

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL PERÚ
FACULTAD DE CIENCIAS E INGENIERÍA



**PONTIFICIA
UNIVERSIDAD
CATÓLICA
DEL PERÚ**

**EVALUACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS EFECTOS DE LA
VARIACIÓN DEL PORCENTAJE DE SÓLIDOS EN LA ALIMENTACIÓN
DE UN PROCESO DE MOLIENDA DE COBRE SOBRE FACTORES
ENERGÉTICOS Y MINERALÓGICOS, EN UNA PLANTA PILOTO A
ESCALA DE LABORATORIO**

Tesis para optar por el título de Ingeniero Mecánico,
que presenta el bachiller:

ALEXANDER GERMÁN PANDO MALCA

ASESOR: DR. JULIO CÉSAR CUISANO EGÚSQUIZA

Lima, Julio del 2021



DEDICATORIA

A mis padres, Wilson e Isabel, por todo su esfuerzo, apoyo y amor que me han dado a lo largo de la carrera y mi vida.

A mis hermanos por su ayuda e impulso a seguir adelante.

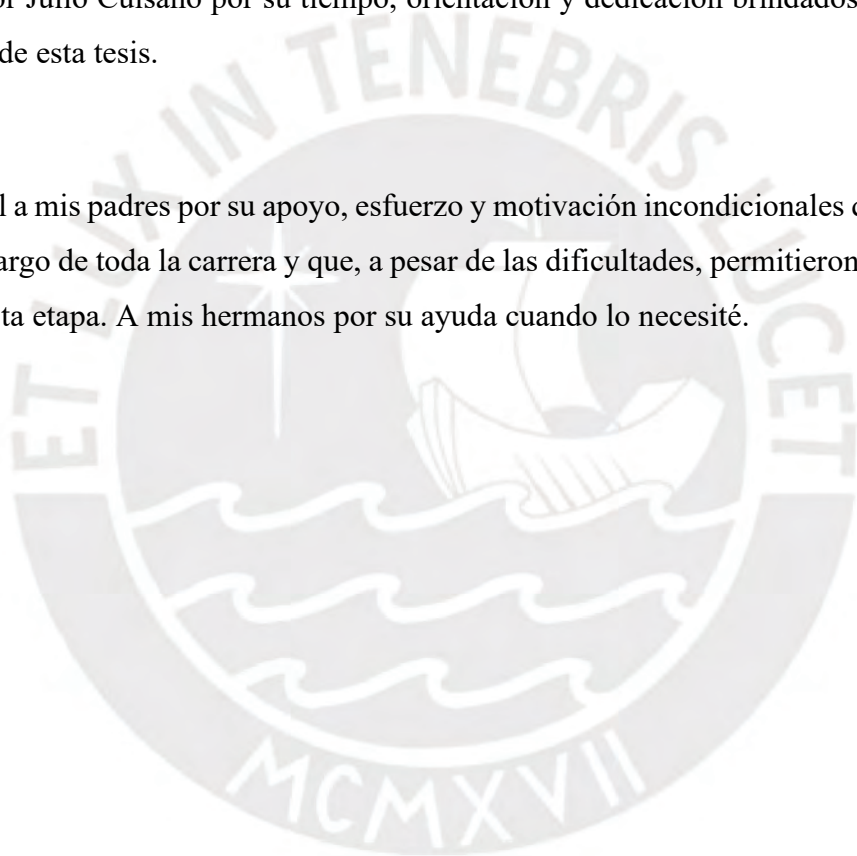
AGRADECIMIENTOS

Este trabajo fue financiado por CONCYTEC-FONDECYT (PROCIENCIA) en el marco de la convocatoria E041-01, Contrato No. 155-2018-FONDECYT-BM-IADT-AV.

A las personas involucradas en el proyecto: profesores Cesar Celis, Julio Cuisano, Luis Chirinos, Adolfo Pillihuaman, Manuel Shishido, Antonios Antoniu y Ronald Mas por la orientación y acompañamiento en los ensayos experimentales; así como, Juan y Arturo por su soporte y trabajo en equipo.

A mi asesor Julio Cuisano por su tiempo, orientación y dedicación brindados durante el desarrollo de esta tesis.

En especial a mis padres por su apoyo, esfuerzo y motivación incondicionales que me han dado a lo largo de toda la carrera y que, a pesar de las dificultades, permitieron que pueda concluir esta etapa. A mis hermanos por su ayuda cuando lo necesité.



RESUMEN

Este trabajo aborda un análisis experimental de los factores energéticos y mineralógicos en un proceso de molienda de cobre respecto a variaciones en las condiciones de operación. Para ello, se implementó una planta piloto a escala de laboratorio en la que se realizaron experimentos con diferentes porcentajes de sólidos en la alimentación del circuito. Esta planta fue establecida en el laboratorio de Mineralurgia de la PUCP.

La metodología se desarrolló para evaluar 3 niveles de porcentaje de sólidos y su influencia en los factores de consumo energético del molino de bolas, tamaño y tasa de producto y *Work Index* de Operación. Se realizaron estudios preliminares para caracterizar el mineral a moler y se siguió la metodología del Diseño de Experimentos (DOE) para el desarrollo de los ensayos. Tras la recopilación de data y muestras, se procesaron los resultados tanto de manera gráfica como estadística, siguiendo el análisis de varianza propuesto por el DOE.

Los resultados mostraron que al disminuir el porcentaje de sólidos de 75% a 66% se puede lograr una disminución en el consumo de energía del molino y un aumento en la tasa del producto; aunque, en contraparte, también un aumento en el tamaño de partículas del producto. La interacción de estos 3 parámetros, relacionados por medio del *Work Index* de Operación, dio como conclusión que en ambas réplicas el menor *Work Index* de Operación fue a la concentración de sólidos de 66%; mientras que para la de 70%, fue la mayor.

Por otro lado, los resultados fueron comparados con referencias bibliográficas y se verificaron comportamientos similares. Así como, al comparar con el estándar de laboratorio hallado mediante el método de Bond, se reveló que el circuito puede continuar siendo optimizado.

El documento concluye en que, si se realiza un compromiso entre bajo consumo energético, pero un mayor tamaño de producto; en una molienda húmeda, de cobre-calcopirita, en circuito cerrado y flujo continuo, evaluado en este estudio, se identificaría como la opción a recomendar el porcentaje de sólidos de 66%.

ÍNDICE DE CONTENIDO

RESUMEN.....	I
ÍNDICE DE CONTENIDO.....	II
ÍNDICE DE TABLAS.....	V
ÍNDICE DE FIGURAS.....	VII
INTRODUCCIÓN.....	XI
JUSTIFICACIÓN.....	XII
OBJETIVOS.....	XIV
1 FUNDAMENTOS TEÓRICOS.....	1
1.1 Panorama general.....	1
1.1.1 Molienda.....	2
1.2 Circuito de molienda.....	3
1.2.1 F_{80}	7
1.2.2 P_{80}	7
1.2.3 Tasa de alimentación de mineral.....	7
1.2.4 Tasa de alimentación de agua.....	7
1.2.5 Porcentaje de sólidos en la alimentación.....	8
1.2.6 Tasa de descarga de producto.....	8
1.2.7 Eficiencia de un circuito de molienda.....	8
1.3 Molino de bolas.....	11
1.3.1 Potencia de molino.....	13
1.3.2 Velocidad crítica.....	14
1.3.3 Volumen de los medios de molienda.....	14
1.3.4 Otros factores.....	15
1.4 Clasificador helicoidal.....	16
1.4.1 Altura de descarga.....	18

1.5	Mineral.....	18
2	ESTADO DEL ARTE	19
3	EXPERIMENTACIÓN	32
3.1	Aspectos generales y fundamentación.....	32
3.2	Muestreo y análisis del mineral	33
3.2.1	Muestreo	34
3.2.2	Análisis mineralógico	34
3.2.3	Análisis granulométrico.....	35
3.2.4	Análisis de densidad	36
3.2.5	Análisis de Bond.....	37
3.3	Procedimiento de ensayo	39
3.3.1	Metodología.....	39
3.3.2	Banco de ensayos	40
3.3.3	Condiciones de operación.....	47
3.3.4	Recolección de data y muestras.....	47
3.3.5	Protocolo de ensayos	48
3.4	Procesamiento y análisis gráficos	51
3.4.1	Consumo energético	51
3.4.2	Tamaño de producto	52
3.4.3	Tasa de producto.....	53
3.4.4	<i>Work Index</i> de Operación	54
3.5	Procesamiento y análisis según DOE	54
3.5.1	Consumo energético	57
3.5.2	Tamaño de producto	57
3.5.3	Tasa de producto.....	57
3.5.4	<i>Work Index</i> de Operación	57
3.6	Expresiones para el cálculo.....	58

3.6.1	Potencia efectiva eléctrica	58
3.6.2	Porcentaje de pasantes de la malla 200	58
3.6.3	Flujo másico de producto seco	58
4	RESULTADOS	60
4.1	Consumo energético	60
4.1.1	Resultados en función del tiempo.....	60
4.1.2	Análisis de varianza.....	63
4.1.3	Comparación entre condiciones.....	64
4.2	Tamaño de producto	66
4.2.1	Resultados en función del tiempo.....	66
4.2.2	Análisis de varianza.....	69
4.2.3	Comparación entre condiciones.....	70
4.3	Tasa de producto	72
4.3.1	Resultados en función del tiempo.....	72
4.3.2	Análisis de varianza.....	75
4.3.3	Comparación entre condiciones.....	76
4.4	<i>Work Index</i> de Operación	77
4.4.1	Resultados en función del tiempo.....	77
4.4.2	Análisis de varianza.....	81
4.4.3	Comparación entre condiciones.....	82
4.5	Comparación bibliográfica	84
4.5.1	Energía específica respecto al tamaño de producto.....	84
4.5.2	Potencia de molino vs porcentaje de sólidos	87
	CONCLUSIONES.....	89
	RECOMENDACIONES	92
	BIBLIOGRAFÍA	93
	ANEXOS	

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1.1.- Porcentaje promedio de velocidad crítica en función del diámetro del molino de bolas (Fueyo, 2002).	14
Tabla 2.1.- Condiciones de estado estable del circuito de molienda a diferentes porcentajes de sólidos en el flujo de descarga (COF) (McIvor, 2014).....	24
Tabla 3.1.- Análisis de tamaño de partícula de la alimentación.	36
Tabla 3.2.- Factor del ensayo.....	39
Tabla 3.3.- Niveles del factor A.	40
Tabla 3.4.- Matriz experimental para los ensayos en modo continuo.	40
Tabla 3.5.- Lista y especificaciones de equipos e instrumentos.....	43
Tabla 3.6.- Valores de P_{80} para puntos menores al P_{100}	52
Tabla 3.7.- Resumen de análisis de varianza para el modelo con un solo factor	56
Tabla 4.1.- Resultados del consumo energético de los ensayos en flujo continuo para el análisis de varianza.....	64
Tabla 4.2.- Análisis de varianza de un factor, el porcentaje de sólidos, respecto a la energía consumida.....	64
Tabla 4.3.- Comparación porcentual del consumo energético entre niveles por cada réplica	65
Tabla 4.4.- Resultados del porcentaje de pasantes de los ensayos en flujo continuo para el análisis de varianza.	70
Tabla 4.5.- Análisis de varianza de un factor, el porcentaje de sólidos, respecto al porcentaje de pasantes.	70
Tabla 4.6.- Comparación porcentual del porcentaje de pasantes de la malla 200 entre niveles por cada réplica.	71
Tabla 4.7.- Resultados de la tasa de producto en los ensayos en flujo continuo para el análisis de varianza.	75
Tabla 4.8.- Análisis de varianza de un factor, el porcentaje de sólidos, respecto a la tasa de producto.	75
Tabla 4.9.- Comparación porcentual de la tasa de producto promedio entre niveles por cada réplica.	76
Tabla 4.10.- Resultados del <i>Work Index</i> de Operación promedio de los ensayos en flujo continuo para el análisis de varianza.	82

Tabla 4.11.- Análisis de varianza de un factor, el porcentaje de sólidos, respecto al Work Index de Operación.....	82
Tabla 4.12.- Comparación porcentual del Work Index de Operación entre niveles por cada réplica.	83



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.0.1. Efecto del porcentaje de sólidos en la alimentación del circuito sobre la potencia de un molino (Gao, 1996).	XII
Figura I.0.2.- Variación en el tamaño del producto al variar el porcentaje de sólidos en la alimentación (Chen, 2007).	XII
Figura 1.1.- Diagrama de procesamiento de minerales (Fuerstenau, 2003).	2
Figura 1.2.- Circuitos abiertos. (1) Solo fragmentador. (2) Clasificador-Fragmentador. F: Fragmentador; CL: Clasificador; A: Alimentación; B: Producto molido; P: Partículas de tamaño menor al valor de control; R: Partículas de tamaño mayor al valor de control. ..	4
Figura 1.3.- Circuitos cerrados. (1) Fragmentador-Clasificador. (2) Clasificador-Fragmentador.....	5
Figura 1.4.- Circuito cerrado, en molienda húmeda y primaria, con flujo continuo.	6
Figura 1.5.- Principio de funcionamiento de un molino de bolas (Gupta, 2016).	11
Figura 1.6.- Molino tubular con descarga (1) por rebose, (2) por diafragma o rejilla de rebose y (3) central (Gupta, 2016).	13
Figura 1.7.- Efecto de la velocidad del molino en el consumo de potencia (Kelly, 1990).	13
Figura 1.8.- Potencia consumida por un molino de bolas en función del volumen de carga del molino (Kelly, 1990).	15
Figura 1.9.- Clasificador helicoidal (Kelly, 1990). I: Ingreso de pulpa o alimentación; O(-): Salida de lamas o producto; y O(-): Salida de arenas o partículas de recirculación (Kelly, 1990).	17
Figura 1.10.- Regiones principales de un clasificador helicoidal (Kelly, 1990).	18
Figura 2.1.- Efecto del llenado de pulpa en la energía cinética rotacional promedio a diferentes velocidades (Zixin <i>et al.</i> , 2019).	20
Figura 2.2.- Efecto del llenado de pulpa en la fuerza aplica promedio a diferentes velocidades (Zixin <i>et al.</i> , 2019).	21
Figura 2.3.- Efecto del llenado de pulpa en la potencia del molino a diferentes velocidades (Zixin <i>et al.</i> , 2019).	21
Figura 2.4.- Energía específica de tasa de molienda acumulada en molinos de bolas con diferentes tamaños de bolas. Azul: bolas de mayor tamaño; rojo: bolas de menor tamaño (Conger <i>et al.</i> , 2018).	22

Figura 2.5.- Energía específica de tasa de molienda acumulada con i) con un solo tamaño de bolas y ii) una mezcla de dos tamaños de bolas (Conger <i>et al.</i> , 2018).	22
Figura 2.6.- Energía específica de tasa de molienda acumulada en un molino de bolas con i) un solo tamaño de bolas y ii) una mezcla de dos tamaños (Conger <i>et al.</i> , 2018)	23
Figura 2.7.- Consumo de energía del molino para diferentes elevadores, 25% de carga (10% de bolas y 15% de rocas), 74% de velocidad crítica (Usman, 2014).	25
Figura 2.8.- Distribución del tamaño del producto acumulado para los diferentes elevadores, carga del 25%: 10% de bolas y 15% de rocas, 74% de velocidad crítica (Usman, 2014).	25
Figura 2.9.- <i>Work Index</i> de Operación del molino para diferentes elevadores, 25% de carga (10% de bola y 15% de roca), 74% de velocidad crítica (Usman, 2014).	26
Figura 2.10.- Consumo medio de energía del molino para los diferentes elevadores y velocidades de molienda, 25% de carga (10% de bolas y 15% de roca) (Usman, 2014).	27
Figura 2.11.- Respuesta del tamaño de partícula en un circuito abierto a cambios escalonados en las variables manipuladas: (1) disturbio en la velocidad de alimentación de mineral al molino; (2) disturbio del caudal de agua de alimentación al molino; y (3) disturbio del caudal de dilución (Chen <i>et al.</i> , 2007).	27
Figura 2.12.- Incremento de la tasa de producto al implementar el sistema de control en las variables seleccionadas (Chen <i>et al.</i> , 2007).	28
Figura 2.13.- Los resultados de la ejecución de las variables controladas (1) tamaño de partícula; (2) carga circulante; y (3) concentración de sólidos del molino (Chen <i>et al.</i> , 2007).	28
Figura 2.14.- Circuito de operación con las variables de control y de manipulación (Yianatos <i>et al.</i> , 2002).	29
Figura 2.15.- Respuestas ante un cambio gradual en la tasa de alimentación de mineral al molino, en las variables de (1) tamaño de partícula del producto; y (2) porcentaje de sólidos en el producto (Yianatos <i>et al.</i> , 2002).	30
Figura 2.16.- Respuestas ante un cambio gradual en el flujo de agua de dilución al sumidero en las variables de (1) tamaño de partícula del producto; y (2) porcentaje de sólidos y tasa de mineral en la alimentación al hidrociclón (Yianatos <i>et al.</i> , 2002)	31
Figura 3.1.- Mineral recibido en el Laboratorio de Mineralurgia – PUCP.	34
Figura 3.2.- Zonas de toma de muestra.	34
Figura 3.3.- Composición mineralógica del mineral.	35

Figura 3.4.- Vista magnificada de una muestra representativa.....	35
Figura 3.5.- Molino de Bond en el laboratorio de Mineralurgia de la PUCP.....	37
Figura 3.6.- Circuito simulado en el ensayo del molino de bolas de Bond para determinar el Work Index. IPP: Ingreso y salida de mineral (Gupta, 2016).	37
Figura 3.7.- Procedimiento del ciclo de molienda en ensayo con Molino de Bolas de Bond para el cálculo del Work Index (Michaud, 2015).....	38
Figura 3.8.- Esquema técnico planta piloto del laboratorio de Mineralurgia de la PUCP.	41
Figura 3.9.- Planta piloto implementada en el laboratorio de Mineralurgia de la PUCP. (1) tolva de alimentación; (2) molino de bolas; (3) bomba centrífuga; (4) clasificador helicoidal.	42
Figura 3.10.- Componentes principales: (1) tolva, alimentador y motor; (2) molino de bolas, motor y transmisión; (3) bomba de pulpa y motor; (4) clasificador helicoidal, motor y transmisión.	44
Figura 3.11.- Instrumentación: (1) sensor de flujo másico y transmisor Emerson Micro Motion; (2) analizador de Redes Metrel; (3) balanza electrónica marca Mettler Toledo; (4) horno Gallenkamp.....	45
Figura 3.12.- Equipos adicionales: (1) trituradora marca Sturtevant; (2) tamizador mecánico de laboratorio marca Advantech; (3) cuarteadora de laboratorio de 20L; (4) cuarteadora de laboratorio de 5L.....	46
Figura 3.13.- Equipos adicionales: (1) cedazos de distintos tamaños de malla; (2) probeta graduada marca Isolab; (3) bandejas de distintos tamaños; (4) equipos de protección personal.....	46
Figura 3.14.- Distribución de tamaño de partículas de la muestra obtenida en el ensayo a la condición de 66%, en la réplica 1, en el tiempo de 5 minutos.	53
Figura 4.1.- Primera Réplica - Consumo de potencia del motor del molino de bolas para 3 porcentajes de sólidos.....	61
Figura 4.2.- Segunda Réplica - Consumo de potencia del motor del molino de bolas para 3 porcentajes de sólidos.....	62
Figura 4.3.- Consumo de energía promedio vs porcentaje de sólidos.....	65
Figura 4.4.- Primera Réplica - Porcentaje de pasantes de la malla 200 del producto para 3 porcentajes de sólidos.....	66
Figura 4.5.- Segunda Réplica - Porcentaje de pasantes de la malla 200 del producto para 3 porcentajes de sólidos.....	67

Figura 4.6.- Porcentaje de pasantes promedio vs porcentaje de sólidos.....	71
Figura 4.7.- Primera Réplica – Tasa de producto para 3 porcentajes de sólidos.....	72
Figura 4.8.- Segunda Réplica – Tasa de producto para 3 porcentajes de sólidos.....	73
Figura 4.9.- Tasa de producto promedio vs porcentaje de sólidos.	76
Figura 4.10.- Primera Réplica – <i>Work Index</i> de Operación para 3 porcentajes de sólidos	78
Figura 4.11.- Segunda Réplica - <i>Work Index</i> de Operación para 3 porcentajes de sólidos	79
Figura 4.12.- <i>Work Index</i> de Operación promedio vs porcentaje de sólidos.....	83
Figura 4.13.- Primera Réplica – Porcentaje pasante de la malla 200 vs Energía específica	85
Figura 4.14.- Segunda Réplica – Porcentaje pasante de la malla 200 vs Energía específica.	86
Figura 4.15.- Variación de la energía específica a diferentes porcentajes de sólidos (Fuente: Jankovic, 2003).	86
Figura 4.16.- Réplica 1 - Potencia promedio en el molino de bolas a distintos porcentajes de sólidos.	87
Figura 4.17.- Potencia para distintas densidades de pulpa (Gao <i>et al.</i> , 1996).	88

INTRODUCCIÓN

En el procesamiento de minerales, los procesos de trituración y molienda, también llamados conjuntamente procesos de conminución, son los que demandan un mayor consumo energético. La cantidad de energía utilizada solo en esta etapa, por ejemplo, equivale al 3% de la energía mundial (IM, 2021). Además, en el año 2000, casi la mitad de la energía global empleada en los procesos de conminución de productos minerales, fue consumida en la trituración y molienda del cobre y hierro, con valores de $3,6 \times 10^9$ kWh y $3,3 \times 10^9$ kWh, respectivamente (Fuerstenau, 2003).

En el Perú, el sector de minería e hidrocarburos es uno de los motores de desarrollo económico de la región. Este representa el 14,4% del PBI; el segundo más alto en orden de magnitud, solo detrás del sector de manufactura (EY, 2020). Tras sufrir una de las peores caídas económicas en el mundo por la pandemia, el país presenta, también, uno de los mejores prospectos de recuperación para el 2021; en el cual, la minería muestra una proyección de crecimiento anual de 11.0% de PBI. Asimismo, el Perú se ha posicionado en los últimos años como el segundo productor de cobre en el mundo, superando a China y por debajo, únicamente, de Chile. La producción anual de cobre en el 2019 fue de 2,4 millones de toneladas métricas, metal que lidera, en valor monetario, las exportaciones mineras del país (EY, 2021). En el Perú, las principales empresas mineras como Freeport McMoRan's (Cerro Verde), MMG (Las Bambas), Antamina y Southern Copper Corporation son responsables del 60% de toda la producción nacional de cobre (INEI, 2018).

