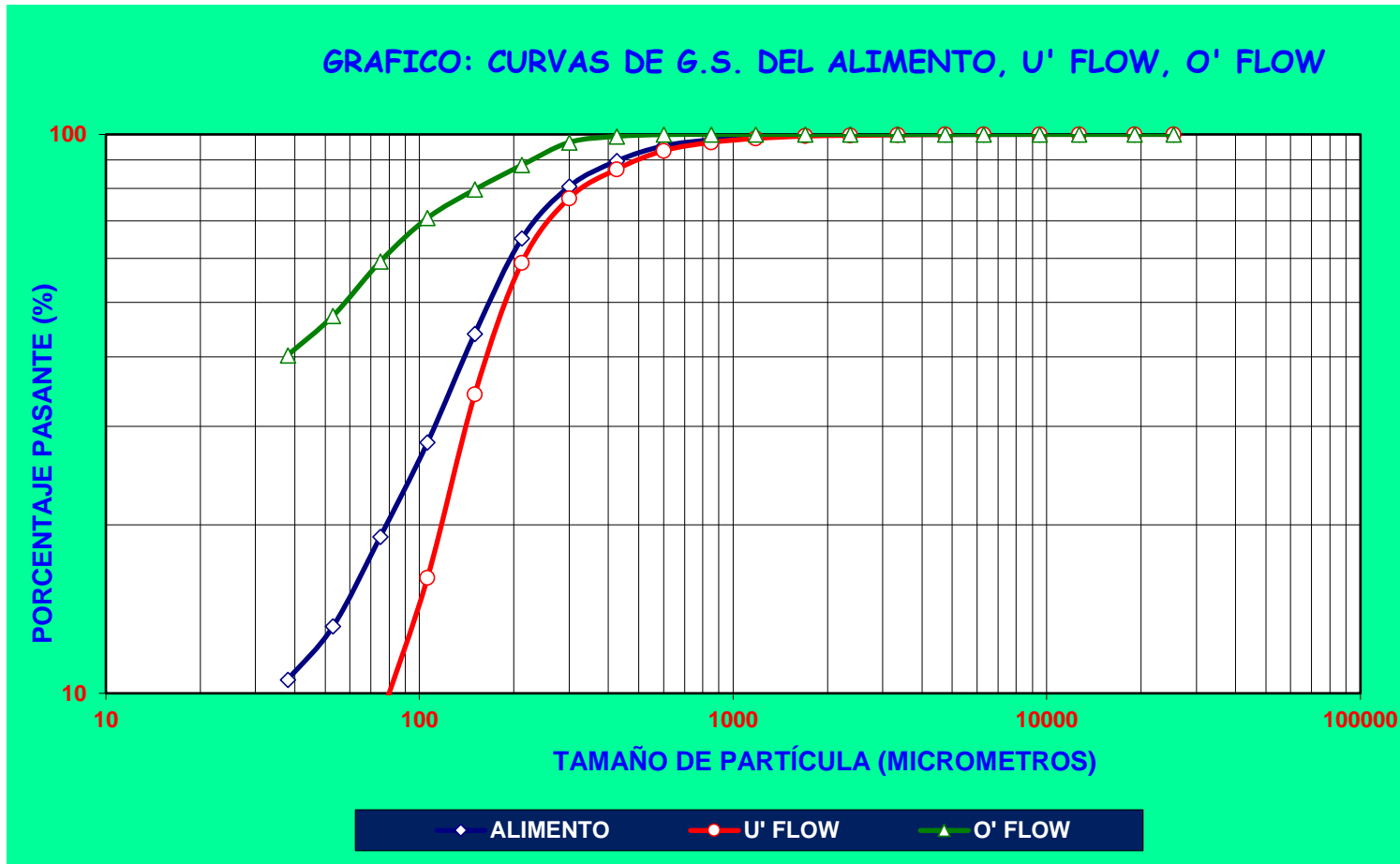


Gráfico 