Los costos de producción y las preocupaciones ambientales demandan cada vez un menor consumo de energía. Factores del circuito de molienda, como el porcentaje de sólidos en la alimentación del proceso, influyen en el consumo energético y el tamaño del producto. Es por ello que encontrar las óptimas condiciones de operación es de alta importancia en este sector productivo.

JUSTIFICACIÓN

Un factor relevante en el desarrollo de la molienda es el porcentaje de sólidos en la alimentación, que representa la proporción de mineral presente en la mezcla agua-mineral que ingresa al sistema (Gao, 1996). La variación de este impacta en diversos parámetros, entre ellos la potencia consumida por el molino y el tamaño del producto del circuito. Ver figuras I.1 y I.2.

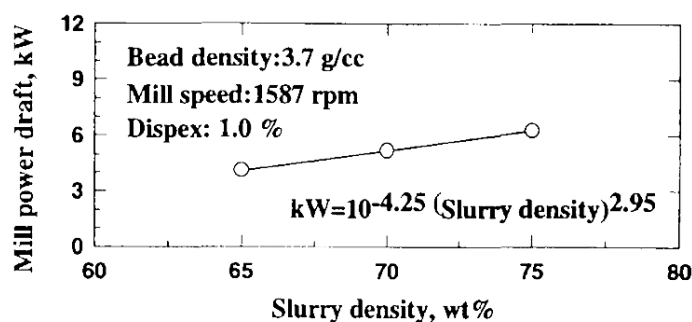


Figura I.0.1. Efecto del porcentaje de sólidos en la alimentación del circuito sobre la potencia de un molino (Gao, 1996).

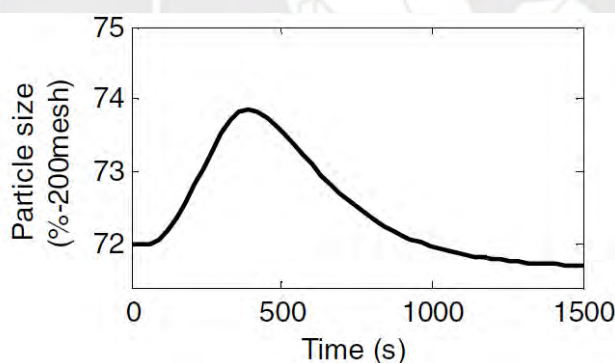


Figura I.0.2.- Variación en el tamaño del producto al variar el porcentaje de sólidos en la alimentación (Chen, 2007).

Una de las formas, y la más práctica, de variar este factor es mediante la manipulación del flujo de agua de entrada al circuito.

Los parámetros mencionados de consumo de energía y tamaño del producto; así como, la tasa de descarga del circuito y la interrelación entre estos tres factores, llamada *Work Index* de Operación, son parámetros que permiten analizar energéticamente y mineralógicamente el desempeño del circuito de molienda.

Asimismo, el *Work Index* de Operación obtenido en la planta puede ser comparado con uno estimado, hallado en laboratorio mediante el método del molino de Bond (1960). Esta comparación es un indicador que permite evaluar la eficiencia del circuito.

El presente trabajo está dedicado a estudiar las variaciones de los parámetros e indicadores mencionados; obtenidos en la molienda de pulpa cobre-agua, en una planta piloto a escala de laboratorio. El parámetro a modificar es la cantidad de agua en la alimentación al sistema y el objetivo, encontrar el valor que maximice la eficiencia del circuito y reduzca el consumo de energía.

Por otro lado, realizar estudios en una planta piloto a escala de laboratorio como la implementada en el siguiente trabajo, que cuenta con las condiciones de un equipo clasificador además del fragmentador, en un circuito cerrado, en molienda húmeda y en flujo continuo; permite representar de manera más aproximada los comportamientos en circuitos industriales; frente a investigaciones encontradas en la literatura donde se trabaja con solo dos o una de las condiciones indicadas.

HIPÓTESIS

Reducir el porcentaje de sólidos en la alimentación del circuito permitirá reducir el consumo de energía eléctrica en el molino entre 5% y 10%, sin afectar el tamaño del producto de descarga del circuito.

OBJETIVOS

OBJETIVO GENERAL

Analizar las variaciones en parámetros e indicadores energéticos y mineralógicos, al modificar el porcentaje de agua usado en la alimentación; y encontrar el valor que maximice la eficiencia del circuito y reduzca el consumo de energía en la molienda de una pulpa cobre-agua, en una planta piloto a escala de laboratorio, conformada principalmente por un molino de bolas y un clasificador helicoidal.

OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Caracterizar el mineral a moler.
- Determinar el rango y cantidad de valores a usar en la variable de manipulación, definir el método de medición para los parámetros a analizar y elaborar un protocolo de pruebas experimentales.
- Implementar e instrumentar la planta piloto a escala de laboratorio, en circuito cerrado, molienda húmeda y flujo continuo.
- Cuantificar los parámetros de consumo energético del molino, tamaño y tasa de producto y *Work Index* de Operación, para cada condición de porcentaje de sólidos; así como, comparar los resultados con el indicador obtenido con el método de Bond.
- Contrastar los resultados hallados con los reportados en la literatura.

CAPÍTULO 1

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

En el presente capítulo se abordarán los conceptos necesarios para la correcta comprensión del trabajo de tesis desarrollado.

1.1 Panorama general

El procesamiento de minerales consiste en una serie de etapas por las que un mineral atraviesa, desde su estado inicial, como materia prima, hasta su estado final, como producto refinado e insumo de nuevos procesos.

Como se muestra en la figura 1.1, el mineral es, inicialmente, extraído de las minas en grandes bloques llamados menas, que están constituidos por tierra y mineral. Luego, en el proceso de reducción de tamaño, conocido como conminución o fragmentación, estas unidades son quebradas hasta fragmentos pequeños para que, posteriormente, en el proceso de separación, sea extraída la materia útil de la merma. Esta última etapa, usualmente, es realizada en plantas independientes a las de conminución y en procesos que, dependiendo del tipo de mineral, pueden ser usados o no.

La fase de fragmentación consta, dependiendo del mineral y el tamaño de la mena extraída de la mina, de los procesos de trituración y molienda. Estas, a su vez, tienen etapas primarias, secundarias, terciarias y sucesivamente, dependiendo de las veces que el mineral debe ser reducido de tamaño (Fueyo, 2002).

Durante la trituración, también llamada chancado, el material de entrada es la mena que ha sido extraída directamente de la mina y el producto de salida es el mineral fraccionado en tamaños más pequeños. No obstante, la trituración por sí sola, no suele ser suficiente para liberar el mineral, pues los fragmentos alcanzados, en el orden de los milímetros, requieren aún mayor fractura (Gupta & Yan, 2016).

En base a ello, en la fase de molienda, se alimenta el mineral obtenido de la etapa de trituración y se moltura, también de manera mecánica, las partículas hasta tamaños en el orden de las micras. La molienda es usada habitualmente en el nivel de los minerales metálicos y su finalidad es la de reducir la materia inicial a una finura, tal que proceso de separación pueda obtener la recuperación y calidad de mineral requeridos. Esta etapa requiere gran inversión de capital y es, frecuentemente, el área de máxima utilización de potencia y de materiales resistentes al desgaste de una planta (Fueyo, 2002; O'Keefe *et al.*, 2014).

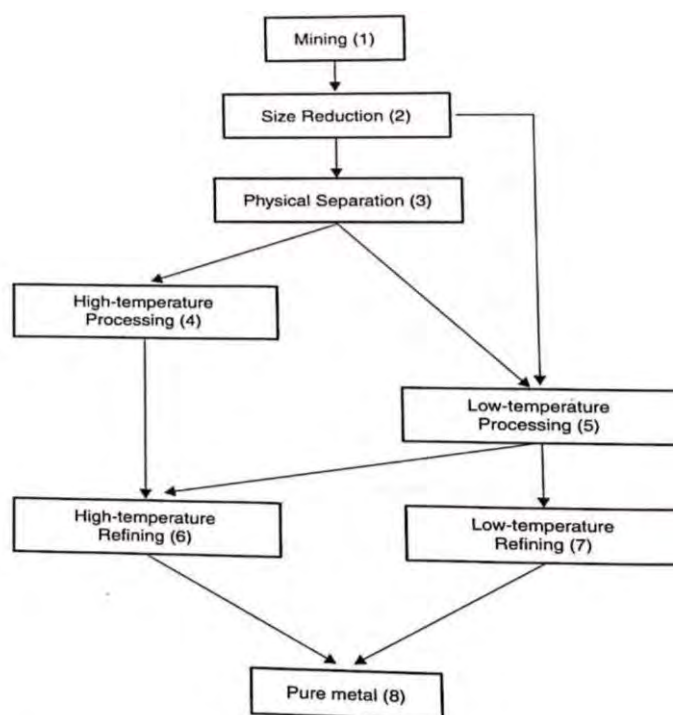


Figura 1.1.- Diagrama de procesamiento de minerales (Fuerstenau, 2003).

De manera general, el mayor desafío para el procesamiento de minerales es producir concentrados de alto grado, de manera constante, a la máxima recuperación del cuerpo de la mena (Gupta & Yan, 2016) y con el mínimo de inversión; es decir, obtener el producto final, con el mínimo desperdicio y al menor costo.

1.1.1 Molienda

Los mecanismos básicos de molienda son impacto y abrasión (Fueyo, 2002). Estos se dan en el interior de un fragmentador o equipo de fragmentación; el cual es, generalmente, un molino. Para una operación en aplicaciones industriales, este equipo debe trabajar dentro

de un circuito, un circuito de molienda, que puede ser diseñado de distintas formas. Estas diferencias en el proceso de molienda se dividen en varias clasificaciones.

En el segmento sucesivo se revisa el circuito de molienda, sus clasificaciones y componentes principales.

1.2 Circuito de molienda

Definición

Un circuito de molienda es el diseño de la combinación de equipos que conforman la planta de molienda y del recorrido por el que el material circula. Este diseño, de acuerdo a las condiciones con las que opera, entra en diversas clasificaciones. Las principales y más relevantes para el presente trabajo de tesis se desarrollan en las siguientes líneas.

Tipos de circuito

La primera clasificación es de acuerdo al uso de agua o líquido de dilución. Se tienen dos tipos:

- Circuito en molienda seca;
- Circuito en molienda húmeda.

La molienda seca se desarrolla sin un líquido de dilución presente en el proceso de conminución; mientras que la molienda húmeda sí se desarrolla con uno, generalmente agua, que, en combinación con el mineral, forma lo que se llama pulpa o pulpa mineral.

La elección de una u otra opción depende del material a moler, así como de las características y posibilidades que proporciona la planta. La molienda seca implica menor inversión en el diseño y gastos por desgaste debido a la corrosión. Sin embargo, la vía húmeda presenta ventajas notables como, entre las principales, la disminución de temperatura, polvo y resistencia de fragmentos, y el mejor manejo en la clasificación volumétrica.

La segunda clasificación depende de la recirculación en el circuito. Se tienen dos posibilidades:

- Circuito abierto;
- Circuito cerrado.

En un circuito abierto el material pasa directamente a la siguiente etapa de procesamiento sin pasar por ninguna recirculación; es decir, ninguna fracción vuelve al interior del fragmentador después de salir de este. El modelo más sencillo es con solo un fragmentador; no obstante, una mejora posible es colocar un equipo de clasificación antes de la entrada, con lo que el producto fino es separado antes de ingresar (ver figura 1.2). En el circuito cerrado, más usado en la industria, sí se desarrolla una recirculación del mineral. El material con el tamaño deseado pasa al siguiente proceso; mientras que, las partículas con tamaño superior al de referencia regresan al molino para una nueva molienda hasta lograr las dimensiones buscadas (Fueyo, 2002). En este caso, un clasificador es necesario y puede ser colocado en la entrada o en la salida del fragmentador (ver figura 1.3).

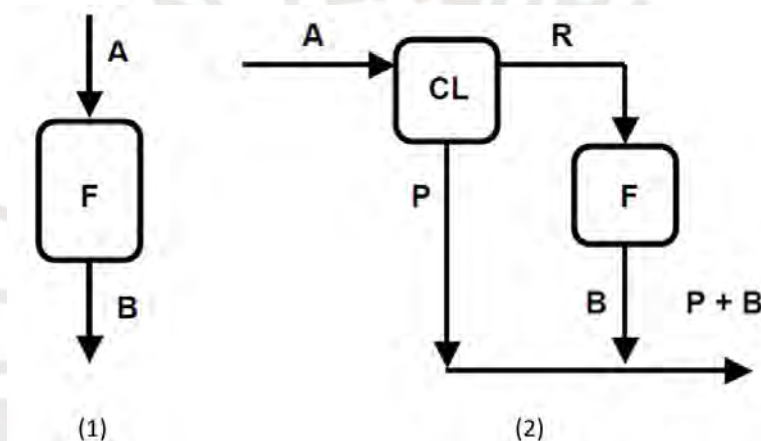


Figura 1.2.- Circuitos abiertos. (1) Solo fragmentador. (2) Clasificador-Fragmentador. F: Fragmentador; CL: Clasificador; A: Alimentación; B: Producto molido; P: Partículas de tamaño menor al valor de control; R: Partículas de tamaño mayor al valor de control.

El inconveniente más importante del circuito abierto es la menor eficiencia respecto al circuito cerrado; es decir, requiere más potencia para que todos los productos contengan la misma granulometría. Esto es debido a una mayor presencia de partículas con un tamaño menor al del producto objetivo tras la molienda, pues los elementos de molienda del molino deben romper el mineral hasta que todas partículas pasen la malla establecida, incluidas las que ya llegaron al tamaño que se busca. Lo que significa mayor consumo de energía. La ejecución, mantenimiento e instalación, sin embargo, son más simples (Fueyo, 2002).

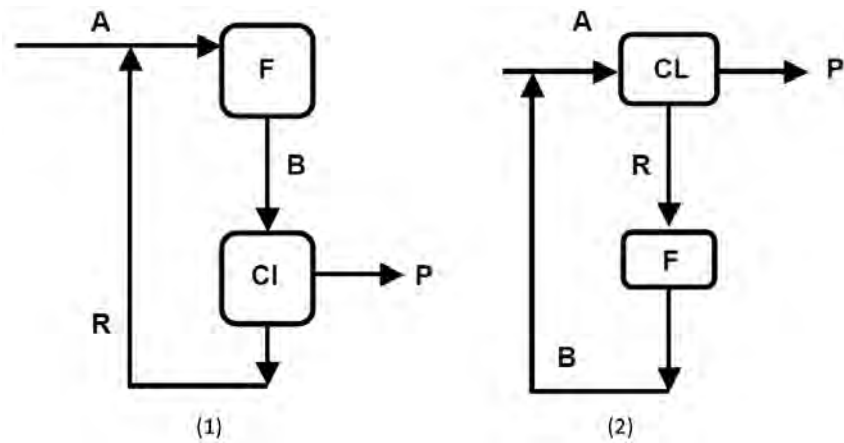


Figura 1.3.- Circuitos cerrados. (1) Fragmentador-Clasificador. (2) Clasificador-Fragmentador.

Dependiendo del tipo de flujo, se puede desarrollar:

- Circuito en flujo discontinuo o en *batch*;
- Circuito en flujo continuo.

Un circuito en *batch*, implica que el mineral se trabaja en lotes o de grupo en grupo. Se llena el mineral en el fragmentador, se muele durante un tiempo establecido y, posteriormente, se retira del equipo. Luego de ello, el ciclo vuelve a comenzar con un nuevo conjunto de mineral o pulpa. En flujo continuo, como su denominación lo señala, el mineral o pulpa transcurre de manera ininterrumpida a lo largo del circuito.

Indudablemente, trabajar en flujo continuo supone una mayor productividad, motivo principal de que sea el más usado en la industria; no obstante, implica también una mayor inversión.

Por último, dependiendo de la etapa en la que se encuentra el mineral, son posibles:

- Circuito en molienda primaria;
- Circuito en molienda secundaria;
- Circuito en molienda terciaria.

En esta clasificación es evidente que la diferencia sea de acuerdo al orden. Es primaria, si no ha habido una molienda anterior a la que se desarrolla; secundaria, si es luego de una primaria; y terciaria, aunque muy inusual, si es después de 2 moliendas previas. Una

cuaternaria, o inclusive mayor en orden de sucesión, es muy improbable debido al alto costo que supone desarrollar cada circuito de molienda, a la baja relación de reducción y la poca rentabilidad que serían logrados.

El grado de reducción necesario, es decir la relación entre el tamaño de partícula en la alimentación del circuito y el del producto requerido, es el principal factor que determina si es necesaria solo una molienda primaria o una primaria y secundaria (Fueyo, 2002).

Componentes principales

Los componentes principales son: el fragmentador, generalmente un molino de bolas o de barras; y el separador, que suele ser un clasificador helicoidal o un hidrociclón.

Caso de estudio

Para el presente trabajo de tesis, es de especial interés un circuito cerrado, en molienda húmeda y primaria y con flujo continuo; así como, los equipos de molino de bolas y clasificador helicoidal y agua como líquido de dilución.

El diseño de un circuito básico de estas características, se puede observar en la figura 1.4.

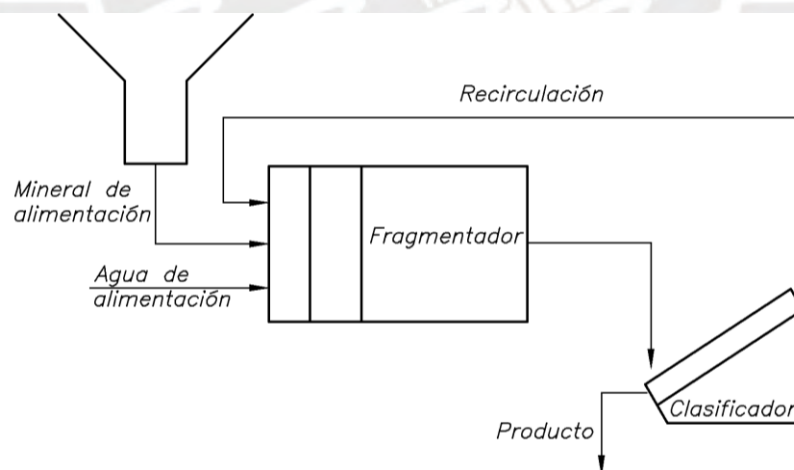


Figura 1.4.- Circuito cerrado, en molienda húmeda y primaria, con flujo continuo.

Factores

El grado de molienda en un circuito está influenciado por factores: i) propios del circuito, tamaño de mineral en la entrada y salida, la velocidad de alimentación de agua y mineral; ii) factores propios del molino, la velocidad de rotación del cilindro, sus dimensiones,

densidad y número de las bolas (Sushant & Archana, 2013); iii) factores del clasificador, tipo de clasificador, regulación; iv) factores del mismo material, composición, densidad.

Los factores propios del circuito se desarrollan a continuación.

1.2.1 F₈₀

La medida F₈₀ es el tamaño de malla o tamiz, en micrones, por el que pasa el 80% de partículas de la alimentación del circuito.

1.2.2 P₈₀

La medida P₈₀ es el tamaño de malla o tamiz, en micrones, por el que pasa el 80% de partículas del producto del circuito.

1.2.3 Tasa de alimentación de mineral

La tasa de alimentación de mineral es el flujo másico de mineral que se suministra al sistema. Esta depende de la capacidad del molino; así como, del equipamiento que se emplee.

Para sistemas con flujo continuo, el equipamiento es más complejo, pues debe suministrar a una tasa constante; mientras que para sistemas en *batch* puede ser más simplificado.

1.2.4 Tasa de alimentación de agua

La tasa de alimentación de agua es el flujo másico de agua que se suministra al circuito de molienda. Esta depende de la tasa de alimentación de mineral y del porcentaje de sólidos en la alimentación que se haya establecido.

De manera análoga a la tasa de alimentación de mineral, para sistemas con flujo continuo, la infraestructura es más compleja, pues se debe suministrar a una tasa constante.

1.2.5 Porcentaje de sólidos en la alimentación

En el caso de una molienda húmeda, el porcentaje de sólidos es la relación entre el peso de solo el mineral respecto al peso de la pulpa agua-mineral.

El porcentaje de sólidos en la alimentación es una variable que puede ser manipulada en un rango específico.

$$ss = \frac{\dot{m}_{\text{mineral}}}{\dot{m}_{\text{mineral}} + \dot{m}_{\text{agua}}} \quad (1.1)$$

donde,

ss = Porcentaje de sólidos [%];

\dot{m}_{mineral} = Flujo másico de mineral de alimentación [g/s];

\dot{m}_{agua} = Flujo másico de agua de alimentación [g/s].

1.2.6 Tasa de descarga de producto

Es el flujo másico del mineral que sale del sistema. Tomando como base un balance de masas, la salida debe ser igual a la entrada; por lo que, la tasa de descarga de producto debe ser igual a la tasa de alimentación de mineral.

1.2.7 Eficiencia de un circuito de molienda

Como se mencionó previamente, es un factor de interés analizar cuán eficientemente se utiliza la energía en la molienda; así como, la forma de medición de este parámetro.

Existen 2 enfoques básicos para evaluar la eficiencia energética en la conminución.

Respecto a la energía asociada con la nueva superficie creada

El primero consiste en comparar la energía de entrada respecto a la energía asociada con la nueva superficie creada. Este aumento en la energía de la superficie se calcula multiplicando el área de la nueva superficie creada, en metros cuadrados, por la tensión superficial expresada como energía, en $\text{J}\cdot\text{m}^{-2}$. Sobre esta base, la eficiencia calculada es tan pequeña como el 1% (Lowrison, 1974).

Es por ello que este método puede no ser una base totalmente apropiada, pues parte de la energía de entrada se utiliza en deformar partículas y crear microfisuras (sin roturas) y la nueva superficie creada tiene más energía que la superficie original.

Otras medidas usan una comparación con un "estándar" (Wills & Finch, 2016).

Respecto al Work Index de Bond

Un segundo enfoque es el empleo de un estándar ya en uso y conocido que es el *Work Index*, W_i , hallado en laboratorio mediante el método de Bond; el cual puede ser comparado con el *Work Index* de operación, W_{io} (Wills & Finch, 2016); que es el valor obtenido en planta. El *Work Index* es un parámetro energético que indica la energía usada para la reducción de tamaño del mineral.

F. C. Bond estableció una relación general entre la energía, por tonelada, requerida para la reducción de tamaño; y el tamaño del mineral en la alimentación y en el producto. Asimismo, descubrió un valor de exponente de 0.5 y un factor para el escalamiento de las medidas en el laboratorio al desempeño del equipo en planta. Estos factores fueron interrelacionados en la ecuación para la energía específica de conminución (Bond, 1961).

$$W_{Esperado} = W_i * \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (1.2)$$

donde,

$W_{Esperado}$ = Energía específica esperada [kWh/t];

W_i = *Work Index* medido en el laboratorio [kWh/t];

P_{80} = Tamaño de paso de malla del 80% del producto del circuito [μm];

F_{80} = Tamaño de paso de malla del 80% de la nueva alimentación [μm].

El *Work Index* de operación, W_{io} , se obtiene de la relación entre la energía específica y los valores de F_{80} y P_{80} del circuito.

$$W_{Planta} = W_{io} * \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right) \quad (1.3)$$

donde,

W_{Planta} = Energía específica de operación [kWh/t];

W_{io} = *Work Index* de operación [kWh/t].

Para medir la eficiencia de la planta se debe cuantificar la energía específica que utiliza el circuito de molienda de la planta. Esta se obtiene al relacionar la potencia aplicada al eje del piñón del molino, tras las correcciones por pérdidas eléctricas y mecánicas, y la tasa de producto del sistema. (Wills & Finch, 2016).

$$W_{Planta} = \frac{P_e * \eta_{elec} * \eta_{tr}}{\dot{m}_{prod}} * \frac{10^6}{3600} \quad (1.4)$$

donde,

W_{Planta} = Energía específica de operación [kWh/t];

P_e = Potencia efectiva eléctrica [kW];

η_{elec} = Eficiencia por pérdidas eléctricas;

η_{tr} = Eficiencia por pérdidas en la transmisión;

\dot{m}_{prod} = Flujo másico del producto seco [g/s].

La relación entre el *Work Index* determinado por el laboratorio y el de operación, W_i / W_{io} , es la medida de la eficiencia en relación con el estándar (Wills & Finch, 2016). Esta proporción excederá el 100% para circuitos más eficientes y será menor para los menos eficientes (Rowland & McIvor, 2009).

Cabe destacar que la principal desventaja de este método es que no provee indicación específica de las causas de las diferencias en las eficiencias de los circuitos (Rowland & McIvor, 2009).

1.3 Molino de bolas

Principio de funcionamiento

Con el objetivo de llegar a la liberación del mineral, tras la trituración, se continúa con la reducción de tamaño de las partículas, a través de la molienda del mineral, en equipos como molinos tubulares, de martillos o de rodillos.

Los más usados en la industria son los molinos tubulares. En estos, un medio de molienda o también llamados elementos molturantes, como bolas de acero o cerámica, barras de acero, piedras duras o el mismo mineral; imparten las fuerzas necesarias para la fragmentación de las partículas (Gupta, 2016). Si son bolas de acero o cerámica, es un molino de bolas; si son barras, un molino de barras; y, si son piedras duras o las mismas partículas del mineral, un molino de guijarros o autógeno.

Al girar un molino tubular, cargado de mineral y medios de molienda, eleva la carga, por efecto de la fricción, contra el perímetro del molino, en la dirección del movimiento. Luego, al alcanzar cierta altura, una parte de esta carga desciende en cascada hasta el fondo del molino; mientras que otra tiende a deslizarse hacia abajo. Ambas fracciones, tras finalizar su caída, se reordenan y se desplazan, nuevamente, en la dirección del giro del equipo, reiniciando de esta forma el ciclo (ver figura 1.5). La acción de fragmentación por colisiones entre partículas, es el mecanismo de impacto y, el desgaste por la erosión que genera el rozamiento entre superficies, es el de abrasión. Dentro del proceso de molienda en el molino tubular, la rotura y reducción de tamaño se produce por medio de la acción combinada de ambos mecanismos. Los medios caen repetitivamente sobre las rocas minerales y, si se da el tiempo suficiente, libera el material de interés (Gupta, 2016).

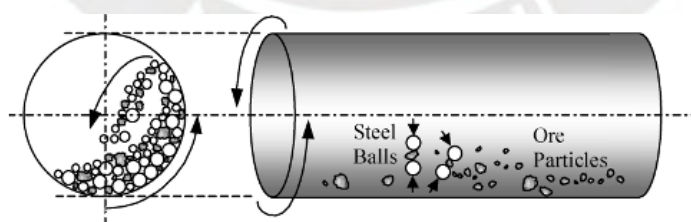


Figura 1.5.- Principio de funcionamiento de un molino de bolas (Gupta, 2016).

Composición del molino de bolas

Un molino de bolas se compone, principalmente, de un tambor cilíndrico de acero que, en tamaños industriales, suele ser de 2 a 5 metros de diámetro y 3 a 15 metros de longitud; y de bolas de acero o de cerámica, de hasta 25 cm de diámetro, dentro de este.

Internamente, el molino suele tener revestimientos de diversos materiales posibles, como protección ante el desgaste y los impactos; así como, en muchos casos, elevadores o también llamados levantadores, para ayudar en la subida de la carga. El tambor gira por medio de un conjunto motor (eléctrico o a combustión) y reducción, o mediante la inducción del giro en un conjunto estator-rotor ensamblado directamente en un extremo del eje del mismo molino. En cualquier caso, el consumo de energía de un molino puede llegar hasta el orden de 1 MW (Fueyo, 2002).

Asimismo, los chutes o conductos de entrada y salida son parte esencial del equipo. La materia prima es alimentada al molino por el lado de entrada del tambor, mediante un alimentador y, por el lado de salida, el material molido es descargado (Perov, 1990).

Otros componentes son las chumaceras, rodamientos, rejillas de retención, así como los sistemas de lubricación, enfriamiento y frenado.

Tipos de molinos de bolas

Los molinos de bolas, y los tubulares en general, se dividen, principalmente por el tipo de descarga (ver figura 1.6). Se tienen:

- Descarga por rebose;
- Descarga por diafragma o rejilla de rebose;
- Descarga central.

El molino con descarga por rebose recibe la alimentación por un extremo y el producto sale, por desbordamiento, por el otro. Este tipo es más adecuado para moliendas finas a tamaños de 74 a 106 micrones. El molino con descarga por diafragma o rejilla de rebose es también alimentado por un extremo; pero, en la salida, cuenta con una malla o parrilla que impide que pasen partículas de tamaños mayores al de las aberturas, con la finalidad de que sigan siendo molidas. Estas son más adecuadas para moliendas a dimensiones de 150 a 250 micrones. Por último, el molino con descarga central es alimentado por ambos extremos y la abertura de descarga se encuentra en el centro del equipo (Gupta, 2016).

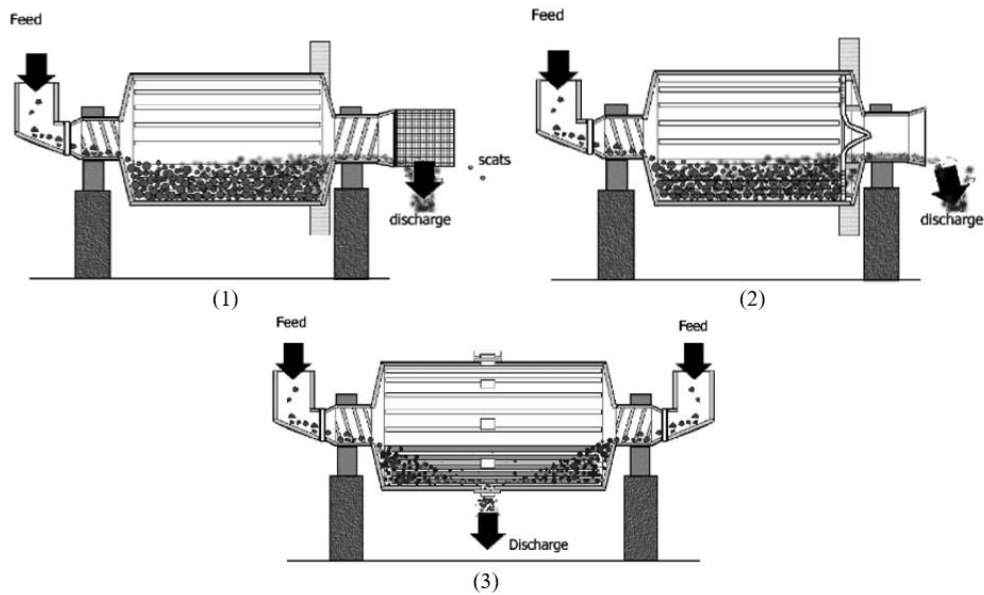


Figura 1.6.- Molino tubular con descarga (1) por rebose, (2) por diafragma o rejilla de rebose y (3) central (Gupta, 2016).

Factores

Los factores propios del molino como, potencia, velocidad de giro y volumen de medios de molienda, se muestran en las siguientes líneas.

1.3.1 Potencia de molino

La energía suministrada a un molino se consume principalmente en el movimiento de los medios y, en menor grado, del mineral. Asimismo, se requiere energía para girar el casco (en la práctica una volante) y en superar la fricción de la transmisión. Los cinco componentes que determinan la potencia tomada por el molino son el diámetro, la longitud, el volumen de carga, la velocidad y el tipo de tambor (Kelly, 1990).

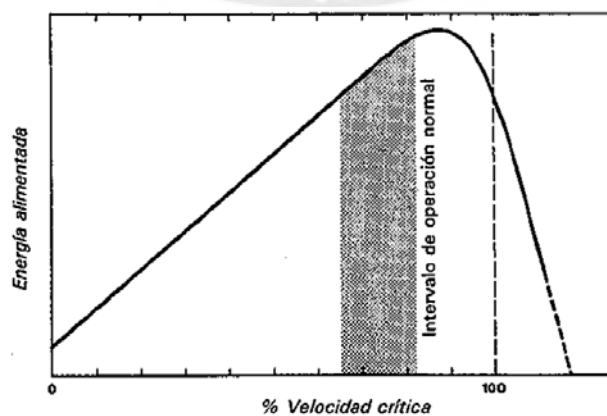


Figura 1.7.- Efecto de la velocidad del molino en el consumo de potencia (Kelly, 1990).

La figura 1.7 muestra el efecto de la velocidad del molino sobre el consumo de potencia. Se puede observar que el rango de operación normal es entre 65% y 82%, aunque, en la práctica sea entre 70% y 80% (Fueyo, 2002).

1.3.2 Velocidad crítica

La velocidad crítica es la velocidad a la que la fuerza centrífuga contrarresta la acción de la gravedad sobre la masa de molienda (Fueyo, 2002). El valor está dado por la siguiente relación de Coghill:

$$CS = \frac{42.305}{\sqrt{D}} \quad (1.5)$$

donde,

CS = Velocidad crítica [rpm];

D = Diámetro interior del molino [m].

En la práctica, un molino de bolas debe girar a 70-80% de su velocidad crítica, en función del diámetro interno del molino. (Fueyo, 2002). La tabla 1.1, muestra los porcentajes promedio de velocidad crítica propuestos por Fueyo, en función del diámetro interno del molino.

Tabla 1.1.- Porcentaje promedio de velocidad crítica en función del diámetro del molino de bolas (Fueyo, 2002).

Diámetro molino interior forros	% de velocidad crítica
<u>Metros</u>	<u>Molino de bolas</u>
0,91 - 1,83	80 - 78
1,83 - 2,74	78 - 75
2,74 - 3,66	75 - 72
3,66 - 4,57	72 - 69

1.3.3 Volumen de los medios de molienda

El volumen de los medios de molienda o elementos molturantes se representa mediante el porcentaje del volumen que ocupan en el interior del molino, tomando en consideración

los espacios huecos que existen entre ellos (Kelly ,1990). El valor se puede obtener aproximadamente a través de la siguiente ecuación:

$$V = 113 - 126 \times \frac{H_C}{D_M} \quad (1.6)$$

donde,

V = Volumen de la carga [%];

H_C = Distancia interior de la parte superior del molino a la parte superior de la carga estacionaria [m];

D_M = Diámetro del molino por el interior del blindaje [m].

En la figura 1.8 se observa el rango práctico de operación del volumen de carga. Este rango se encuentra entre el 30 y 50%.

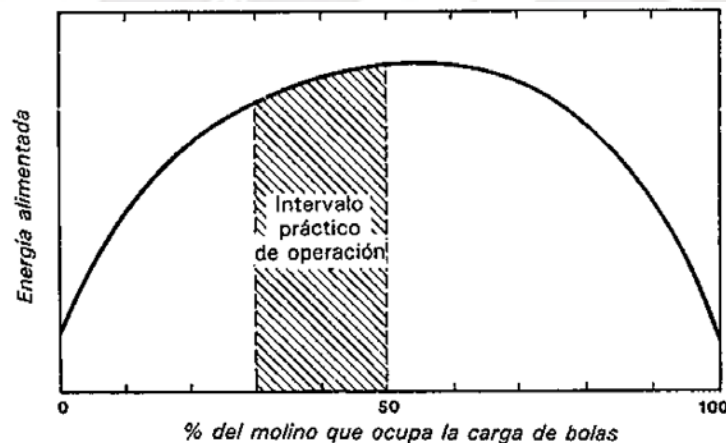


Figura 1.8.- Potencia consumida por un molino de bolas en función del volumen de carga del molino (Kelly, 1990).

1.3.4 Otros factores

Algunos factores adicionales que tienen influencia en la molienda dentro de un molino de bolas son el tamaño y forma de los medios de molienda; el material y forma constructiva del revestimiento interno o blindaje; el desgaste, tanto de los medios, como del blindaje; elevadores o levantadores que ayudan a levantar la carga; entre otros.

1.4 Clasificador helicoidal

Principio de funcionamiento

La clasificación es una de las formas de separación de partículas por tamaños (otra es, por ejemplo, el cribado y tamizado). En esta, el proceso de separación se da según su rapidez de asentamiento en un fluido; a diferencia del cribado y tamizado, donde es en base solamente al tamaño de la partícula respecto a los agujeros de una superficie perforada. La clasificación es empleada para la separación entre partículas de tamaños relativamente gruesos y finos, de manera general, en situaciones donde la dimensión de los fragmentos de menor tamaño es demasiado pequeña para realizar una segregación viable económicamente mediante el cribado (Kelly, 1990).

Tipos de clasificadores

Los equipos clasificadores generan dos productos; uno, llamado arenas o sobretamaño, de asentamiento más rápido; y el otro, derrame o lamas, de asentamiento más lento. Las arenas contienen, por lo general, poca agua; lo que implica que se separe la corriente del dispositivo por gravedad, medios mecánicos o presión inducida. Las lamas, con las partículas más pequeñas en el agua restante, se descargan como consecuencia del desplazamiento que ejerce sobre ella la alimentación de entrada (Kelly, 1990). Estas partículas son el producto del circuito.

Los clasificadores se caracterizan por dos aspectos que se sobreponen. Uno de ellos es el método de descarga del producto arenoso (Kelly, 1990), que se subdivide en:

- Mecánicos;
- No mecánicos.

Los clasificadores mecánicos utilizan ciertos medios mecánicos para retirar el producto arenoso del dispositivo. Estos mecanismos trabajan, generalmente, contra la gravedad. Los clasificadores no mecánicos, por otro lado, se apoyan, en cuanto a la descarga de las arenas, en las propiedades de flujo de la corriente de arenas, ayudadas por las fuerzas de gravedad o centrífugas (Kelly, 1990).

El otro aspecto es el punto de referencia para el movimiento relativo agua/partícula, clasificado en:

- De sedimentación;
- De lecho fluidizado.

En los clasificadores de sedimentación, las partículas de asentamiento más rápido se precipitan a través de un cuerpo de agua que se forma fuera de la corriente de alimentación. En los clasificadores hidráulicos o de lecho fluidizado la partícula se precipita en contra de una corriente suplementaria ascendente de agua o líquido de dilución, a presión (Kelly, 1990).

Dentro de estas clasificaciones, un clasificador helicoidal es del tipo mecánico y de sedimentación.

Composición del clasificador helicoidal

La figura 1.9 muestra el esquema de un clasificador helicoidal. En este, la clasificación tiene lugar cerca del extremo profundo del estanque inclinado y alargado (Kelly, 1990). El mecanismo de espiral levanta las arenas del tanque y descarga el material grueso por el extremo más alto del equipo; mientras que el material más fino es descargado por el extremo opuesto, donde desemboca el estanque.

Este sistema se puede utilizar para la molienda húmeda y continua, en circuito cerrado (Kelly, 1990).

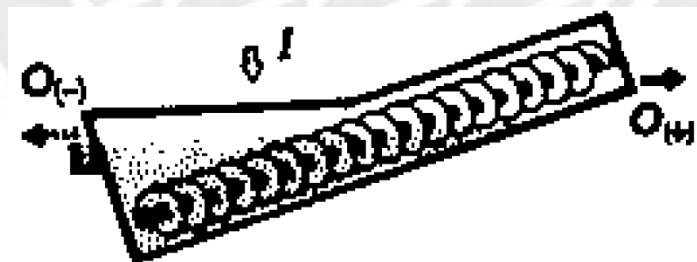


Figura 1.9.- Clasificador helicoidal (Kelly, 1990). I: Ingreso de pulpa o alimentación; O(-): Salida de lamas o producto; y O(+): Salida de arenas o partículas de recirculación (Kelly, 1990).

El clasificador se compone de la hélice, el eje, la canoa, el sumidero o depósito, la canaleta de alimentación y los labios o topes regulables. Otros componentes, como las chumaceras, rodamientos; así como, el soporte y el sistema de lubricación también componen unidad.

Factores

El factor de la altura de descarga se desarrolla a continuación.

1.4.1 Altura de descarga

Al realizar un estudio del clasificador helicoidal se observan diversas regiones. Las de mayor interés para la descarga de producto son las A y B (ver figura 1.10). La región A es la región situada arriba de la espiral, en donde la densidad de la pulpa es baja y las partículas van principalmente al derrame. La espiral gira en el cuerpo principal del estanque (región B) desde el cual las partículas pueden salir por el derrame o por la descarga de arenas (Kelly, 1990).

Las dimensiones del equipo y la altura de los labios o topes regulables, por lo tanto, influenciarán en las dimensiones de ambas zonas y en el tamaño del producto de salida.

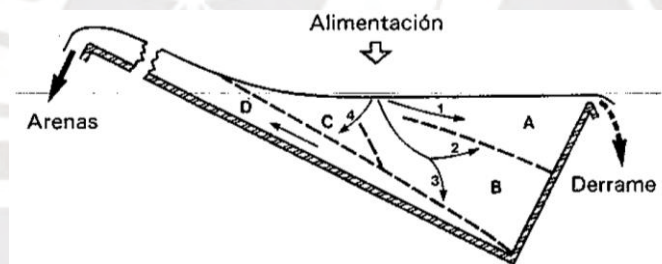


Figura 1.10.- Regiones principales de un clasificador helicoidal (Kelly, 1990).

1.5 Mineral

El mineral del circuito es una condición dada por su propia naturaleza y que no puede ser manipulada. Conocer el mineral y sus características proporciona información para la molienda y para comparaciones con otros materiales similares. Generalmente, los minerales no se encuentran en las minas en estado puro, sino suelen estar constituidos por varios materiales; por lo que, conocer el porcentaje de los componentes es también información importante. Por otro lado, la densidad es un factor que también influye en el llenado volumétrico del molino. A mayor densidad; mayor masa y, por tanto, tasas de alimentación y producto posibles.

CAPÍTULO 2

ESTADO DEL ARTE

A lo largo de los años, se ha buscado reducir el consumo energético de la planta de procesamiento de minerales, tomando especial atención en aumentar la eficiencia de los componentes que más energía requieren para su trabajo, como es el molino de bolas. Las orientaciones son diversas, tales como el enfoque en variaciones en el medio de molienda, variaciones en la velocidad de rotación del molino, aumento o reducción del porcentaje de sólidos, sistemas de control, entre otros.

En el presente capítulo se realiza un consolidado de diversas investigaciones desarrolladas en los últimos años en relación al tema de tesis desarrollado.

Zixin *et al.*, en el año 2019, realizó experimentos con una bola instrumentada en un molino de bolas de laboratorio, en circuito abierto y en *batch*; con el objetivo de investigar los efectos de la velocidad del molino y la cantidad de agua de la mezcla dentro del molino, sobre la dinámica de la carga en la de molienda.

Se probaron 3 velocidades, 60, 70 y 80% de la velocidad crítica; y 7 valores de U, llenado de pulpa en el molino, que representa específicamente la fracción de espacios entre los intersticios de las bolas de molienda, 0, 0.5, 1, 1.5 2, 2.5 y 3, donde 0 es la condición de molienda seca y de 0.5 en adelante, molienda húmeda con mayor cantidad de agua al incrementar el número.

Lo que los autores encontraron es que la energía cinética rotacional promedio aumenta con la velocidad del molino (ver figura 2.1.), debido a que el molino proporciona mayor energía a la bola de molienda. Asimismo, la molienda húmeda puede aumentar la eficiencia de molienda respecto a la seca, pero la formación de una piscina de pulpa mineral, al incrementar el llenado de pulpa, U, (el porcentaje de agua en la pulpa) por encima de 1.5, debe ser evitada, dado que la fuerza disminuye.

Por otro lado, la fuerza aplicada promedio (ver figura 2.2), que representa la colisión entre las bolas de molienda, incrementó de 60 a 70%, pero disminuyó de 70 a 80%. Esto se fundamenta en que, al aumentar la velocidad del molino, aumenta la frecuencia de colisiones; pero, un incremento excesivo, disminuirá la fuerza promedio aplicada, pues la parte externa de la carga de bolas empieza a centrifugar y no muele a la misma capacidad. De igual manera que la figura 2.1, la figura 2.2 muestra también que la fuerza promedio aplicada en molienda húmeda es mayor comparada a la seca, pero en el rango de llenado de pulpa de 0 a 1.25. La pulpa aumenta la fuerza de las colisiones; sin embargo, al formarse la piscina, la fuerza de arrastre y flotabilidad reducen la fuerza y eficiencia.

Finalmente, en la figura 2.3, se presenta la potencia consumida por el molino. En esta gráfica se puede observar que la potencia aumenta con la velocidad de rotación del equipo. Para los valores de 0 a 1.5 de llenado de pulpa, la potencia también se incrementó progresivamente junto con la frecuencia de giro del molino, pues la pulpa fue llenando de manera gradual los intersticios (espacios entre bolas) de las bolas de molienda. Sin embargo, de 1.5 a 3.0, se formó una piscina que ocasionó que la potencia del molino disminuya. La explicación esbozada por los autores es que una parte de la carga de la piscina contrarresta (a modo de contrapeso) el toque generado por la carga del molino; lo que reduce su valor y, por ende, también, la potencia del molino.