4.10 Curvas de TROMP

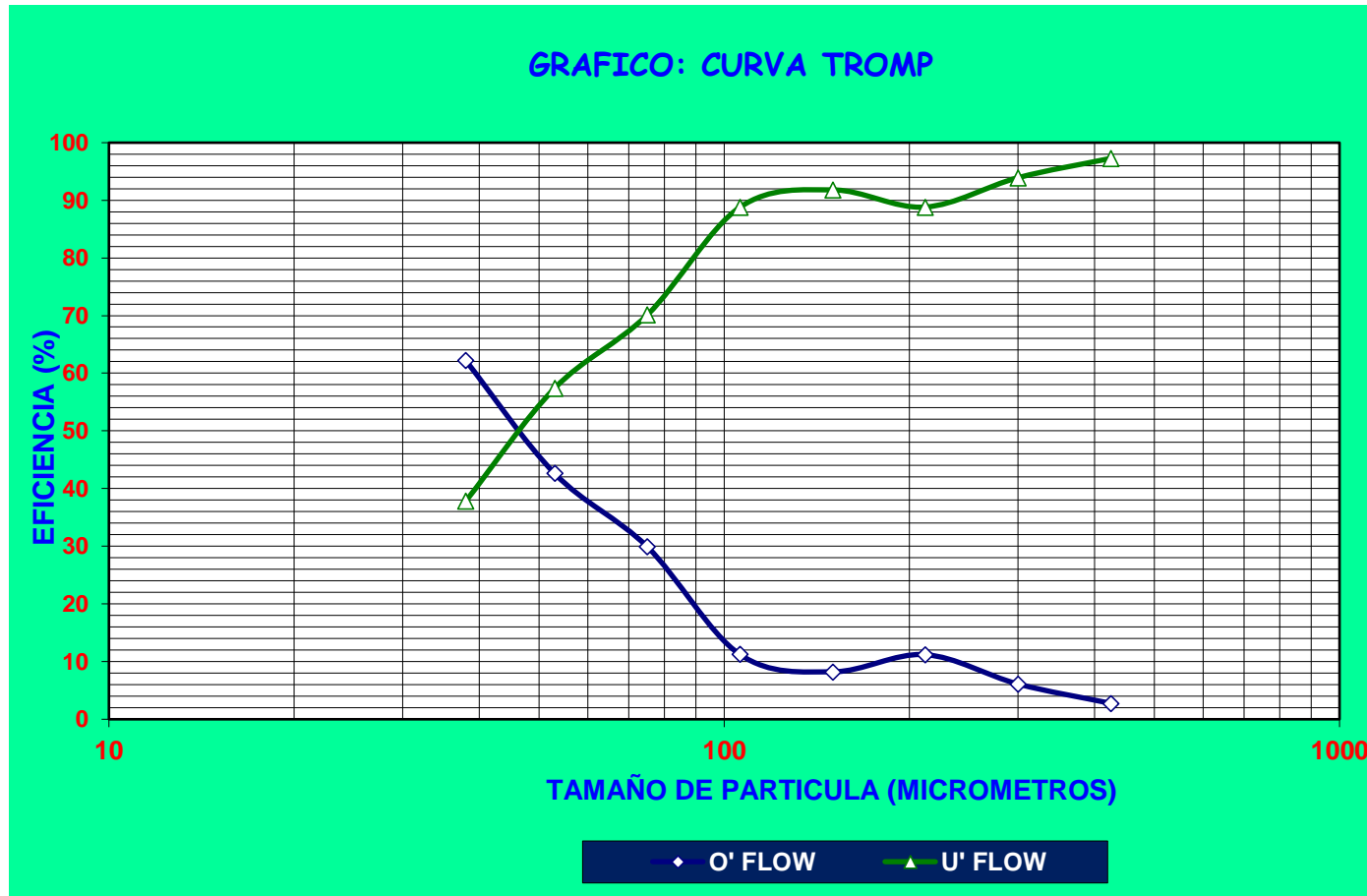