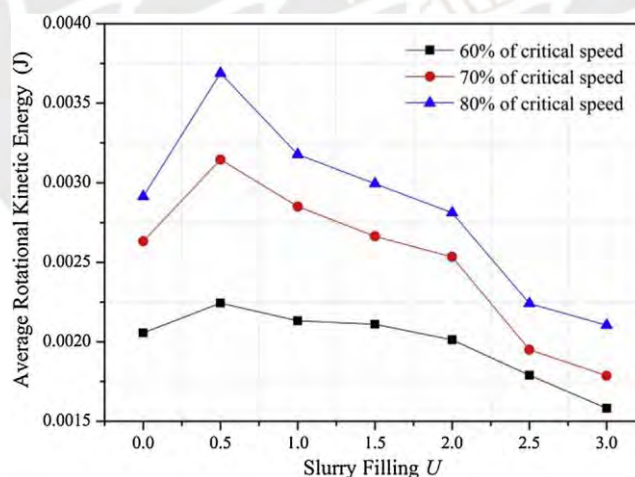


Figura 2.1.- Efecto del llenado de pulpa en la energía cinética rotacional promedio a diferentes velocidades (Zixin *et al.*, 2019).

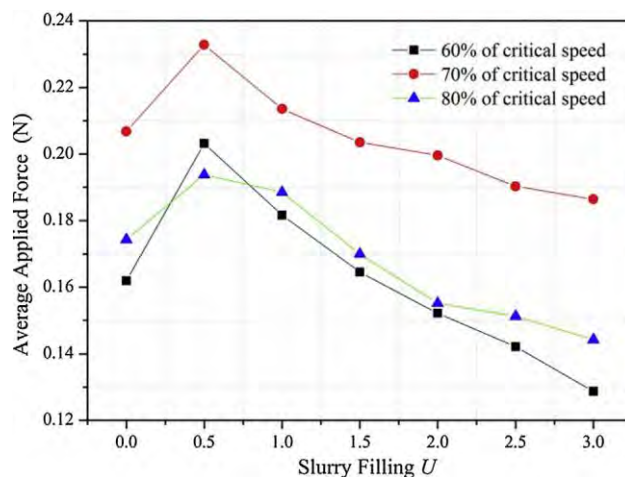


Figura 2.2.- Efecto del llenado de pulpa en la fuerza aplica promedio a diferentes velocidades (Zixin *et al.*, 2019).

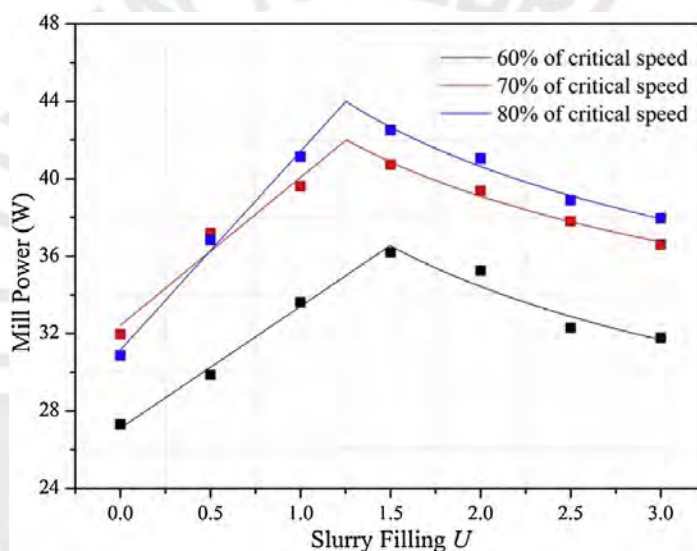


Figura 2.3.- Efecto del llenado de pulpa en la potencia del molino a diferentes velocidades (Zixin *et al.*, 2019).

Conger *et al.* (2018) realizaron ensayos experimentales con el objetivo de determinar el tamaño de la carga o elementos molturantes (bolas de acero, en este caso), que maximiza la eficiencia de un molino de bolas dado.

En primer lugar, utilizando la variable de energía específica de tasa de molienda acumulada (*energy specific cumulative grinding rate*, en inglés), que busca mostrar la energía empleada para romper el mineral hasta cada tamaño de partícula, encontró que el tamaño de las esferas más adecuado depende del tamaño del producto (P_{80}) del circuito

elegido. Es decir, para un mismo mineral, a ciertos tamaños, la eficiencia en la molienda puede resultar la misma con distintos tamaños de bolas de acero; mientras, que a otros tamaños de partícula sí se pueden desempeñar de manera distinta (ver figura 2.4).

También se concluyó que esferas de distintos tamaños en el molino, pueden ser beneficiosas en comparación a usar bolas de un solo tamaño, dependiendo de las combinaciones y, también, del tamaño del producto (ver figura 2.5). Asimismo, esta elección puede ser ligeramente favorable en un rango de tamaños; mientras que, desfavorable en otro (ver figura 2.6).

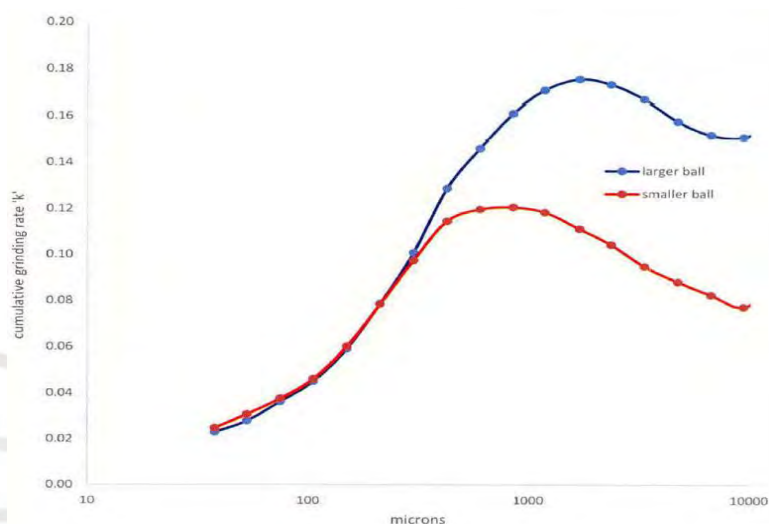


Figura 2.4.- Energía específica de tasa de molienda acumulada en molinos de bolas con diferentes tamaños de bolas. Azul: bolas de mayor tamaño; rojo: bolas de menor tamaño (Conger *et al.*, 2018)

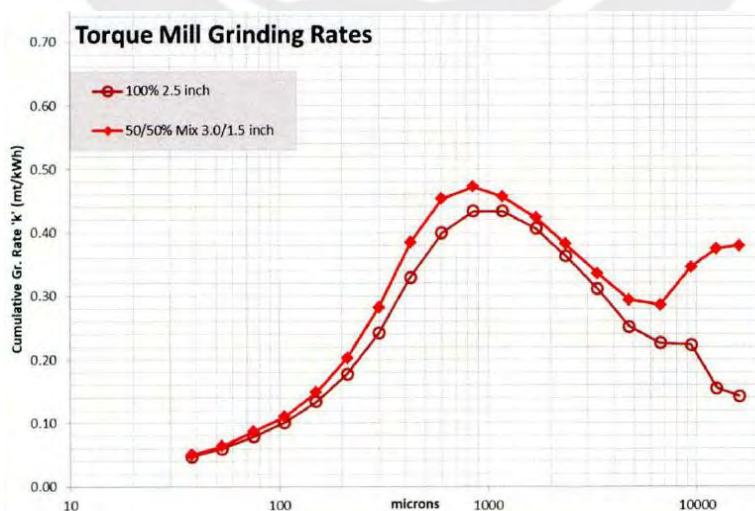


Figura 2.5.- Energía específica de tasa de molienda acumulada con i) con un solo tamaño de bolas y ii) una mezcla de dos tamaños de bolas (Conger *et al.*, 2018).

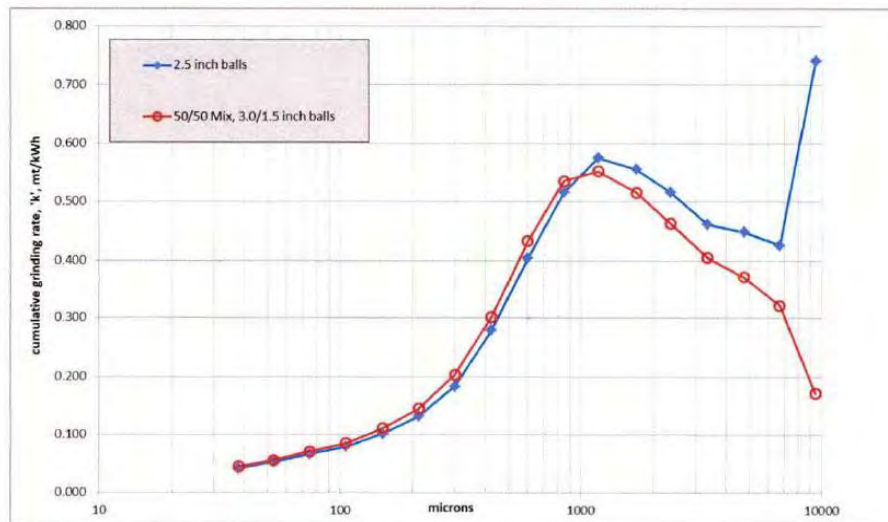


Figura 2.6.- Energía específica de tasa de molienda acumulada en un molino de bolas con i) un solo tamaño de bolas y ii) una mezcla de dos tamaños (Conger *et al.*, 2018)

En el año 2009, McIvor, a través de modelos, encontró que la variación del porcentaje de sólidos en el flujo de descarga puede generar un impacto positivo en la eficiencia del circuito de molienda. No obstante, este factor también tiene un efecto importante en 2 comportamientos: en el balance de agua tanto del clasificador (hidrociclón, en este caso), como de la pulpa del producto; y en la fracción de material fino, que es recirculada de regreso a la alimentación del molino de bolas (efecto *bypass*), por acción del agua en el flujo de rebose.

El segundo factor consiste en que, al disminuir el porcentaje de sólidos (aumentando el flujo de agua), mayor cantidad de finos sufrirán este efecto *bypass* y regresarán al molino, a pesar de tener un tamaño menor al tamaño de malla del P_{80} objetivo. Ello impacta negativamente en la eficiencia del circuito; por lo que, maximizar el porcentaje de sólidos en el flujo de recirculación (o arenas), contribuirá a un menor *bypass*.

En el caso del primer factor, es el porcentaje de sólidos admisible en la descarga (o derrame) del ciclón, que depende de los procesos posteriores, el que pone el límite a la cantidad de agua admisible en la alimentación del ciclón.

Por otro lado, incrementar el flujo de recirculación aumenta la producción de partículas finas; no obstante, el incremento del flujo de recirculación también está asociado con una

pérdida de exactitud en la separación de los clasificadores, por el aumento en el bypass de partículas finas. Es por ello que, se debe trabajar en un rango de valores.

Por lo tanto, si se limita el flujo de recirculación y el porcentaje de sólidos en el flujo de descarga del circuito a un rango de valores apropiados y, con ello también, el bypass relacionado, la cantidad de agua en la alimentación al circuito puede ser regulada en un intervalo específico.

En base a data de la planta Selbaie, en Canadá, introducida en simulaciones, McIvor varió el porcentaje de sólidos en el flujo de entrada, manteniendo constante el porcentaje de sólidos en el flujo de recirculación del circuito y el tamaño del producto en la descarga. El investigador obtuvo valores de aumento de la eficiencia del circuito de molienda de hasta 30%; por lo que concluyó que la adición de un tanque espesador tras el flujo de descarga, para diluir la solución, permitiría producir estos incrementos en eficiencia, minimizando el bypass de material fino. Asimismo, menciona que, aun cuando la adición de agua es limitada, ganancias significativas son logrables con cada unidad de agua agregada (ver tabla 2.1).

Tabla 2.1.- Condiciones de estado estable del circuito de molienda a diferentes porcentajes de sólidos en el flujo de descarga (COF) (McIvor, 2014).

COF % sol. w/w	Cyc. feed % sol. v/v	Cyc. water rec. to U.F.	Mill kW	CSE @ 106 μm	Rel. circ. eff.
50%	42%	49%	580	64%	Base Line
42% (B2)	38%	41%	523	71%	+11%
40%	37%	39%	515	72%	+12.5%
30%	30.5%	29%	478	78%	+22%
20%	23%	20%	454	82%	+28%
10%	13%	10%	430	86%	+34%

En el año 2014, Usman realizó una serie de ensayos, como parte de un estudio de parámetros para simulaciones, con el objetivo de analizar los efectos que causan distintas velocidades de giro y diferentes revestimientos internos o también llamados elevadores, en un molino de bolas. Los experimentos principales se dieron con un molino de bolas, en circuito abierto, en vía seca y en *batch*; y se analizaron las respuestas en la potencia del molino, la distribución de tamaños del producto, el *Work Index* de Operación y las distribuciones teóricas de rotura.

Se presenta en la figura 2.7, el consumo medio de energía de un molino con una carga calculada del 25% y a una velocidad del 74% de CS, para 3 diferentes revestimientos internos. Como se observa en la gráfica, el consumo de energía del molino muestra ligeras diferencias. El molino con elevador del tipo *Rail* consume más potencia y el del modelo *Hi* consume menos. La explicación acuñada por el autor es que, a esta velocidad, el modelo *Hi* produciría mayor cantidad de elementos molturantes adheridos a la superficie interna del molino, por lo que este consume una potencia menor.

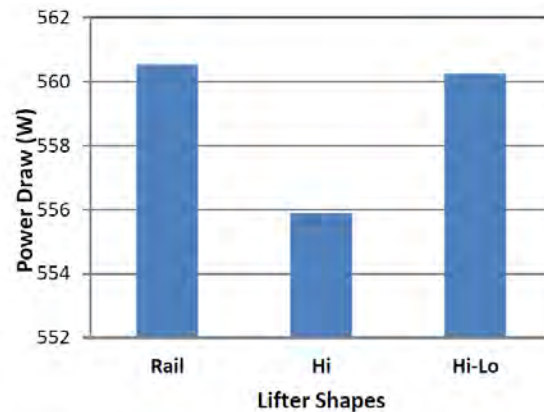


Figura 2.7.- Consumo de energía del molino para diferentes elevadores, 25% de carga (10% de bolas y 15% de rocas), 74% de velocidad crítica (Usman, 2014).

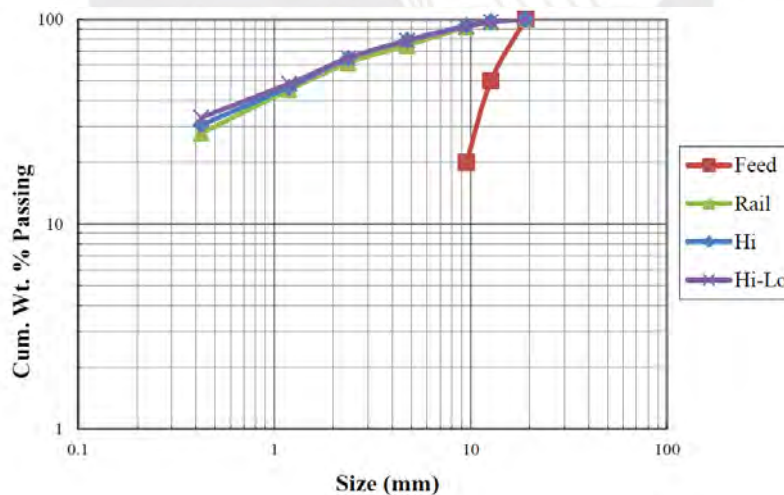


Figura 2.8.- Distribución del tamaño del producto acumulado para los diferentes elevadores, carga del 25%: 10% de bolas y 15% de rocas, 74% de velocidad crítica (Usman, 2014).

La figura 2.8 muestra la comparación de las distribuciones de tamaño del producto para las pruebas del molino, que se ejecutaron a las mismas condiciones, con las diferentes

configuraciones de elevadores. Se incluyó, también, la distribución de tamaño de la alimentación del molino. Las distribuciones de tamaño del producto para los diferentes elevadores son muy cercanas; pero, como se aprecia en la gráfica, la distribución de tamaño del producto del elevador *Hi-Lo* es ligeramente más fina que la de los otros elevadores.

Además, son ilustrados, en la figura 2.9, los resultados del *Work Index* de Operación, para las 3 configuraciones de revestimientos internos, a las mismas condiciones de funcionamiento que las figuras 2.7 y 2.8. En este caso, el *Work Index* de Operación también difiere muy poco para los diferentes elevadores. A estas condiciones de velocidad y baja carga de molienda, la necesidad de energía del levitador *Hi* es inferior comparada con la de los otros dos.

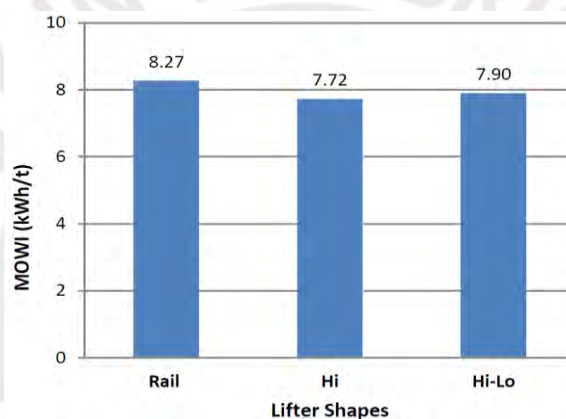


Figura 2.9.- *Work Index* de Operación del molino para diferentes elevadores, 25% de carga (10% de bola y 15% de roca), 74% de velocidad crítica (Usman, 2014).

Por otra parte, se realizaron ensayos no solo con los 3 tipos de revestimientos, sino también a 3 velocidades distintas, en el rango de velocidades del 70-80% de CS, y con un mineral distinto. Como se aprecia en la figura 2.10, dependiendo de la combinación de condiciones, se tienen ligeras variaciones en el consumo de energía.

Se pudo comprobar que la velocidad del molino a la que la potencia alcanza un punto máximo sería diferente de un molino a otro, dependiendo de factores como el diámetro del molino, el tipo de elevadores, la relación entre el diámetro de la bola y del molino, la relación entre el diámetro de la bola y de la roca, entre otros.

El autor indica que, para los molinos de gran diámetro, con una carga completa de bolas (40%), la potencia máxima suele producirse en el intervalo de 70-75%.

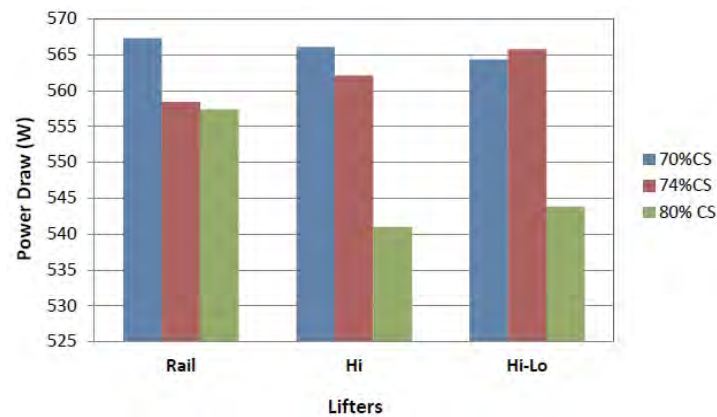


Figura 2.10.- Consumo medio de energía del molino para los diferentes elevadores y velocidades de molienda, 25% de carga (10% de bolas y 15% de roca) (Usman, 2014).

En el año 2007, Chen *et al.* realizaron una investigación en una planta industrial con el objetivo de mejorar el desempeño de un circuito de molienda con un molino de bolas y un clasificador, a través de un sistema de control que determinara los puntos de operación óptimos. El circuito ofrecía tres variables manipulables: el mineral de alimentación al molino, la tasa de alimentación de agua de al molino y el flujo de agua de dilución en el clasificador. Debido a que, al maximizar la eficiencia, el tamaño del producto debe mantenerse en un rango permisible, se realizaron experimentos para mostrar el efecto que producía la manipulación de una de las variables respecto al tamaño de del producto, así como, el tiempo de respuesta. La variable de respuesta más rápida fue la tasa de agua de dilución y, por lo tanto, presenta la ventaja respecto a las otras dos, como se muestra en la figura 2.11.

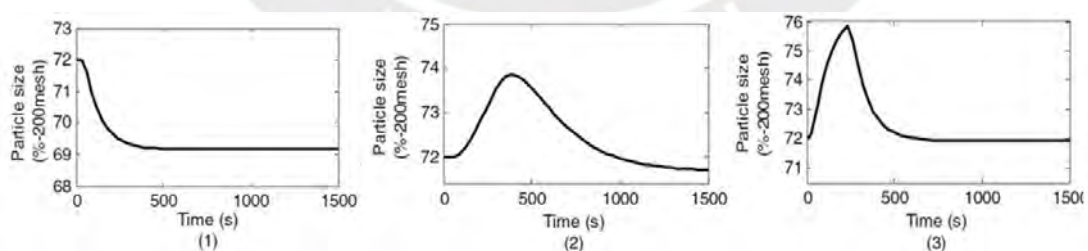


Figura 2.11.- Respuesta del tamaño de partícula en un circuito abierto a cambios escalonados en las variables manipuladas: (1) disturbio en la velocidad de alimentación de mineral al molino; (2) disturbio del caudal de agua de alimentación al molino; y (3) disturbio del caudal de dilución (Chen *et al.*, 2007).

Los experimentos se realizaron bajo un sistema de control, que seguía una serie de regulaciones y respuestas básicas frente a los cambios de las variables de control. Se buscó aumentar la tasa de alimentación de mineral al molino para maximizar la eficiencia, manteniendo el tamaño del producto en el rango permisible.

Los autores, obtuvieron (ver figura 2.12) que la eficiencia promedio fue mejorada en más del 8% (en términos de un aumento de 6 t/h en la tasa de alimentación de mineral al molino), respecto a las condiciones anteriores, tras 25 días de operación. Asimismo, se mantuvieron estables el tamaño del producto, alrededor de $72\pm 2\%$ (-malla 200); la tasa de circulación, entre 140 y 180 t/h y la concentración de sólidos en el molino, alrededor de $78\pm 2\%$. Por lo tanto, se garantizó el mejoramiento de la eficiencia de molienda, sin disminuir la calidad del producto sobre límites requeridos (ver figura 2.13).