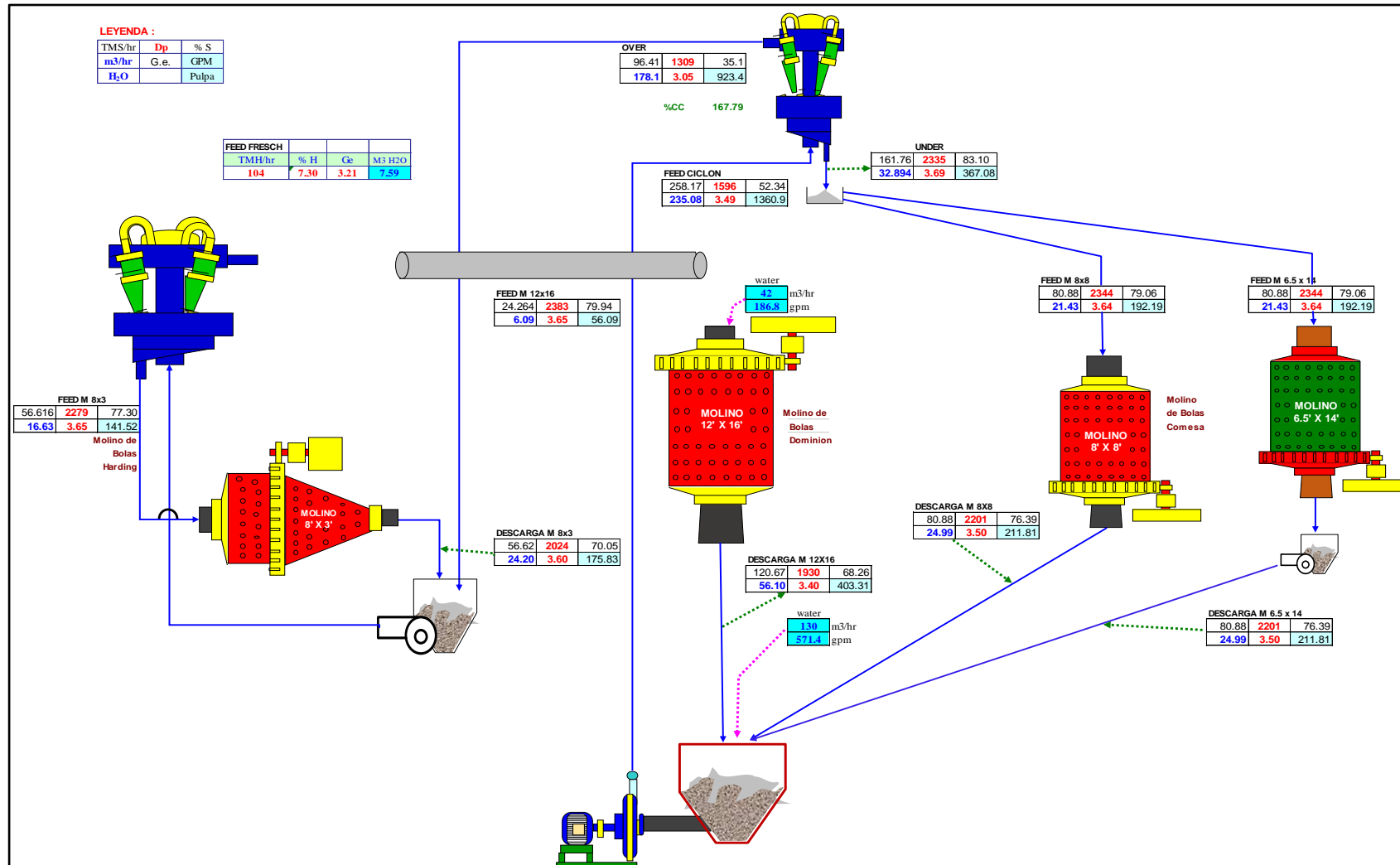