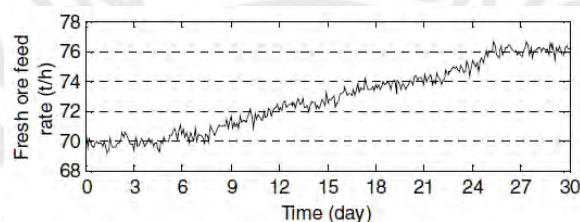


Figura 2.12.- Incremento de la tasa de producto al implementar el sistema de control en las variables seleccionadas (Chen *et al.*, 2007).

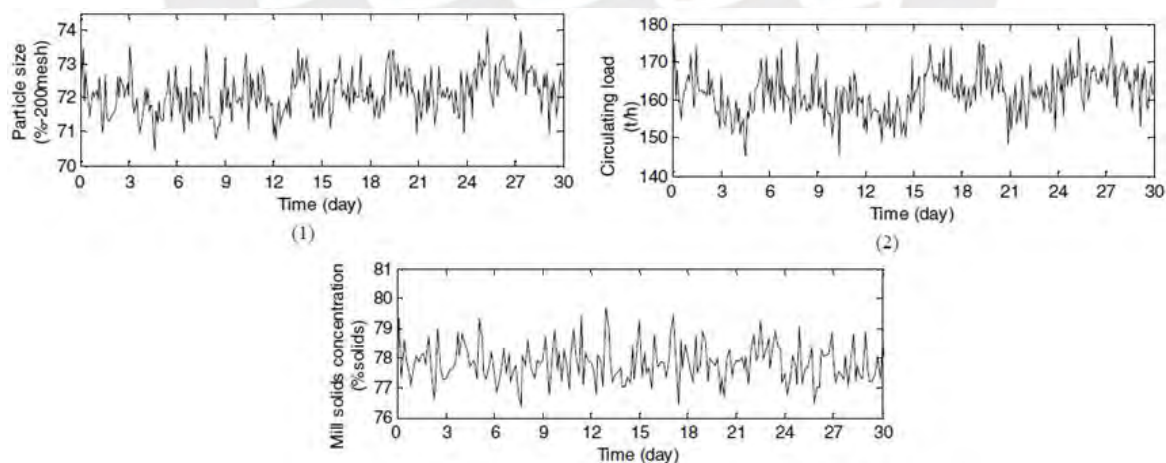


Figura 2.13.- Los resultados de la ejecución de las variables controladas (1) tamaño de partícula; (2) carga circulante; y (3) concentración de sólidos del molino (Chen *et al.*, 2007).

En Chile, Yianatos *et al.* (2002) hicieron un estudio con el propósito de mejorar la capacidad de molienda mediante la regulación de la concentración de sólidos en las arenas del hidrociclón, o también llamado el flujo de recirculación, implementando un sistema de control.

El circuito que se utilizó es el presentado en la figura 2.14, compuesto por un molino de bolas, un sumidero, una bomba para pulpa y un hidrociclón. Las variables de control fueron el tamaño de partícula en el flujo de descarga (o derrame) del hidrociclón y el porcentaje de sólidos en las arenas del hidrociclón (o flujo de recirculación). Las variables manipuladas fueron el tonelaje de alimentación al molino y el flujo de agua de dilución alimentada al sumidero.

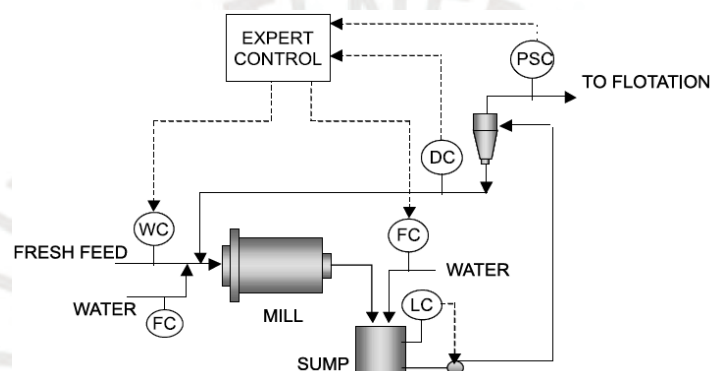


Figura 2.14.- Circuito de operación con las variables de control y de manipulación (Yianatos *et al.*, 2002).

El objetivo del estudio era establecer un sistema de control que permitiera obtener el mayor tonelaje de alimentación de mineral al molino de bolas, sin alterar el tamaño de partícula del producto.

De esta manera, los experimentos consistieron en cambios de los puntos de ajuste de las variables manipuladas. Por ejemplo, aumentar o disminuir el tonelaje de mineral de alimentación ($\pm 5\%$) mientras que el flujo de agua de alimentación al depósito permanece constante; así como, aumentar esta tasa de agua de suministro al sumidero ($\pm 10\%$) a un flujo másico constante de mineral en el ingreso al sistema.

Los resultados mostraron que la disminución en el tonelaje de alimentación de mineral, a un flujo constante de agua de dilución al sumidero, produce una disminución del tamaño de partícula en el flujo de descarga (producto del circuito); así como, una disminución de la concentración de sólidos en el flujo de recirculación (ver figura 2.15).

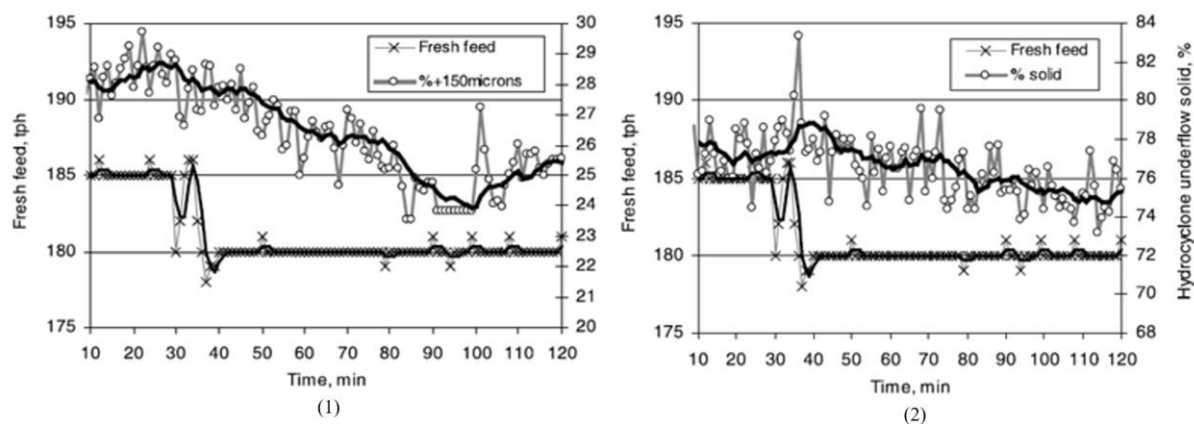


Figura 2.15.- Respuestas ante un cambio gradual en la tasa de alimentación de mineral al molino, en las variables de (1) tamaño de partícula del producto; y (2) porcentaje de sólidos en el producto (Yianatos *et al.*, 2002).

Por otro lado, el aumento en el flujo de agua de dilución que alimenta al sumidero, a una tasa constante de alimentación de mineral, genera un aumento del flujo y una disminución del porcentaje de sólidos en la alimentación del hidrociclón. Esta condición produce un aumento rápido de partículas finas en el flujo de recirculación, pues se tiene mayor agua de dilución y mayor *bypass* de fragmentos menores al tamaño de malla del P₈₀ objetivo. Ello causa que, inicialmente, la clasificación sea más fina. No obstante, como consecuencia, la descarga del molino se vuelve lentamente más gruesa, a medida que transcurre el tiempo y, por ende, el tamaño de partícula en el flujo de descarga del sistema también se torna más grueso; hasta que la operación se estabiliza a un tamaño de partícula ligeramente menor que el inicial. Además, de manera paralela, la tasa de mineral de alimentación al hidrociclón incrementa y la concentración de sólidos, en un inicio disminuye, pero luego regresa a su valor inicial (ver figura 2.16).

El tiempo de respuesta para los cambios en el tonelaje de alimentación de mineral al molino fue entre 4 y 7 minutos; para el flujo de agua de alimentación al depósito, entre 7 y 10 minutos y para el tamaño de partícula, entre 20 y 30 minutos.

Por último, es importante resaltar que la estrategia de control automático requiere del conocimiento en tiempo real del porcentaje de sólidos en el flujo de rebose del hidrociclón para una adecuada respuesta.

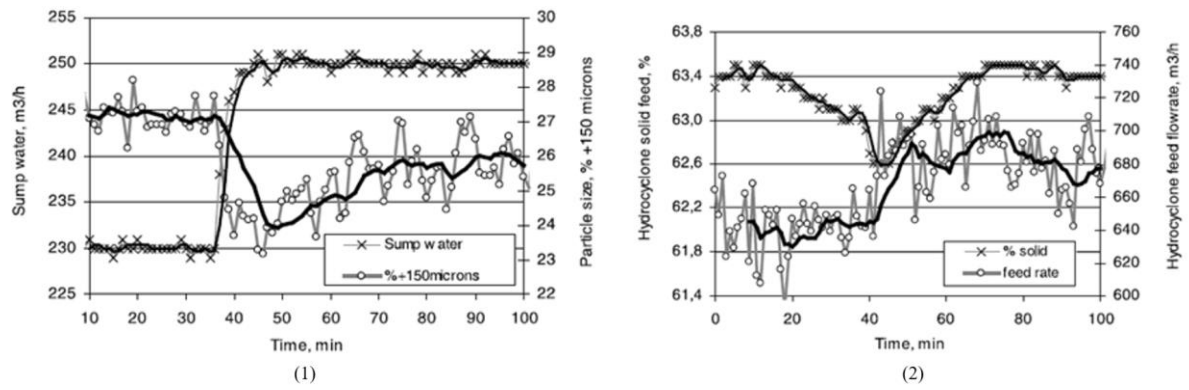


Figura 2.16.- Respuestas ante un cambio gradual en el flujo de agua de dilución al sumidero en las variables de (1) tamaño de partícula del producto; y (2) porcentaje de sólidos y tasa de mineral en la alimentación al hidrociclón (Yianatos *et al.*, 2002)



CAPÍTULO 3

EXPERIMENTACIÓN

Se presenta en esta sección la base para los ensayos en la planta a escala de laboratorio. En primer lugar, se describen los aspectos generales y fundamentación del ensayo; así como, el muestreo y análisis del mineral empleado. En segundo lugar, se desarrolla el procedimiento del ensayo, metodología, banco de ensayos, condiciones, recopilación de data y muestras y el protocolo de pruebas. Posteriormente, es planteado el procesamiento y análisis de datos de manera gráfica y estadística, según DOE. Por último, se presentan las expresiones para el cálculo de parámetros específicos del ensayo.

3.1 Aspectos generales y fundamentación

Los ensayos se llevaron a cabo en una planta piloto a escala de laboratorio, con una capacidad de 50 kg/h para procesamiento de mineral, instrumentada e implementada en el laboratorio de Minas de la PUCP.

Se sabe que, al ser sometidos los minerales a una reducción de tamaño, su respuesta varía ampliamente de acuerdo a la aplicación de las fuerzas de rotura (*breaking forces*, en inglés) (Weiss, 1985); es decir, el mineral rompe de manera distinta de acuerdo con las condiciones a las que se muele.

Como se ha revisado en el capítulo 2, en los últimos años, las investigaciones sobre las dinámicas en los molinos de bolas, se han centrado por un lado en el medio de molienda y las características del equipo, como las bolas de acero y los revestimientos internos o *liners* (Conger *et al.*, 2018) (Usman, 2015); y por otro, en las características propias del circuito o parámetros en el molino, como la relación agua-mineral y velocidad del molino (Zixin *et al.*, 2019) (Usman, 2015) (McIvor, 2007) (Chen *et al.*, 2007) (Yianatos *et al.*, 2002). Dadas las condiciones del laboratorio, no es posible realizar estudios variando el medio de molienda y las características del equipo, por los retos tecnológicos que ello

supone. No obstante, el parámetro de porcentaje de sólidos es un factor que puede ser analizado y que es relevante para la molienda, como se ha podido revisar.

Adicionalmente a lo observado en el capítulo 2, Gao *et al.* (1996), en sus experimentos, encontró que el parámetro de porcentaje de sólidos muestra influencia significativa en el cambio de consumo de potencia (ver figura I.1). Tanto la investigación de Gao *et al.* (1996), como lo mencionado por Gupta (2006) en el libro de su autoría *Procesamiento de Minerales*, confirman lo mencionado por las investigaciones examinadas previamente. El porcentaje de sólidos y la viscosidad (dependiente del porcentaje de sólidos y las características del mineral) son factores importantes para determinar la molienda húmeda óptima.

Dado un mineral específico, estudiadas sus características y establecidas como parámetros fijos, la respuesta ante el cambio en la condición de densidad de la pulpa puede ser evaluada. El rango usual de contenido de sólidos en molinos de bolas trabajando en vía húmeda es entre 65% y 80% (Weiss, 1985).

Es en base a ello, que en el presente trabajo se eligieron 3 porcentajes de sólidos distintos en la alimentación al circuito (66%, 70% y 75%) con el objetivo de analizar los efectos que las variaciones en este factor causan sobre parámetros energéticos y mineralógicos. La variación del porcentaje de sólidos se realiza mediante la variación del flujo de agua en la entrada al molino y los parámetros de estudio son el consumo de potencia del molino, el tamaño y tasa de producto y el *Work Index* de Operación.

Cabe resaltar que una investigación más minuciosa y cercana a la industria, en comparación con las publicaciones revisadas, implica desarrollar ensayos en una molienda húmeda, en circuito cerrado y flujo continuo; posible en una planta piloto, como la empleada en el presente trabajo. Mediante estos ensayos se busca simular la operación de un circuito de molienda industrial en el procesamiento de minerales.

3.2 Muestreo y análisis del mineral

Tanto la extracción y preparación de las muestras de mineral, como el análisis de sus características, se realiza previo a los ensayos de molienda en la planta piloto.

3.2.1 Muestreo

El mineral a moler es cobre, específicamente, cobre-calcopirita. Este ha sido adquirido en 5 sacos de 1 tonelada cada uno (ver figura 3.1) con una granulometría menor a $\frac{1}{4}$ pulgada, al 100%. Para los procesos de caracterización y ensayos fue extraída la cantidad de 150 kg de mineral siguiendo la técnica de muestreo por incremento basada en la norma ASTM C702 - *Standard Practice for Reducing Samples of Aggregate to Testing Size*. Esta consiste en la toma de muestras en 4 puntos cardinales por círculo concéntrico definido. Se definieron 3 círculos y se extrajo el mineral de 12 puntos (ver figura 3.2).



Figura 3.1.- Mineral recibido en el Laboratorio de Mineralurgia – PUCP.

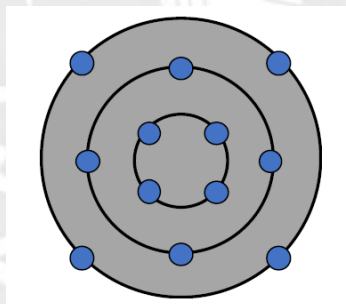


Figura 3.2.- Zonas de toma de muestra.

Tanto para los estudios de identificación de características como para las pruebas en la planta piloto, el mineral fue reducido a un tamaño de partícula 100% menor a 2mm (o malla 10). Posteriormente, mediante las cuarteadoras de rifles de laboratorio, se tomaron muestras para los análisis mencionados.

3.2.2 Análisis mineralógico

El análisis mineralógico se muestra en las figuras 3.3 y 3.4. El mineral analizado está conformado por calcopirita (5%), magnetita (15%), ganga mineral (78%) y trazas de

esfalerita, pirita, digenita, covelita y goethita. La calcopirita y magnetita aparecen casi en su totalidad asociadas; mientras que la presencia de pirita es relativamente escasa, visualizándose como inclusiones en la ganga y en la calcopirita.

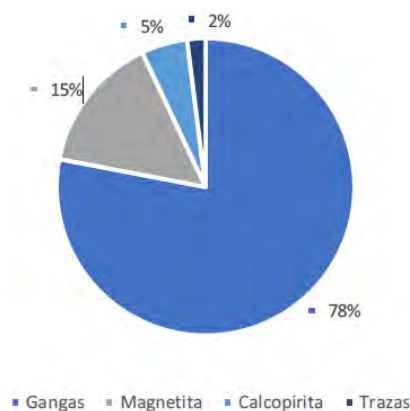


Figura 3.3.- Composición mineralógica del mineral.

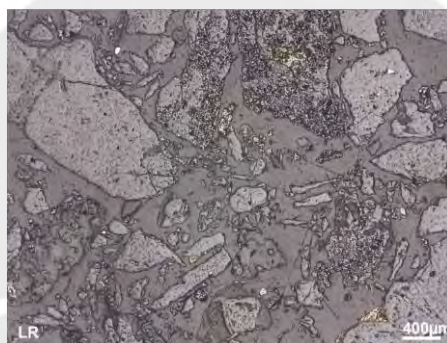


Figura 3.4.- Vista magnificada de una muestra representativa.

3.2.3 Análisis granulométrico

El análisis granulométrico se muestra en la tabla 3.1. La interpolación de estos resultados para obtener el F_{80} da como resultado el valor de 1614.9 micrones.

Teniendo como base lo mencionado en el capítulo 1 acerca de que el rango de reducción de un molino de bolas es entre 20:1 y 200:1, y que los molinos de bolas con la descarga por rebose son más adecuados para molienda fina hasta 74 a 106 micrones (Gupta, 2006), se definió que el tamaño de partícula del mineral en la alimentación sea menor a 2mm.

Tabla 3.1.- Análisis de tamaño de partícula de la alimentación.

Malla (<i>mesh</i>)	Malla (micrones)	Peso (g)	Peso (%)	Porcentaje retenido	Porcentaje pasante
malla 10	2000	3.43	1.39	1.39	98.61
malla 12	1680	43.11	17.43	18.82	81.18
malla 16	1180	21.95	8.88	27.70	72.30
malla 18	1000	21.5	8.69	36.39	63.61
malla 25	710	33.2	13.43	49.82	50.18
malla 35	500	25.8	10.43	60.25	39.75
malla 45	355	18.8	7.60	67.85	32.15
malla 60	250	13.2	5.34	73.19	26.81
malla 80	180	11.8	4.77	77.96	22.04
malla 120	125	10.7	4.33	82.29	17.71
malla 170	90	9	3.64	85.93	14.07
malla 200	74	4.8	1.94	87.87	12.13
malla -200	<74	30	12.13	100	0
Total	-	247.29	100	-	-

3.2.4 Análisis de densidad

La densidad aparente refleja el volumen que ocupa el mineral a las condiciones en las que se encuentra. Es relevante conocer este valor, pues nos da la idea del espacio necesario para almacenar el mineral a usar durante un tiempo determinado; por ejemplo, una hora de ensayo. Asimismo, en aplicaciones industriales es relevante para referencias como el volumen de la tolva, medidas de ductos de transporte, etc.

La medición de este valor se realizó siguiendo la norma *ASTM D2320 - Standard Test Method for Density (Relative Density) of Solid Pitch (Pycnometer Method)*. El instrumento utilizado fue el picnómetro, se realizaron cuatro muestreos y se promediaron. El resultado dio 3.67 t/m^3 .

Por otro lado, la densidad específica del mineral, es decir, el volumen que ocupa el mineral en polvo, se determina pulverizando el mineral en un molino de anillos de laboratorio y siguiendo también la metodología de la norma *ASTM D2320*. Se procesaron cuatro muestras y se tomó el promedio. El valor obtenido fue 4.86 t/m^3 .

3.2.5 Análisis de Bond

El procedimiento establecido por Bond para realizar los ensayos y determinar el *Work Index*, en el molino de bolas de Bond (ver figura 3.5), ha sido estandarizado y se sigue en el presente estudio. El objetivo es simular un circuito cerrado y en flujo continuo (ver figura 3.6); así como, analizar la energía específica teórica de consumo de la molienda del mineral elegido, en un molino de bolas, para un tamaño de alimentación y de producto establecidos.



Figura 3.5.- Molino de Bond en el laboratorio de Mineralurgia de la PUCP

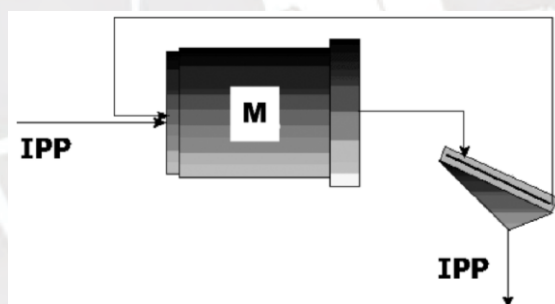


Figura 3.6.- Circuito simulado en el ensayo del molino de bolas de Bond para determinar el *Work Index*. IPP: Ingreso y salida de mineral (Gupta, 2016).

Las condiciones para realizar los ensayos son las siguientes:

- Tamaño del molino de bolas: 305mm de diámetro interno y 305mm de largo.
- Velocidad del molino de bolas: 70 rpm.
- Carga del molino de bolas: 285 bolas de acero, con una masa total de 20.125 kg. Divididas en: 43 bolas de 3.7cm de diámetro, con una masa total de 9.094 kg; 67 bolas de 3.0 cm de diámetro, con una masa total de 7.444 kg; 10 bolas de 2.5 cm de diámetro, con una masa total de 0.694 kg; 71 bolas de 1.9 cm de diámetro, con una masa total de 2.078 kg; 94 bolas de 1.55cm de diámetro, con una masa de 0.815 kg.

- Material: material seco; el 100% de la alimentación debe ser menor a 3350 μm y alrededor del 80%, menor a 2000 μm .

El proceso trabaja con un volumen de mineral de muestra de 700 cm^3 y con el tamaño de producto y tamiz de 74 μm . Se inicia con el pesaje, el análisis granulométrico y la determinación de la distribución de tamaños de partículas y el F_{80} de la muestra. Posteriormente, se introduce en el molino y se realiza el primer ciclo de molienda durante 100 revoluciones. Tras culminar el ciclo, se tamiza con el tamaño de malla usado y, las partículas que pasan el tamiz (partículas de descarga), son pesadas, removidas y reemplazadas por nuevo material de alimentación, hasta obtener el mismo peso inicial. En base al peso medido, se calcula:

- La tasa de molienda. La cantidad de gramos producidos por revolución.
- La masa de producto (partículas con un tamaño menor a la malla elegida) que se debe generar en el próximo período. Según el análisis granulométrico inicial, se debe descontar el porcentaje que ya es de un tamaño menor a la malla en el mineral de reemplazo.
- El número de revoluciones para el próximo período. Se obtiene de la división de la masa de producto a generar y la tasa de molienda.