Gráfico 4.9. Balance de Materia en Circuito de Molienda de la Cía. Minera Huarón S.A.



4.4. INCREMENTO DEL TONELAJE

A continuación, se presentó los tonelajes de tratamiento que se tomó a la entrada del circuito de molienda clasificación. Ver tabla

N°	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14
TMPD	2450	2480	2510	2550	2580	2590	2600	2620	2630	2520	2570	2480	2650	2645

4.5. PRUEBA DE HIPOTESIS

1. FORMULACIÓN DE LA HIPÓTESIS

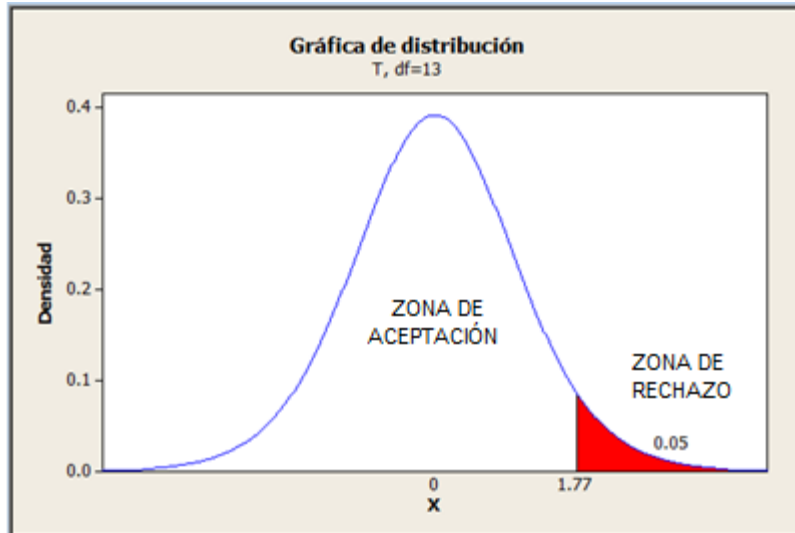
$H_0: \mu=2,300$ Con la conversión del molino de barras Marcy 6.5' x 14' a molino de bolas no se incrementará el tonelaje de tratamiento, manteniendo los resultados metalúrgicos.

$H_1: \mu>2,300$ Con la conversión del molino de barras Marcy 6.5' x 14' a molino de bolas se incrementará el tonelaje de tratamiento, manteniendo los resultados metalúrgicos.

2. NIVEL DE SIGNIFICACIÓN

$$\alpha = 0,05$$

3. ESQUEMA DE PRUEBA



4. ESTADÍSTICO DE PRUEBA

$$t_o = \frac{\bar{y} - K}{\sqrt{\frac{S^2}{n}}}$$
$$t_o = \frac{2562,2 - 2300}{\sqrt{\frac{4295,2}{14}}} = 14,99$$

5. DECISIÓN Y CONCLUSIÓN

Como el estadístico cae en la zona de rechazo ($t_{\text{calculado}} = 14,99 > t_{\text{tablas}} = 1,77$), se rechaza la hipótesis nula y se acepta la hipótesis alterna y esto nos permite concluir que con la conversión del molino de barras Marcy 6,5' x 14' a molino de bolas se incrementó el tonelaje de tratamiento, manteniendo los resultados metalúrgicos. Con un nivel de significancia del 95%.

4.6. DISCUSIÓN DE RESULTADOS

En la tabla 4.2 observamos el análisis granulométrico del molino Dominion, donde el 80% del alimento se encuentra debajo de 25072,064 micrones, es decir las partículas en la alimentación son menores de 1" y el 80% del producto se encuentra debajo de 413,61 micrones, ubicándose por debajo de la malla 35, siendo su radio de reducción de 60,62. Este radio de reducción nos indica que el molino está realizando un buen fracturamiento del mineral. Esto también lo podemos verificar en el gráfico 4.1.

En la tabla 4.4 del análisis granulométrico del molino Comesa, se observa que el 80% del alimento se encuentra por debajo de la malla 35 y el 80% del producto también se encuentra debajo de la malla mencionada, siendo su radio de reducción 1,416. Lo afirmado se puede verificar en el gráfico 4.2.

En la tabla 4.6 del análisis granulométrico del molino Hardinge podemos afirmar que el 80% del alimento se encuentra debajo de la malla 25 y el 80% del producto se encuentra debajo de la malla 50, con un radio de reducción de 1,9, que es una buena fractura miento para el tipo de molino. En el gráfico 4.3 también lo podemos observar.

En la tabla 4.7 del análisis granulométrico de clasificación del hidrociclón observamos que el corto circuito es bajo de 0,16853, siendo su eficiencia de clasificación de 62,45% para un D_{50} 60,09 micras (curva de tromp gráfico 4.6), es una buena eficiencia para el tipo de clasificación. En el gráfico 4.5 observamos las curvas de alimentación, descarga y finos. En cuanto a la carga circulante del proceso molienda-clasificación es 1,684, que se encuentra dentro de lo aceptable.