Luego, se inicia el segundo ciclo y se repiten los pasos hasta obtener resultados estables por 3 ciclos consecutivos, con un margen de error de 20g. El bucle es mostrado en la figura 3.7.

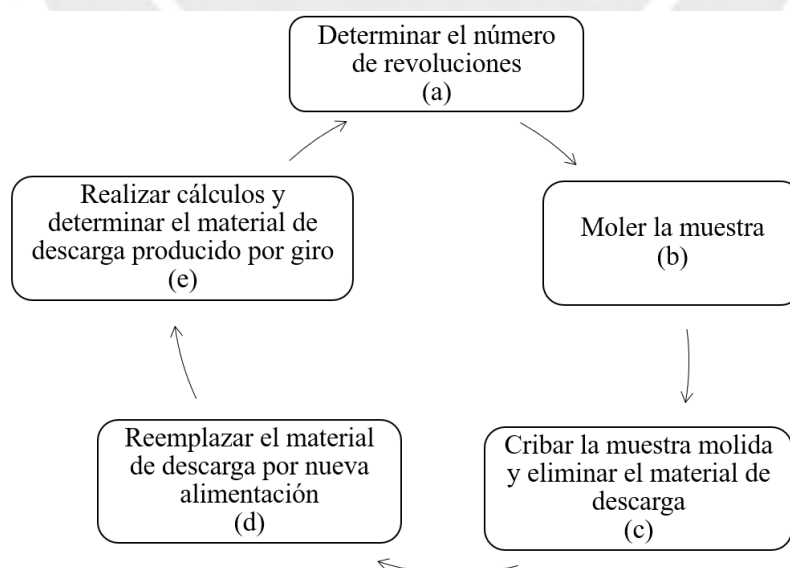


Figura 3.7.- Procedimiento del ciclo de molienda en ensayo con Molino de Bolas de Bond para el cálculo del *Work Index* (Michaud, 2015).

Al culminar con los ensayos, se utiliza la siguiente fórmula para determinar el *Work Index*.

$$W_i = \frac{48,95}{A^{0,23} \times G_{bp}^{0,82} \times \left(\frac{10}{\sqrt{P_{80}}} - \frac{10}{\sqrt{F_{80}}} \right)} kWh/t \quad (3.1)$$

donde,

W_i = *Work Index* de laboratorio [kWh/t];

A = Tamaño del tamiz de prueba [μ m];

G_{bp} = Tasa de molienda o masa del material de descarga por revolución [g/rev];

P_{80} = Tamaño de paso de malla del 80% del producto del circuito [μ m];

F_{80} = Tamaño de paso de malla del 80% de la nueva alimentación [μ m].

El valor hallado es 18.36 kWh/t; lo que muestra que el material es de carácter duro. Finalmente, el valor de *Work Index* es utilizado en la ecuación 1.2, mostrada en el capítulo 1. Con lo que se obtiene que la energía específica estimada es 20.89 kWh/t.

3.3 Procedimiento de ensayo

Con el mineral correctamente estudiado, el procedimiento para los ensayos se desarrolla en las siguientes líneas.

3.3.1 Metodología

El procedimiento para realizar los ensayos tiene como base el diseño factorial presentado en el libro de Diseño y Análisis de Experimentos (Montgomery, 2011).

En el diseño de experimentos se establece que para realizar los ensayos se deben determinar primero los factores a evaluar y los niveles de cada uno; así como, la cantidad de réplicas. En este caso, se considera un factor, el porcentaje de sólidos, con 3 niveles y 2 réplicas, como se muestra en la tabla 3.2.

Tabla 3.2.- Factor del ensayo.

	Factor	Niveles	Réplicas
A	Porcentaje de sólidos, %	3	2

Los tres porcentajes de sólidos en la alimentación del molino, como se menciona previamente, tienen los valores de 66%, 70% y 75% (ver tabla 3.3).

Tabla 3.3.- Niveles del factor A.

Factor A	
Nivel	Porcentaje de sólidos, %
1	66
2	70
3	75

Luego de ello, se debe asignar el orden a seguir en los ensayos. En base al diseño de experimentos, esta sucesión debe ser manera aleatoria, tomando en cuenta las réplicas por condición, conforme se detalla en la tabla 3.4.

Tabla 3.4.- Matriz experimental para los ensayos en modo continuo.

Orden de corrida	Número de réplica	Porcentaje de sólidos (%)	Velocidad de giro (rpm)	Tasa de alimentación de mineral (kg/h)	Tasa de alimentación de agua (kg/h)
1	1	66	54	19.8	9.9
2	1	70	54	19.8	8.5
3	2	66	54	19.8	9.9
4	1	75	54	19.8	6.6
5	2	75	54	19.8	6.6
6	2	70	54	19.8	8.5

3.3.2 Banco de ensayos

Descripción del banco de ensayos

El esquema técnico de la planta piloto implementada en el laboratorio de mineralurgia de la PUCP es mostrado en la figura 3.8. La figura 3.9 corresponde a una vista general del banco de ensayos.

El mineral extraído, reducido y muestreado de acuerdo con la sección 3.2 es cargado en en lote, por la parte superior de una tolva de alimentación cuya capacidad es de 40 L. Esta se llena con alrededor de 90 kg de mineral y es mantenida a un nivel por encima de 60 cm. En la parte inferior de la tolva, se cuenta con un alimentador vibratorio, accionado por un motor eléctrico y un sistema de transmisión por fajas, el cual suministra el mineral a un molino de bolas a una tasa constante.

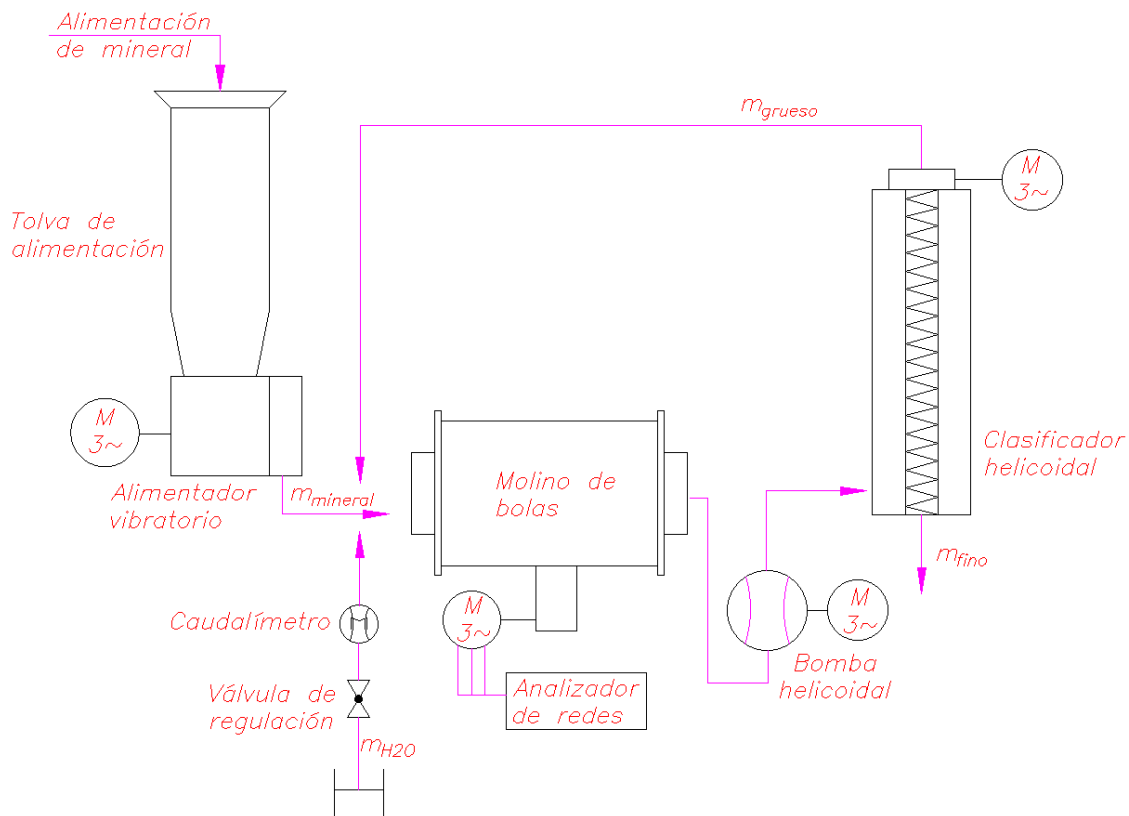


Figura 3.8.- Esquema técnico planta piloto del laboratorio de Mineralurgia de la PUCP.

De manera simultánea a la alimentación de mineral, se suministra de agua al sistema, en la entrada al molino de bolas, a una tasa graduada, que depende del porcentaje de sólidos establecido. La variación se realiza mediante una válvula de regulación. De esta forma, el circuito opera en vía húmeda.

La molienda de la pulpa (mineral y agua) se realiza en el interior del molino de bolas mediante los elementos molturantes, que consisten en un conjunto de bolas de acero.

Posteriormente, tras recorrer la longitud del molino, la descarga de la pulpa es por rebose, por el extremo del molino opuesto a la alimentación. Una bomba centrífuga envía la pulpa hacia el clasificador helicoidal, el cual separa el material fino del grueso. El flujo de material grueso (o arenas) es recirculado, por la parte superior del clasificador, de regreso al molino para ser fraccionado nuevamente hasta cumplir con las dimensiones requeridas; mientras que, el flujo de material fino (derrame) es evacuado por la parte inferior del clasificador, como producto del proceso.

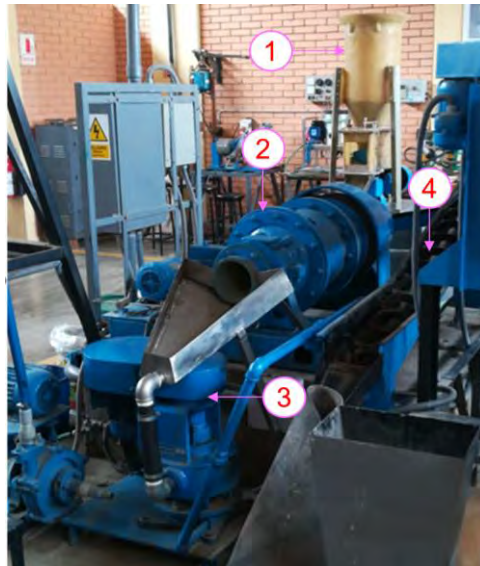


Figura 3.9.- Planta piloto implementada en el laboratorio de Mineralurgia de la PUCP.
 (1) tolva de alimentación; (2) molino de bolas; (3) bomba centrífuga; (4) clasificador helicoidal.

Sistemas

La planta cuenta con los sistemas de alimentación de mineral y de suministro de agua; así como, con un sistema de clasificación del mineral, que recircula parte de la pulpa, permitiendo que el proceso trabaje en circuito cerrado.

Instrumentación

Respecto a la instrumentación, la planta cuenta, como se muestra en la figura 3.8, en el motor del molino de bolas con un analizador de redes para medir la potencia y el consumo energético. En el sistema de suministro de agua, se tiene un flujómetro para realizar mediciones de flujo y temperatura del agua y una válvula de regulación para variar la dosificación.

Para la medición de la masa a la salida del circuito, se cuenta con una balanza electrónica; para la contabilización del tiempo transcurrido durante el muestreo, un cronómetro; y un horno eléctrico, para la evaporación de agua.

Listado de equipos

La tabla 3.5 muestra la relación de equipos e instrumentos y sus especificaciones. Así como, las figuras 3.10 y 3.11 muestran los componentes listados.

Tabla 3.5.- Lista y especificaciones de equipos e instrumentos

No.	Equipo	Especificaciones	Fabricante
1	Molino de bolas	Diámetro: 0.3m Largo: 0.3 m Ratio: 1:1 Velocidad crítica: 77.23 rpm Entrada: Por gravedad, por un extremo Descarga: Por rebose, por el extremo opuesto	DECO
2	Motor del molino	Tipo: Trifásico Potencia: 1.5kW Velocidad de giro: 1730 rpm Tensión nominal: 220 V Corriente nominal: 5.2 A Frecuencia: 60Hz	WEG
3	Analizador de redes (y registrador)	MI 2892 Modelo: MI 2892 Rango de tensión nominal (L – N): Fase (L-N): 50 -1000 Vrms; Línea (L-L): 50 - 1730 Vrms Rango de corriente: 3 a 6000 Arms $\pm 1.5\%$ de m.v. Precisión: IEC 61000-4-30 Clase A. $\pm 0.1\%$ de tensión nominal	Metrel
4	Clasificador helicoidal	Diámetro: 0.1m Largo: 2.5 m Ratio: 25:1 Velocidad de giro: 82.3 rpm	Denver
5	Motor del clasificador	Tipo: Trifásico Potencia: 0.37 kW Velocidad de giro: 1725 rpm Tensión nominal: 220 V Corriente nominal: 1.7 A Frecuencia: 60Hz	WEG
6	Sensor de flujo de masa y transmisor	Modelo: CMF025M Tecnología de medición: Coriolis Modelo de transmisor: 9739MVD Máximo flujo másico: 2180 kg/h Precisión del flujo másico (líquido): $\pm 0.10\%$ del caudal (estándar)	Emerson Micro Motion
7	Válvula de regulación	Tipo: válvula de globo Diámetro nominal: 1'' Material: cobre	Cimberio
8	Balanza	Modelo: SB16001 Capacidad máxima: 16100 g Precisión: 0.1g	Mettler Toledo

9	Horno	Modelo: OV-335 Rango de temperaturas 20-100°C	Gallenkamp
10	Tolva de alimentación	Alto: 0.72m Diámetro: 0.32m Capacidad: 70L	-
11	Motor de la tolva	Tipo: Trifásico Potencia: 0.19 kW Velocidad de giro: 1725 rpm Tensión nominal: 220 V Corriente nominal: 0.9 A Frecuencia: 60Hz	WEG
12	Bomba de pulpa	Tipo: bomba vertical Denver Modelo: A Diámetro de impulsor: ¾” Flujo: 0.1 a 5 m3/h	Denver
13	Motor de la bomba	Tipo: Trifásico Potencia: 1.1 kW Velocidad de giro: 1725 rpm Tensión nominal: 220 V Corriente nominal: 5 A Frecuencia: 60Hz	Kraftmann



(1)



(2)



(3)



(4)

Figura 3.10.- Componentes principales: (1) tolva, alimentador y motor; (2) molino de bolas, motor y transmisión; (3) bomba de pulpa y motor; (4) clasificador helicoidal, motor y transmisión.



Figura 3.11.- Instrumentación: (1) sensor de flujo másico y transmisor Emerson Micro Motion; (2) analizador de Redes Metrel; (3) balanza electrónica marca Mettler Toledo; (4) horno Gallenkamp.

Adicionalmente, se tienen equipos como una trituradora que trabaja en *batch*, usada para reducir el tamaño del mineral de alimentación a la condición indicada; un tamizador mecánico de laboratorio, para facilitar el tamizado del mineral, dos cuarteadoras de rifles de tamaños distintos, para obtener muestras equivalentes; entre otros (ver figura 3.12). Asimismo, durante los ensayos, también se emplearon materiales como cedazos de distintos tamaños de malla, bandejas, probetas, brochas, equipos de protección personal, etc (ver figura 3.13).



(1)



(2)



(3)



(4)

Figura 3.12.- Equipos adicionales: (1) trituradora marca Sturtevant; (2) tamizador mecánico de laboratorio marca Advantech; (3) cuarteadora de laboratorio de 20L; (4) cuarteadora de laboratorio de 5L.



(1)



(2)



(3)



(4)

Figura 3.13.- Equipos adicionales: (1) cedazos de distintos tamaños de malla; (2) probeta graduada marca Isolab; (3) bandejas de distintos tamaños; (4) equipos de protección personal.

3.3.3 Condiciones de operación

Las condiciones de operación para realizar los ensayos son las siguientes:

- Molino de bolas operando en flujo continuo.
- Circuito cerrado y vía húmeda.
- Carga del molino de bolas: misma cantidad y distribución de bolas de acero para todos los ensayos. Volumen de 25%.
- Material: cobre-calcopirita con un tamaño en la alimentación 100% menor a 2mm.
- Velocidad de molino igual y constante para todas las condiciones.
- Tasa de alimentación de mineral igual y constante para todas las condiciones.
- Tasa de suministro de agua en la entrada al molino de acuerdo con la tabla 3.3.

3.3.4 Recolección de data y muestras

El molino, clasificador, bomba y alimentador vibratorio inician su operación a las condiciones especificadas en la sección 3.3.1 y se toman las mediciones a lo largo del ensayo. La información recopilada es en los parámetros de corriente, tensión, potencia, flujo de alimentación de agua, velocidad de operación de molino, tiempo, pesos de pulpa (mineral húmedo) y mineral seco y tamaño de producto.

A lo largo de todo el ensayo, utilizando el analizador de redes, se miden los valores de corriente, tensión, potencia y factor de potencia; y con el sensor de flujo de masa y transmisor, los de flujo másico y temperatura del agua de alimentación.

La velocidad de operación es tomada de manera analógica con un tacómetro y las muestras son extraídas en los tiempos 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50, 60 minutos, tras el inicio del ensayo. La extracción de las muestras se realiza durante un tiempo establecido y directamente en la salida del clasificador helicoidal (descarga de producto). Cada muestra es pesada (masa de pulpa) en la balanza digital y, luego, colocada en el horno eléctrico para ser secada. Tras la evaporación del agua en la muestra, se mide la masa restante (masa de mineral seco).

Después de ello, se tamiza mediante los cedazos de laboratorio para determinar la distribución de tamaño de partículas y se obtienen el P_{80} y el porcentaje de pasantes de la malla 200.

3.3.5 Protocolo de ensayos

Como recomendaciones previas al protocolo de pruebas se proponen las instrucciones de seguridad para el correcto desarrollo de los ensayos:

- 1) Familiarizarse con los equipos y todos los aspectos de la planta a escala de laboratorio y su operación.
- 2) Asegurar que todas las conexiones eléctricas (cables, conectores, interruptores, enchufes, etc.) se encuentren libres de obstrucción y humedad, así como, que los motores eléctricos cuenten con un flujo de aire para la ventilación.
- 3) Verificar que tornillos, tuercas y accesorios se encuentren en su posición y no se encuentren sueltos.
- 4) Verificar que las tapas y guardas de los componentes se encuentren en los respectivos equipos.
- 5) Ubicar la parada de emergencia de la planta y las salidas de emergencia.
- 6) Ubicar los interruptores de los motores eléctricos.
- 7) Asegurar que el ambiente de trabajo se encuentre libre de obstáculos que puedan causar accidentes.
- 8) Asegurar una correcta ventilación en el lugar para disipar tanto humos como polvo.
- 9) Contar con el equipo de protección personal (EPPs) adecuado: mameluco, botas con punta reforzada, lentes de seguridad, protectores respiratorios con filtro para polvos, protectores auditivos y guantes.

El protocolo a seguir se divide en cuatro partes. Preparación para el inicio de los ensayos, encendido, operación y apagado del circuito. Este procedimiento se basa en las recomendaciones del libro *Mineral Processing Handbook* (Weiss, 1985) y de la corporación *911 Metallurgy (Ball Mill Operation – Grinding Circuit Startup & Shutdown Procedure)*.

Se describe el procedimiento de preparación previo al inicio de los ensayos.

- 1) Extraer 100 kg del mineral recibido.
- 2) Preparar/Triturar los 100 kg a un tamaño inferior a 2mm (malla 2).
- 3) Separar en muestras de 10kg.
- 4) Verificar el funcionamiento del sistema de regulación de agua.

- 5) Verificar que el sistema de alimentación de mineral no tenga obstrucciones.
- 6) Verificar el funcionamiento del clasificador helicoidal, el molino de bolas, la regulación manual de pasantes y la bomba de pulpa mineral; así como, comprobar que no tengan obstrucciones ni que estén enarenados.
- 7) Verificar que la descarga del molino y las descargas del clasificador no tengan obstrucciones ni desechos.
- 8) Verificar las conexiones eléctricas de los motores del molino, la bomba y el clasificador helicoidal.
- 9) Verificar la ausencia de fugas en los equipos.
- 10) Verificar el correcto funcionamiento del sistema de drenaje y que no presente obstrucciones.
- 11) Cargar con mineral la tolva de alimentación al molino.

Luego de ello, se prosigue con el encendido del circuito.

- 12) Aperturar la válvula de la alimentación de agua.
- 13) Encender la bomba de transporte de pulpa.
- 14) Encender el clasificador helicoidal y colocar las platinas de regulación de pasantes.
- 15) Encender el molino y verificar que la velocidad esté estable.
- 16) Dejar operando el sistema por 10 minutos para limpiar el circuito.
- 17) Realizar mediciones de energía consumida del molino de bolas en vacío (o valor de tara) por 5 minutos para verificar su adecuado funcionamiento.
- 18) Verificar que el flujómetro de agua se encuentre operativo y marque los valores correctamente.
- 19) Verificar que la carga en la tolva se encuentre en el nivel de alimentación establecido. Observar si hay alguna obstrucción.
- 20) Encender el sistema de alimentación de mineral al molino y observar que la carga se mantenga uniforme.

Después del encendido, se deben seguir los pasos para la operación de la planta piloto.

- 21) Siguiendo la recomendación de realizar las variaciones de manera aleatoria, iniciar con el ensayo número 1, a las condiciones indicadas en la tabla de orden aleatorio de ensayos (tabla 3.4).
- 22) Fijar el flujo de alimentación de agua a las condiciones del número de ensayo e iniciar el reloj.
- 23) En el minuto 5, a la salida del clasificador (producto), llenar una bandeja con la pulpa durante el tiempo de 60 segundos. Luego, detener el llenado.
- 24) Tomar la temperatura y pesar la muestra en la balanza electrónica.
- 25) Con el valor del peso, la temperatura de la muestra húmeda y el tiempo de muestreo, hallar los valores de flujo másico de la pulpa en la descarga.
- 26) Llevar la mezcla al horno de laboratorio y mantenerla en este hasta que el agua se evapore.
- 27) Repetir los pasos del 21 al 26, para los minutos 10, 15, 20, 30, 40, 50 y 60.
- 28) Verificar que el nivel de mineral en la tolva se mantenga por encima de 60cm. Al disminuir el nivel, agregar una muestra de 10kg.
- 29) Tras concluir con los 60 minutos, apagar la planta siguiendo los pasos del 35 al 42.
- 30) Posteriormente, una vez que las 8 muestras obtenidas estén secas por completo, pesarlas en la balanza electrónica y registrar los valores.
- 31) Con las cantidades de masa de mineral seco para todos los puntos, hallar el valor de flujo másico de mineral (seco) en la descarga.
- 32) Tamizar las muestras y obtener las distribuciones de tamaño de partícula.
- 33) Cuantificar el porcentaje de pasantes de la malla 200.
- 34) Repetir los pasos del 12 al 33 para los ensayos 2, 3, 4, 5 y 6.

El apagado de la planta piloto también debe seguir un protocolo de pruebas.

- 35) Apagar la alimentación del mineral al molino de bolas.
- 36) Observar que la pulpa empiece a diluirse y quitar los niveles al mínimo posible en el clasificador helicoidal, para dejar pasar el mineral.
- 37) Apagar el clasificador helicoidal.
- 38) Apagar el molino de bolas
- 39) Apagar la alimentación de agua al molino de bolas.

- 40) Apagar la bomba.
- 41) Drenar y limpiar el interior del molino.
- 42) Drenar y limpiar el resto de componentes de la planta piloto.

En caso de apagado de emergencia, se debe proseguir con:

- 1) Apagar el molino de bolas.
- 2) Apagar los demás componentes, separadamente.
- 3) Apagar la alimentación de mineral o detenerla mecánicamente.

3.4 Procesamiento y análisis gráficos

Tras finalizar la recopilación de la información, el procesamiento de datos es necesario para una interpretación apropiada. De acuerdo al modo de representación y el análisis que se busca realizar, se deben seguir procesos distintos. Para una representación gráfica, como será desarrollada en este segmento, se trazan los valores de las variables en función del tiempo.

Asimismo, según la variable que se quiere analizar y a la cantidad de información que se tiene en cada una, se siguen diferentes procedimientos.

3.4.1 Consumo energético

La representación gráfica del consumo energético en el molino es evaluada de acuerdo a los valores de potencia obtenidos en el analizador de redes.

El analizador de redes es capaz de medir a frecuencias mayores a un 1 Hz; sin embargo, para los ensayos del presente estudio, no es necesario; pues no se busca observar fluctuaciones en rangos de tiempo menores a 1 segundo.

Los valores obtenidos se representaron en puntos espaciados cada 5 segundos, a lo largo del ensayo de 1 hora. Por lo que el total de valores obtenidos para cada réplica fue de 3600. El método estadístico empleado fue el de media móvil centrada en cada punto y se promediaron 5 valores; esto con el objetivo de suavizar las fluctuaciones.

$$MMC_t = \frac{Y_{t-2} + Y_{t-1} + Y_t + Y_{t+1} + Y_{t+2}}{5} \quad (3.2)$$

donde,

t = Punto temporal [s];

Y = Valor de potencia [W];

MMC_t = Media móvil centrada para el punto temporal t [W].

Asimismo, se realizó un gráfico para cada réplica; es decir, en cada diagrama se observan las 3 condiciones de porcentaje de sólidos. El objetivo de esta forma de descripción es observar fácilmente las diferencias entre condiciones y analizar las tendencias.

3.4.2 Tamaño de producto

La representación gráfica del tamaño de producto es evaluada de acuerdo a los valores obtenidos de los muestreos del ensayo.

Las muestras se obtuvieron en los tiempos 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 y 60 y fueron todas graficadas. El total de puntos por condición y por réplica fue de 8.

Por otro lado, es importante resaltar que el tamaño de producto fue representado en función al porcentaje de partículas de un tamaño menor a la malla 200 ($74 \mu\text{m}$) y no al P_{80} . Esto se debe a que el tamaño de producto en la mayoría de puntos tenía un P_{80} menor a $74 \mu\text{m}$, que fue el tamaño de malla en el último punto medido. Lo que quiere decir que el valor de P_{80} no podía ser encontrado dentro de las curvas obtenidas en las mediciones (ver figura 3.14).

De acuerdo con Bond (1960), en casos donde no se pueda encontrar el valor de manera experimental se puede utilizar el valor de la malla inferior, como se muestra en la tabla 3.6.

Tabla 3.6.- Valores de P_{80} para puntos menores al P_{100}

Tamaño de malla en el último punto medido o P_{100} [μm]	106	74
P_{80} [μm]	74	50

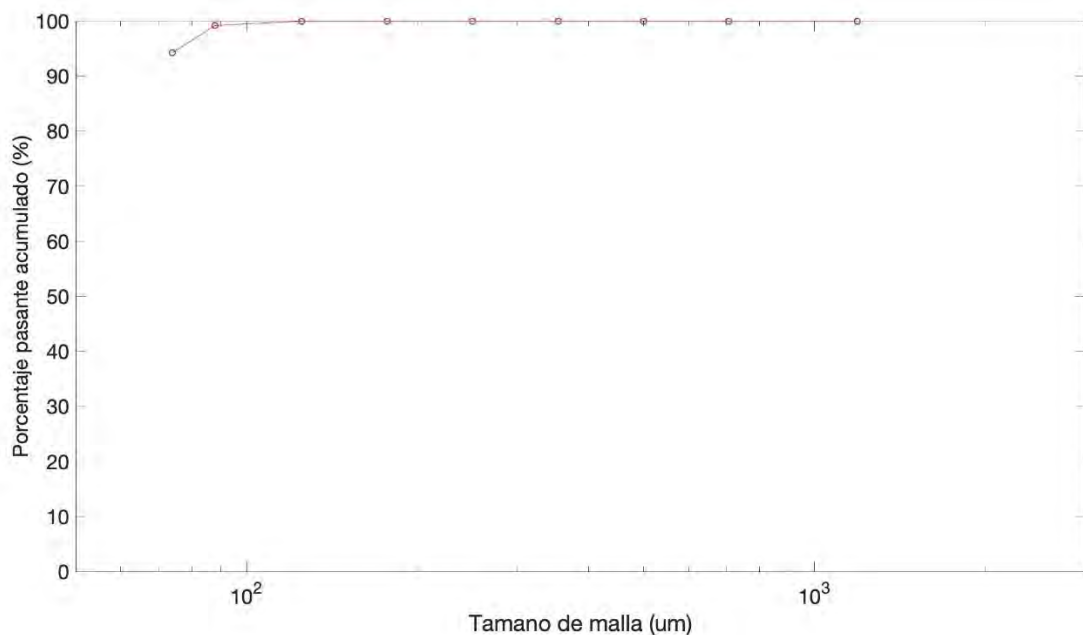


Figura 3.14.- Distribución de tamaño de partículas de la muestra obtenida en el ensayo a la condición de 66%, en la réplica 1, en el tiempo de 5 minutos.

Sin embargo, un análisis de esta naturaleza no permitiría observar ninguna tendencia; puesto que los puntos tendrían el mismo valor.

En lugar de ello se utilizó el valor del porcentaje másico, respecto al peso total de la muestra, de partículas con un tamaño inferior al valor de $74 \mu\text{m}$ o, como se llama en este documento, el porcentaje pasante de la malla 200.

3.4.3 Tasa de producto

De manera análoga al tamaño de producto, la representación gráfica de la tasa de producto es evaluada de acuerdo a los valores obtenidos de los muestreos del ensayo.

Las muestras se obtuvieron en los tiempos 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 y 60 y fueron todas graficadas. El total de puntos por condición y por réplica fue de 8.

Los valores que se usaron fueron los de masa seca; es decir, la masa pesada, luego de ser evaporada el agua de la mezcla. Este valor se divide entre el tiempo de muestreo, que fue de 60 segundos, para todos los casos, y se obtiene el valor de tasa.

3.4.4 *Work Index* de Operación

Del mismo modo que en los 2 puntos anteriores, la representación gráfica del *Work Index* de Operación es evaluado de acuerdo a los valores obtenidos de los muestreos del ensayo.

Las muestras se obtuvieron en los tiempos 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 y 60 y fueron todas graficadas. El total de puntos por condición y por réplica fue de 8.

Para el cálculo de *Work Index* de Operación primero se debe hallar la energía específica que usa el circuito. Esta se determina, como se muestra en la ecuación 1.3, dividiendo la potencia aplicada al eje del piñón del molino, respecto de la tasa de producto del sistema. Los valores de eficiencia usados fueron de 0.96 por pérdidas en la transmisión; 0.85 por pérdidas eléctricas; y adicionalmente, 0.9 por pérdidas debido al desgaste y corrosión en algunos componentes del circuito, como en ejes y rodamientos, por la propia antigüedad de la planta piloto.

Luego, el *Work Index* de Operación es calculado, teniendo en cuenta los valores de F_{80} y P_{80} , como se presenta en la ecuación 1.4.

El objetivo de este valor es mostrar la interacción de los factores de tamaño y tasa de producto y energía consumida; así como, comparar los valores entre condiciones y respecto al estándar hallado, que es el *Work Index* de laboratorio.

3.5 Procesamiento y análisis según DOE

El análisis estadístico realizado para los ensayos fue respecto al efecto de los niveles o condiciones (porcentaje de sólidos) sobre la variable de control (potencia o energía, tamaño de producto o porcentaje pasante a la malla 200, tasa de producto y *Work Index* de Operación).

Se buscó probar la igualdad (o no igualdad) de las medias de los valores de los niveles o de probar que los efectos de los niveles sean cero (Montgomery, 2013).

Montgomery (2013) indica que el procedimiento apropiado para ello es el análisis de varianza, que estudia la variabilidad de los componentes del ensayo. Esta variabilidad se puede dividir en 2 factores: (i) la suma de cuadrados de las diferencias entre los promedios de los niveles y el promedio de todos los valores; (ii) la suma de cuadrados de las diferencias de las observaciones dentro de los niveles y el promedio de los niveles.

$$SS_T = SS_{Niveles} + SS_E \quad (3.3)$$

donde $SS_{Niveles}$ es la suma de cuadrados debido a los niveles (es decir, entre los niveles), y SS_E es la suma de cuadrados debida al error (es decir, dentro de los niveles).

Estos valores, SS_E y $SS_{Niveles}$, se dividen entre los grados de libertad $N-a$ y $a-1$ (a cantidad de niveles y N cantidad de valores), respectivamente y se obtienen los cuadrados medios.

$$MS_{Niveles} = \frac{SS_{Niveles}}{a-1} \quad (3.4)$$

y

$$MS_E = \frac{SS_E}{N-a} \quad (3.5)$$

donde $MS_{Niveles}$ es el cuadrado medio de la suma de cuadrados debido a los niveles y MS_E es el cuadrado medio de la suma de cuadrados debida al error.

Luego, realizando un análisis de los valores esperados de los cuadrados medios se puede demostrar que:

$$E(MS_E) = \sigma^2 \quad (3.6)$$

y

$$E(MS_{Niveles}) = \sigma^2 + \frac{n \sum_{i=1}^a \tau_i^2}{a-1} \quad (3.7)$$

Donde $E(MS_{Niveles})$ es el valor esperado del cuadrado medio de la suma de cuadrados debido a los niveles y $E(MS_E)$ es el valor esperado del cuadrado medio de la suma de cuadrados debida al error.

Por lo tanto, MS_E estima la varianza (σ^2) y, si no hay diferencias en las medias de los niveles, lo cual implica que los efectos son igual a cero, entonces $MS_{Niveles}$ también estima la varianza. Sin embargo, si las medias de los niveles sí difieren, el valor esperado del cuadrado medio de los niveles es mayor que la varianza.

Con los valores de $MS_{Niveles}$ y MS_E , se construye el estadístico de prueba F_0 para la hipótesis de que no hay diferencias en las medias de los niveles.

$$F_0 = \frac{SS_{Niveles} / (a - 1)}{SS_E / (N - a)} = \frac{MS_{Niveles}}{MS_E} \quad (3.8)$$

Este valor F_0 es comparado con el valor estadístico F (o también llamado $F_{\text{crítico}}$), en las condiciones de $(a - 1)$ y $(N - a)$ grados de libertad. Este valor F representa el valor de la inversa de la probabilidad en una distribución normal a las condiciones del ensayo (a niveles y N valores) e intervalo de confianza α (para este caso 95%).

$$F_0 > F_{\alpha, a-1, N-a} \quad (3.9)$$

Por lo tanto, si el valor del estadístico de prueba F_0 es mayor que el valor de comparación F se rechaza la hipótesis nula (H_0) y se concluye que las medias de los niveles difieren (H_1 , hipótesis alternativa). Sin embargo, si no es mayor, la hipótesis nula (H_0) no se puede rechazar y se concluye que no hay evidencia suficiente de que las medias son diferentes.

El resumen del análisis de varianza de las pruebas de este estudio, análisis de un solo factor, se muestra en la tabla 3.7.

Tabla 3.7.- Resumen de análisis de varianza para el modelo con un solo factor

Fuente de variación	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Cuadrado medio	Valor F_0
Entre los niveles	$SS_{Niveles} = n \sum_{i=1}^a (\bar{y}_i - \bar{y}_{..})^2$	a-1	$MS_{Niveles}$	$F_0 = \frac{MS_{Niveles}}{MS_E}$
Error (dentro de los niveles)	$SS_E = SS_{Niveles} - SS_T$	N-a	MS_E	-
Total	$SS_{Niveles} = \sum_{i=1}^a \sum_{j=1}^n (y_{ij} - \bar{y}_{..})^2$	N-1	-	-

3.5.1 Consumo energético

El análisis de varianza del consumo energético toma como base los valores de potencia obtenidos en el analizador de redes.

Debido a que para realizar el análisis de varianza es necesario tener un valor representativo para cada nivel y réplica, se toma el área bajo la curva de la gráfica de potencia vs. tiempo, desarrollada de acuerdo a la sección 3.4.1. Es decir, la energía consumida en el ensayo.

3.5.2 Tamaño de producto

En el análisis de varianza del tamaño de producto, se tomó como base las muestras que se obtuvieron en los tiempos 5, 10, 15, 20, 30, 40, 50 y 60.

Como se revisó en la sección 3.4.2, la variable de análisis es el porcentaje pasante del producto por la malla 200. Para obtener un valor representativo en cada nivel y réplica, se calculó el promedio de los valores a partir del minuto 40, cuando los valores empiezan a diferenciarse.

3.5.3 Tasa de producto

Similarmente, para el análisis de varianza de la tasa de producto, con el objetivo de obtener un valor representativo para cada nivel y réplica, se calculó el promedio de los valores de tasa de producto, a partir también del minuto 40.

3.5.4 *Work Index* de Operación

Finalmente, en el análisis de varianza del *Work Index* de Operación, se toman los valores ya calculados en la sección 3.4.2 y se promedian los valores a partir del minuto 40; para cada nivel y réplica.

3.6 Expresiones para el cálculo

3.6.1 Potencia efectiva eléctrica

El parámetro de potencia efectiva eléctrica es calculado con los valores de tensión, corriente y factor de potencia medidos por el analizador de redes.

$$P_e = 3 * V * I * \cos \emptyset \quad (3.12)$$

donde,

P_e = Potencia efectiva eléctrica [kW];

V = Tensión entre líneas [V];

I = Corriente de línea [A];

$\cos \emptyset$ = factor de potencia.

3.6.2 Porcentaje de pasantes de la malla 200

La distribución de tamaños del producto es determinada tras el tamizado de cada muestra y, con ello, se determina el valor del porcentaje de pasantes de la malla 200 para cada muestra.

$$pp = \frac{m_p}{m_p + m_{np}} \quad (3.14)$$

donde,

pp = Porcentaje de pasantes de la malla 200 del producto [%];

m_p = Masa de pasantes de la malla 200 [g];

m_{np} = Masa de no pasantes de la malla 200 [g];

3.6.3 Flujo másico de producto seco

El flujo másico del producto seco se determina al medir la masa de la muestra seca y relacionarla con el tiempo de muestreo.

$$\dot{m}_{pulp} = \frac{m_h}{t} \quad (3.13)$$

donde,

\dot{m}_{prod} = Flujo másico del producto seco [g/s];

m_h = Masa de la muestra seca [g];

t = Tiempo transcurrido durante el llenado de la muestra [s];



CAPÍTULO 4

RESULTADOS

En este capítulo se presentan, mediante tablas y gráficos, los resultados obtenidos de los experimentos realizados en la planta piloto. En estos se registran las variaciones de las variables de consumo energético, porcentaje pasante de la malla 200, tasa de producto seco y *Work Index* de Operación, respecto a los parámetros de porcentaje de sólidos en la alimentación y tiempo. Asimismo, se realiza una comparación bibliográfica con los valores de energía específica de operación y potencia de molino.

Todas las figuras contienen una leyenda que indica la condición a la que se obtuvieron los valores graficados. Las condiciones con las que se trabajaron fueron los porcentajes de sólidos de 66%, 70% y 75%; así como, el número de réplicas del ensayo fue 2.

Las tablas que contienen los resultados obtenidos en los ensayos y presentados en los gráficos se encuentran detalladas en el Anexo A.

4.1 Consumo energético

La comparación del consumo de energía a 3 distintos porcentajes de sólidos en un molino de bolas de flujo continuo del Laboratorio de Mineralurgia de la PUCP es mostrado en la presente sección.

4.1.1 Resultados en función del tiempo

Réplica 1

La figura 4.1 muestra de manera gráfica la primera réplica del consumo de energía a lo largo de un período de 60 minutos para 3 porcentajes de sólidos distintos (66%, 70% y 75%). De manera general, puede ser notado que el consumo energético tiene ligeras

diferencias entre estos factores. El mayor consumo energético es a 75% de sólidos y el menor a 66%.

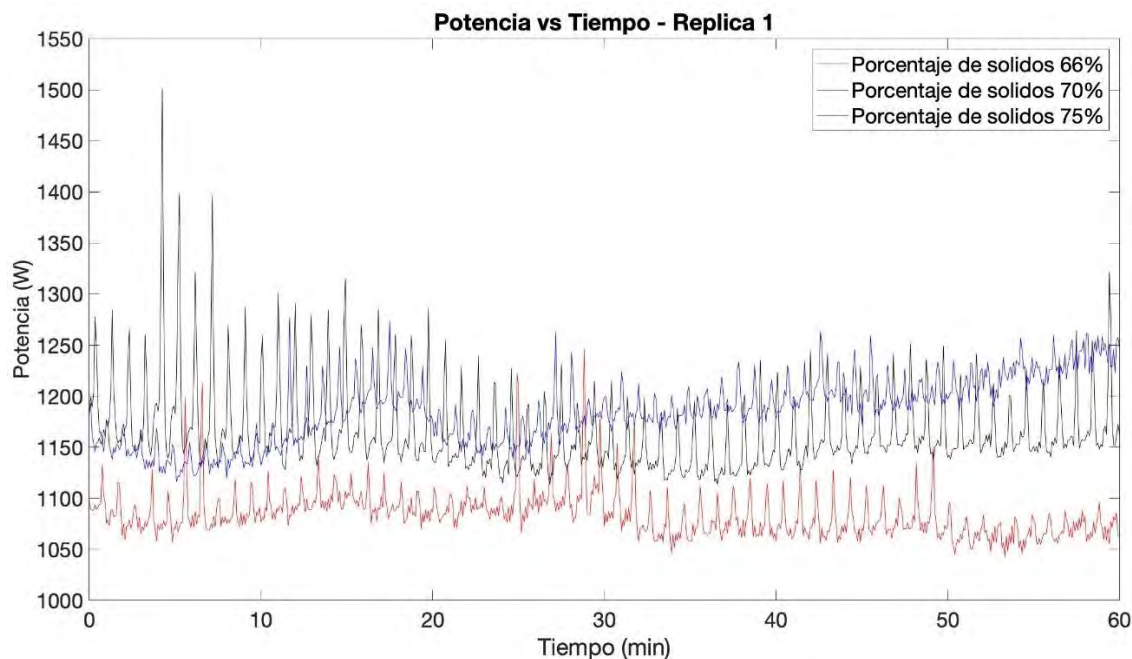


Figura 4.1.- Primera Réplica - Consumo de potencia del motor del molino de bolas para 3 porcentajes de sólidos.

Inicialmente, el consumo a 70% y 75% es bastante similar, ambos oscilan alrededor de una potencia de 1150 W hasta el minuto 15. A partir de este minuto, es donde ya empieza a ser visible el mayor consumo con la concentración de sólidos de 75%, a la cual la potencia se eleva hasta 1250 W; mientras que, a 70%, se mantiene alrededor de 1150 W.

La potencia con un porcentaje de sólidos de 66% se mantuvo en el rango de 1050 y 1100W, por debajo de las otras 2 réplicas, en todo el ensayo.

Por otro lado, en un primer tramo, los valores tienen una amplitud de oscilación mayor, de hasta 300 W; pues es el rango donde el sistema es más inestable. Sin embargo, a partir del minuto 10 del ensayo, los valores tienden a ser más uniformes y muestran una amplitud de oscilación menor, de 150 W.

Réplica 2

La figura 4.2 representa la segunda réplica del consumo de energía a lo largo del período establecido de 60 minutos para los 3 casos. En esta gráfica se observan comportamientos

menos diferenciados entre los 3 porcentajes de sólidos, comparados con los percibidos en la réplica 1.

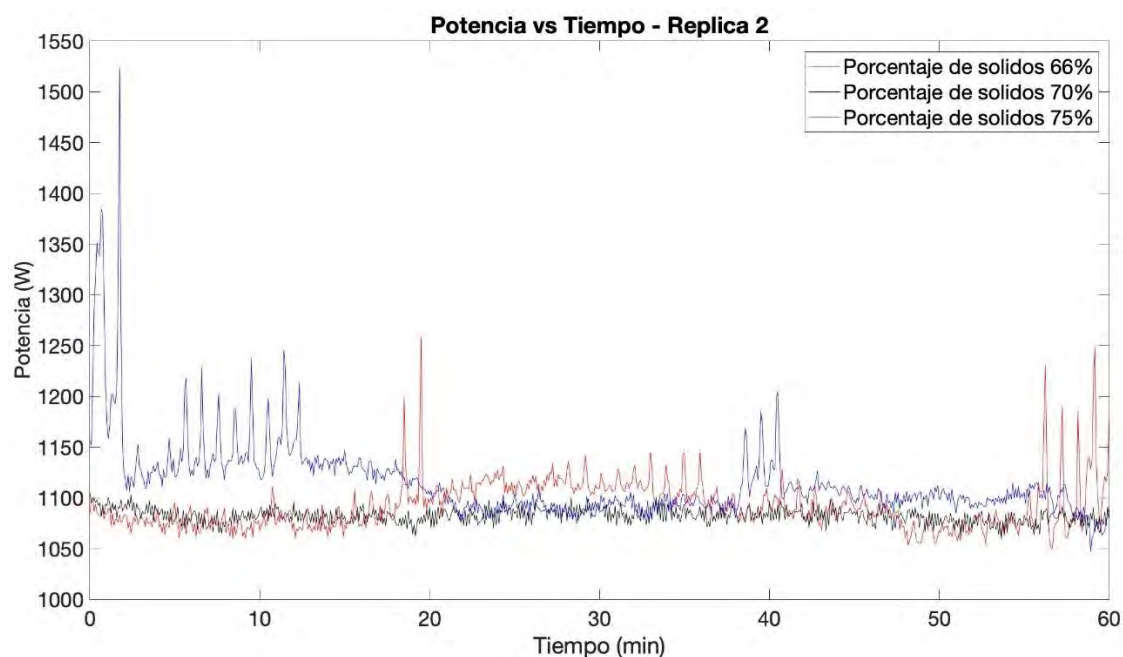


Figura 4.2.- Segunda Réplica - Consumo de potencia del motor del molino de bolas para 3 porcentajes de sólidos.