En el rediseño del molino de bolas se obtuvo:

Longitud	: 14 pies
Diámetro	: 6,5 pies
Velocidad crítica rpm	: 30
Velocidad de operación (70%)	: 21
Potencia teórica para accionar el molino:	424,129 kw
Potencia de motor Hp	: 568,75
Energía consumida con bolas	: 5,8596 kw
Potencia de consumo del molino Hp	: 168,62
Potencia necesaria de operación Hp	: 94,49
Carga inicial de bolas	: 21,460 Tn
Peso de cada bola	: 0,536 kg
Diámetro máximo de bolas	: 2"

En la tabla 4.8 observamos el análisis granulométrico del molino Dominion después de incrementado el tonelaje de tratamiento que, el 80% del alimento se encuentra debajo de la malla $\frac{3}{4}$ pulgadas y el 80% del producto está debajo de la malla 40, siendo su radio de reducción 47,05. De esto podemos decir que el radio de reducción se redujo debido a que el molino trabaja directamente con carga fresca y ya no se está alimentando carga de la clasificación. En el gráfico 4.6 podemos ver las curvas del alimento y del producto.

En la tabla 4.9 observamos el análisis granulométrico del molino Comesa donde el 80% del alimento y del producto se encuentran debajo de las mallas 40 y 50, esto también lo podemos ver en el gráfico 4.6, siendo su radio de reducción 1,2 en comparación con el anterior radio de reducción del circuito de molienda se ha reducido, esto debido a que trabaja con mayor carga circulante debido al incremento de tonelaje.

En la tabla 4.10 el análisis granulométrico del molino Hardinge el 80% del alimento y del producto se encuentran debajo de la malla 50 y 70, (ver gráfico 4.7), siendo su radio de reducción 1,08 esto es debido al incremento de tonelaje de tratamiento.

En la tabla 4.11 el análisis granulométrico del molino Marcy que trabaja como molino secundario, el 80% del alimento y del producto se encuentran debajo de la malla 40 y 50 siendo esto 337 micrones y 292 micrones respectivamente, cuyo radio de reducción es 1,15 siendo esto una buena reducción para el tipo de molienda. Lo afirmado lo podemos ver en el gráfico 4.8

En la tabla 4.12 del análisis granulométrico de clasificación de hidrociclones nos indica que la clasificación es buena con 62,54% para un D_{50} 47,90 micras (ver gráfico 4.10), cuya carga circulante se encuentra 3,83.

La granulometría de la tabla 2.12 con el nuevo circuito de molienda-clasificación referente a la malla 200 (74μ) es superior manteniéndose en 70,02 micras probándose de esta manera la hipótesis planteada.

CONCLUSIONES

1. Las condiciones actuales de operación del circuito de molienda-clasificación es:

Molino DOMINION

Tamaño	: 12' x 16'
Velocidad critica RPM	: 22,12
Radio de reducción	: 60,22
Tamaño molturante	: 3,5" y 4"

Molino COMESA

Tamaño	: 8' x 8'
Velocidad critica RPM	: 27,08
% de velocidad crítica	: 77,10
Radio de reducción	: 1,416
Tamaño molturante	: 2,5" y 2"

Molino HARDINGE

Tamaño	: 8' x 3'
Velocidad critica RPM	: 27,08
% de velocidad crítica	: 76,10
Radio de reducción	: 1,416
Tamaño molturante	: 2"

Hidrociclón D-20

2 Hidrociclones KREBS	: D-20
Ápex	: 2 3/4"
Vortex	: 5"
2 Bombas DENVER	: 10"x8"
D ₅₀	: 60 μ
F(d ₅₀)	: 26,48
U(d ₅₀)	: 9,64
O(d ₅₀)	: 56,10

2. El rediseño del molino de barras Marcy a molino de bolas dio los siguientes datos:

Longitud	: 14 pies
Diámetro	: 6,5 pies
Velocidad crítica rpm	: 30
Velocidad de operación (70%)	: 21
Potencia teórica para accionar el molino	: 424,129 kw
Potencia de motor Hp	: 568,75
Energía consumida con bolas	: 5,8596 kw
Potencia de consumo del molino Hp	: 168,62
Potencia necesaria de operación Hp	: 94,49
Carga inicial de bolas	: 21,460 Tn
Peso de cada bola	: 0,536 kg

Diámetro máximo de bolas : 2"

3. La granulometría de liberación se encuentra por encima de 60% (74 μ) después del incremento del tonelaje a 2,650 TMD

RECOMENDACIONES

1. Al momento de realizar el muestreo en los puntos establecidos en el circuito de molienda –clasificación, se debe planificar para no tener percances con los materiales a utilizar y sea confiables las muestras que se está tomando.
2. Cuando se toman datos para dimensionar el molino se debe tener en cuenta las condiciones del molino y de las chaquetas para proponer si se van a remplazar algunos componentes del molino.
3. Para controlar la clasificación de las partículas liberadas en el hidrociclón se debe esperar a que el circuito de molienda se normalice y controlar el flujo de agua mediante el densímetro.

REFERENCIA BIBLIOGRAFICA

1. Apuntes de molienda. Industrias I. (2012). Universidad de Buenos Aires, Facultad de Ingeniería Industrial. Argentina.
2. Chambi Condori, Daysi. (2015). *“Diseño de un molino de bolas para la corporación Minera Ananea S.A.”*. Tesis
3. Quiroz Nuñez, Iván. (1987) *“Ingeniería Metalúrgica Operaciones Unitaris en Procesamiento de Minerales”* Editora; UNI – Lima Perú
4. Manzaneda Cabala, José (1994). *“Procesamiento de Minerales Metalurgia Aplicada”*. Ediciones UNI. Lima-Perú.
5. Mesa Maria P & Muñoz Sebastián & Palacios Xavier & Ramírez Carolina (2013). *“Molienda: Caracterización y Equipos de Operación”*. Universidad de America, Bogotá D.C, Colombia.
6. Fueyo Casado, Luis *“Equipos de Trituración, Molienda y Clasificación”* Edit. Rocas y Minerales 2da Edición Madrid - España.
7. Taggart F. Arthur (1966) *“Elementos de Preparación de Minerales”* Ediciones Interciencia. Madrid.
8. Pino Gotuzzo Raúl (2010). *“Manual de Investigación Científica”* Primera Edición. Instituto de Investigaciones Católica Tesis y Asesores. Lima-Perú.
9. Hernández Sampieri, R., Fernandez Collado, C., Baptista Lucio, P. (2003) *“Metodología de la Investigación”*. Editorial Mexicana
10. Salinas Yadaisela, Francisco (2015). *“Evaluación Operacional de un Sistema de Molienda Molino de Bolas Hardinge para Mantener la Eficiencia del Mineral en la empresa Minalta S.A. del Cantón Zarumilla, Proviencia del Oro 2014”*. Tesis de la Universidad Técnica de Machala- Unidad Académica de Ciencias Químicas y de la Salud.
11. file:///C:/Users/OMAR/Downloads/molienda4-131120143104-phpapp01.pdf
12. Andrea Blanco, E. (2014). *“Molienda”*, Universidad de Cantabria

13. Leonardo G, Agustín & Fernando Concha A. (1994). "*Diseño y Simulación de circuitos de Molienda y Clasificación*". Concepción, Chile.
14. Guerrero, V. H., Davila, J., Gales, S., Ponton, P., Rosas, N., Sotomayor, V., & Valdiviezo, C. (2011). "*Aplicaciones Estructurales Industrializados*". Nuevos Materiales, Pàg. 166.
15. Marín, T. F. (2013). "*Equipos de Transferencia de Calor*". Industrial Carabobo II, Pàg. 2.

ANEXOS

ANEXO I

Foto 1: Bolas de 2 pulg



Foto 2: Análisis granulométricos



Foto 3: Balanza electrónica para el pesaje de muestra



Foto 4: Molienda y circuito de Flotación de Bulk



Foto 4: Molienda y circuito de Flotación de Bulk