En una primera etapa, el consumo energético a 75% es mayor, fluctúa alrededor del valor de 1150 W; mientras que a 70% y 66%, lo hace ligeramente por debajo de los 1100 W. Tras el minuto 20, los valores de potencia se encuentran muy cerca del otro, con una diferencia porcentual entre ellos menor al 2%. Del minuto 20 al 35, la potencia a 66% es mayor por 30 W respecto a las concentraciones de 75% y 70% y, del minuto 40 al 60, la condición de 75% es mayor a las otras 2 concentraciones, por 20 W.

Por otro lado, en los primeros 10 minutos, el consumo energético a 75% oscila en un rango amplio de hasta 500 W, hasta entrar a un período menos oscilante desde el minuto 15. Para los casos a 66% y 70%, la oscilación se da en un rango menor a 50 W.

Análisis de las gráficas potencia vs tiempo

El aumento de consumo de energía debido al incremento del porcentaje de sólidos se basa en que, principalmente, el aumento de este último genera una mayor viscosidad en la pulpa, pues hay un aumento de las interacciones partícula-partícula. Esto,

mecánicamente, significa un mayor torque que el motor del molino debe vencer. No obstante, esta diferencia no es tan marcada debido a que la tasa de alimentación de mineral; así como, la carga de bolas de acero del molino son las mismas para las 3 concentraciones de sólidos; mientras que es la alimentación de agua al sistema, el factor de control, la condición que varía para los tres niveles. El mineral y la carga del molino son los componentes del sistema que generan mayor torque al molino durante su giro; mientras que la alimentación de agua influye de manera principal, como se mencionó previamente, en la viscosidad.

En la réplica 2, se observa una fluctuación marcada alrededor del minuto 30 para las condiciones de 70% y 75%, que tuvo como causa las fluctuaciones en la tasa de alimentación de agua (ver anexo C) y, consecuentemente, la tasa de producto (ver sección 4.4). El rápido aumento en la tasa de producto debido a las alteraciones en la alimentación de agua, aunque no tuvo influencia determinante, sí tuvo un ligero impacto en los resultados de potencia para las condiciones de 70% y 75%.

Las diferencias entre ambas réplicas son inherentes al sistema. El grado de escalamiento en un sistema de flujo continuo como el de la planta piloto reduce las diferencias entre condiciones. Asimismo, las distintas velocidades de respuesta de cada parámetro (torque en el molino, clasificación del producto en el clasificador helicoidal y descarga de producto del sistema) ante cualquier variación, son elementos que influyen en las diferencias entre cada réplica.

4.1.2 Análisis de varianza

La tabla 4.1 contiene los valores utilizados en el análisis de varianza para cada nivel, en cada réplica. Estos valores fueron obtenidos de la integral bajo la curva de las gráficas de potencia vs. tiempo y son mostrados en kilowatt-hora. Adicionalmente, se presenta el error relativo entre cada nivel.

De este análisis, se observa que la energía consumida en el molino de bolas, en un lapso de tiempo de 60 minutos, para ambas réplicas, se encuentra entre 1.082 y 1.184 kW-h. Por otro lado, el error relativo en cada nivel es menor al 7%.

Tabla 4.1.- Resultados del consumo energético de los ensayos en flujo continuo para el análisis de varianza

Porcentaje de Sólidos	Energía Consumida (kWh)		Error relativo de las medidas
	Réplica 1	Réplica 2	
66%	1.082	1.092	0.92%
70%	1.162	1.082	6.88%
75%	1.184	1.115	5.83%

La tabla 4.2 muestra el análisis de varianza de un factor, donde el factor de variación (nivel) es el porcentaje de sólidos y la variable de análisis es la energía consumida.

Tabla 4.2.- Análisis de varianza de un factor, el porcentaje de sólidos, respecto a la energía consumida

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Probabilidad	Valor de F_0	Valor crítico para F_0
Entre grupos	3.90E-03	2	1.95E-03	0.452	1.05	9.55
Dentro de los grupos	5.59E-03	3	1.86E-03	-	-	-
Total	9.48E-03	5	-	-	-	-

Como se observa en la tabla 4.2, F_0 es menor que $F_{crítico}$ por lo que estadísticamente no se puede rechazar la hipótesis nula H_0 .

Esto se debe a que las diferencias entre los niveles del porcentaje de sólidos no son tan marcadas como, por ejemplo, en el tamaño de producto (sección 4.2.2). Los valores de la réplica 2, que presenta valores de consumo de energía más similares entre los 3 niveles y donde el valor a 70% de sólidos es ligeramente menor respecto al de 66%, reducen esa diferencia y disminuyen el valor de F_0 .

4.1.3 Comparación entre condiciones

Tomando el promedio de consumo de energía, en Watts, para cada condición esquematizándolas vs. el porcentaje de sólidos en cada réplica, se obtiene la figura 4.3.

Como se puede analizar en esta gráfica, en la réplica 1, la potencia del molino aumenta a medida que el porcentaje de sólidos también lo hace. Es decir, para un valor de 75% de

porcentaje de sólidos, el consumo de energía es mayor. En la réplica 2 muestra una tendencia similar pues, si bien el valor de 70% es el menor entre las 3 condiciones, el valor de potencia a 75% es mayor que los de 66% y 70%.

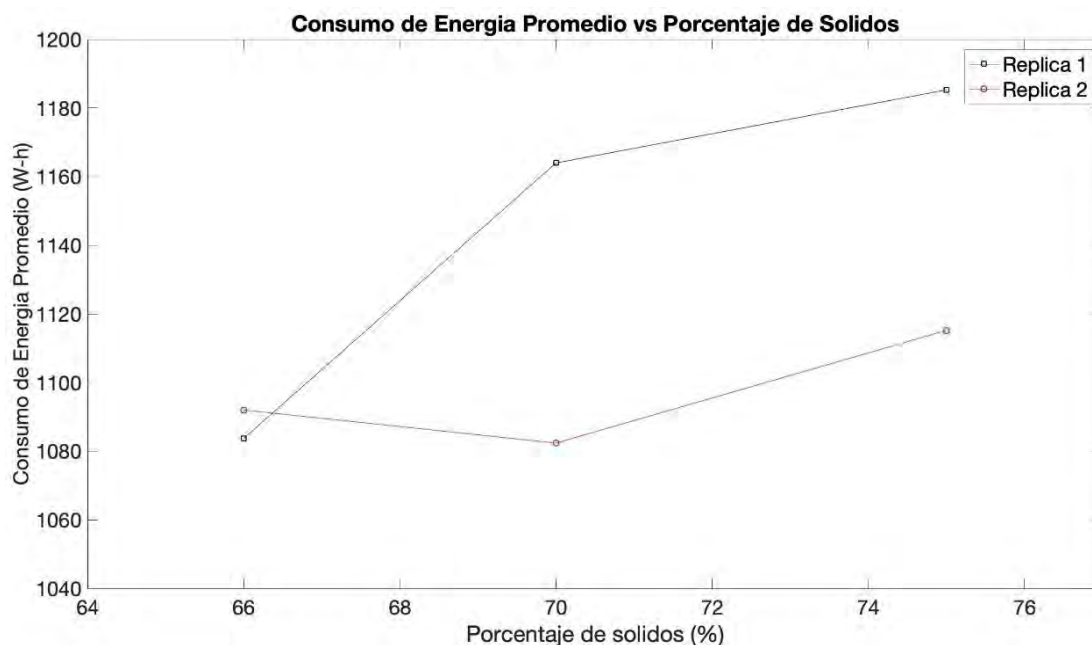


Figura 4.3.- Consumo de energía promedio vs porcentaje de sólidos.

Por otro lado, la tabla 4.3 muestra una comparación del consumo de energía entre los niveles, para cada réplica, respecto al consumo de energía a 75%.

Tabla 4.3.- Comparación porcentual del consumo energético entre niveles por cada réplica

Réplica	Consumo energético		
	SS1:66%	SS2: 70%	SS3: 75%
1	-9.42%	-2.36%	-
2	-1.44%	-2.65%	-

A pesar de que la data no sea suficiente para rechazar la hipótesis nula (H_0) en el análisis de varianza, se puede observar en esta tabla y las figuras 4.1 a 4.3 la tendencia en el consumo energético a aumentar, a mayor porcentaje de sólidos. O, desde otra perspectiva, el consumo de potencia disminuye al aumentar el flujo de agua en la alimentación al molino.

4.2 Tamaño de producto

En esta sección se muestra la comparación del tamaño de producto obtenido, medido en base al porcentaje de partículas que pasan la malla 200, a 3 distintos porcentajes de sólidos.

4.2.1 Resultados en función del tiempo

Replica 1

La figura 4.4 muestra la primera réplica de manera gráfica del tamaño de partícula, medido mediante el porcentaje pasante de la malla 200, a lo largo de un período de 60 minutos para 3 porcentajes de sólidos distintos (66%, 70% y 75%). A grandes rasgos, puede ser notada una clara diferencia entre los 3 porcentajes de sólidos a partir del minuto 40, en la que se observa que el mayor porcentaje pasante es a 75% y el menor a 66%.

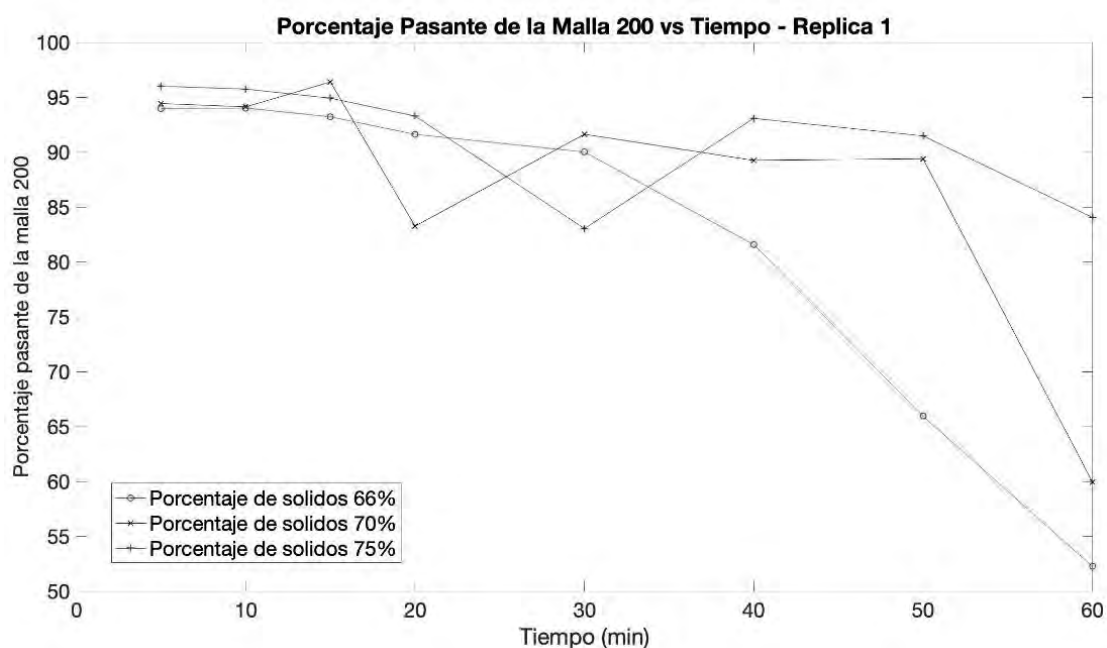


Figura 4.4.- Primera Réplica - Porcentaje de pasantes de la malla 200 del producto para 3 porcentajes de sólidos.

Al comienzo, en los 3 puntos iniciales, se observa que el tamaño de producto es muy similar para los 3 porcentajes de sólidos y se mantiene casi constante, con ligeras variaciones.

A partir del minuto 15 hasta el 40 se puede ver que el porcentaje pasante inicia una disminución constante y con poca pendiente, para las 3 condiciones y con ligeras

oscilaciones para los casos de 70% y 75%. En este tramo los valores de tamaño de producto son similares para cada condición, por lo que no se observa una diferencia significativa.

Finalmente, a partir del minuto 40, una clara tendencia puede ser notada. El porcentaje pasante para una concentración de sólidos de 66% tiene una mayor pendiente y muestra valores menores; mientras que, a 75% la pendiente es menor y los valores mayores.

Réplica 2

La figura 4.5 representa la segunda réplica del tamaño de partícula, medido mediante el porcentaje pasante de la malla 200, a lo largo del período establecido de 60 minutos para los 3 casos. En esta gráfica se observan comportamientos más diferenciados entre los 3 porcentajes de sólidos comparados con los percibidos en la réplica 1; notándose también que el mayor porcentaje pasante es a 75% y el menor a 66%.

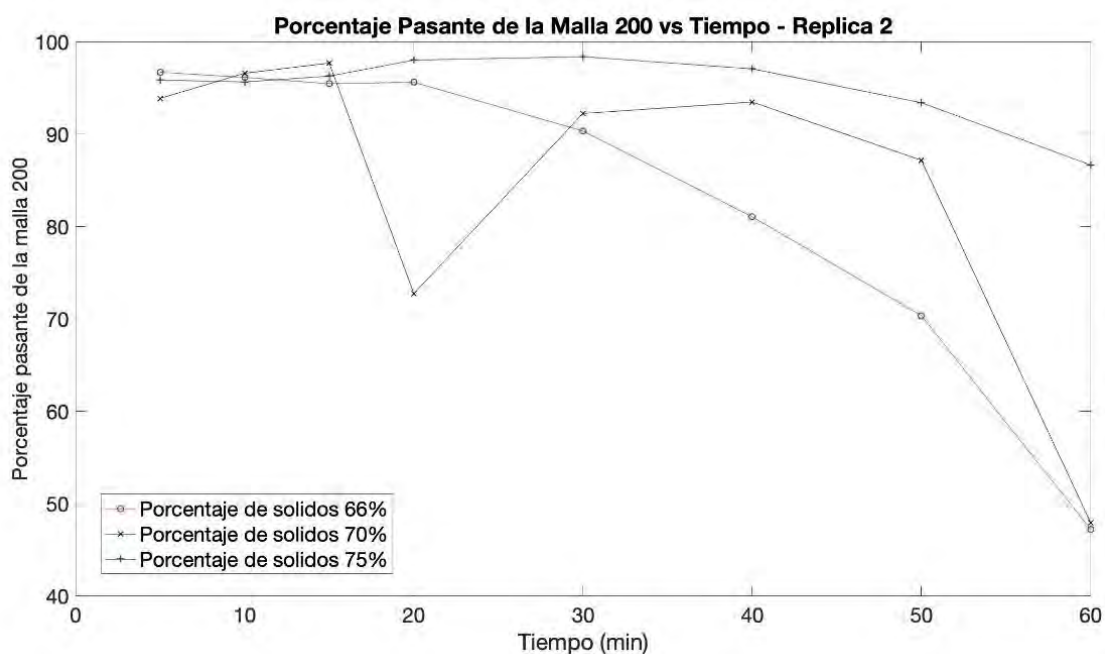


Figura 4.5.- Segunda Réplica - Porcentaje de pasantes de la malla 200 del producto para 3 porcentajes de sólidos.

De manera similar a la réplica 1, en una primera etapa, a partir del minuto 5 hasta el 15, se observa un tamaño de producto poco variable y semejante entre las 3 condiciones.

Posteriormente, a partir del minuto 20, con excepción del punto 4 (minuto 20) a 70%, se observa la diferencia marcada entre cada nivel. Del minuto 20 al 40, la inclinación de las rectas para 70% y 75% no son pronunciadas; mientras que, a partir del minuto 40, ambas pendientes incrementan. Asimismo, la tendencia para el porcentaje de sólidos de 66% se mantiene relativamente constante a partir del minuto 20.

Finalmente, se observa un porcentaje pasante menor para una concentración de sólidos de 66% y una mayor, para la concentración de sólidos de 75%.

Análisis de las gráficas porcentaje de pasantes de la malla 200 del producto vs tiempo

En ambas réplicas, se observa un primer tramo, donde los valores de porcentaje pasante son muy similares y casi constantes para cada condición. En este segmento el porcentaje de partículas pasantes de la malla 200 es bastante alto, pues el sistema está arrancando y el molino llenándose. Debido a que este último está vacío y descarga el mineral por rebose, las partículas deben permanecer más tiempo hasta ser descargadas. Esto significa un aumento en el tiempo de residencia en el molino y mayor número de impactos a cada partícula en estos primeros minutos, en comparación con los puntos siguientes. Lo que genera, por lo tanto, que la partícula sea molida a un menor tamaño.

Por la naturaleza de la clasificación, las partículas finas son las que desbordan y, por ende, en los primeros minutos, se obtiene este producto muy fino. Según esto, como el procedimiento es el mismo para cada condición, se obtienen valores semejantes en cada una de ellas.

Al transcurrir el tiempo, cada sistema empieza a tender hacia las características propias de cada condición. Las partículas muy finas de los primeros minutos ya han sido descargadas en su mayoría y dan lugar a las partículas con menor tiempo de residencia (comparados con las de los primeros minutos) en el molino. Es en base a ello, que se observa una tendencia, para los 3 niveles, a disminuir la cantidad de finos en el producto.

Entre los minutos 20 y 40, en ambas réplicas, esta tendencia no es muy pronunciada. E inclusive, en la primera réplica, no es notoria una diferencia clara entre cada condición. La razón de ello son las características inherentes del principio de funcionamiento de clasificación en el clasificador helicoidal, pues las partículas finas flotan por una cantidad de tiempo en el extremo del equipo hasta que, por rebose, son descargadas del sistema. Esto produce que la respuesta en el tamaño del producto sea lenta y la estabilización tarde.

A partir del minuto 40 se puede ver ya una distinción notoria entre cada condición y una tendencia más pronunciada para cada una. En ambas réplicas se repite que el porcentaje pasante de la malla 200 es mayor para una pulpa con 75% de porcentaje de sólidos y es menor, para una con 66%. La razón de este comportamiento es que, al tener el mineral más diluido en agua, hay un mayor cortocircuito o recirculación de partículas finas al molino, pues se diluyen en una mayor cantidad de agua. Ello puede generar, en un inicio, una clasificación más fina; sin embargo, al transcurrir el tiempo, genera una recirculación de sólidos mayor. Esto significa una mayor cantidad de sólidos en el molino y, en consecuencia, una descarga de mineral del molino más gruesa (Yianatos, 2002).

Por otro lado, se puede asumir que si bien el consumo de potencia en el molino ya es estable; es decir, la molienda es más uniforme, la estabilización del tamaño de partícula en un rango promedio toma mayor tiempo por la naturaleza misma de la clasificación en el clasificador helicoidal. Una parte de la salida del molino tiene una recirculación en el sistema, la cual debe regresar nuevamente a la descarga del molino tras un determinado tiempo. Asimismo, la descarga del producto por el clasificador helicoidal también está sujeta a un desfase temporal; pues la naturaleza de la descarga, consiste en que el flujo de los minutos siguientes es el que empuja la pulpa a la salida del sistema.

Lo analizado en los párrafos anteriores permite también explicar la variación pronunciada en el último punto (minuto 60) de los resultados obtenidos a 70% de porcentaje de sólidos que se observa en la segunda réplica. Este saltante aumento sería consecuencia de las fluctuaciones del flujo de alimentación agua entre los minutos 30 y 40. Un aumento en el flujo de agua de alimentación al sistema (ver anexo C) produce, con un desfase temporal, un mayor cortocircuito y, por ende, un producto menos fino.

4.2.2 Análisis de varianza

Siguiendo el mismo procedimiento de la sección 4.1.2, la tabla 4.4 muestra los valores utilizados en el análisis de varianza para cada nivel, en cada réplica. Estos valores fueron obtenidos del porcentaje de los últimos 3 valores para cada nivel y cada réplica. Conjuntamente, se presenta el error relativo entre cada nivel.

De este análisis, se observa que el porcentaje pasante de producto, en un lapso de tiempo de 60 minutos, para ambas réplicas, se encuentra entre 66% y 92%. Por otro lado, el error relativo en cada nivel es menor al 11%.

Tabla 4.4.- Resultados del porcentaje de pasantes de los ensayos en flujo continuo para el análisis de varianza.

Porcentaje de Sólidos	Porcentaje de Pasantes (%)		Error relativo de las medidas
	Réplica 1	Réplica 2	
66%	68.93	66.24	3.90%
70%	84.83	76.23	10.14%
75%	88.64	92.41	4.08%

La tabla 4.5 muestra el análisis de varianza de un factor, donde el factor es el porcentaje de sólidos y la variable de análisis es el porcentaje pasante de la malla 200.

Tabla 4.5.- Análisis de varianza de un factor, el porcentaje de sólidos, respecto al porcentaje de pasantes.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Probabilidad	Valor de F_0	Valor crítico para F
Entre grupos	529.17	2	264.58	0.02	16.65	9.55
Dentro de los grupos	47.68	3	15.89	-	-	-
Total	576.85	5	-	-	-	-

Como se observa en la tabla, F_0 es mayor que $F_{crítico}$ por lo que estadísticamente se puede rechazar la hipótesis nula H_0 y aceptar la hipótesis alternativa H_1 .

En este caso las diferencias entre los niveles, que son cada porcentaje de sólidos, son significativas estadísticamente. Los valores de ambas réplicas muestran visualmente la tendencia y el análisis de varianza reafirma lo observado.

4.2.3 Comparación entre condiciones

Realizando la representación gráfica de los valores usados en el análisis de varianza, que son el promedio de porcentaje de pasantes de la malla 200 de los minutos 40 al 60 para cada condición, en cada réplica; y esquematizándolas vs. el porcentaje de sólidos, se obtiene la figura 4.6.

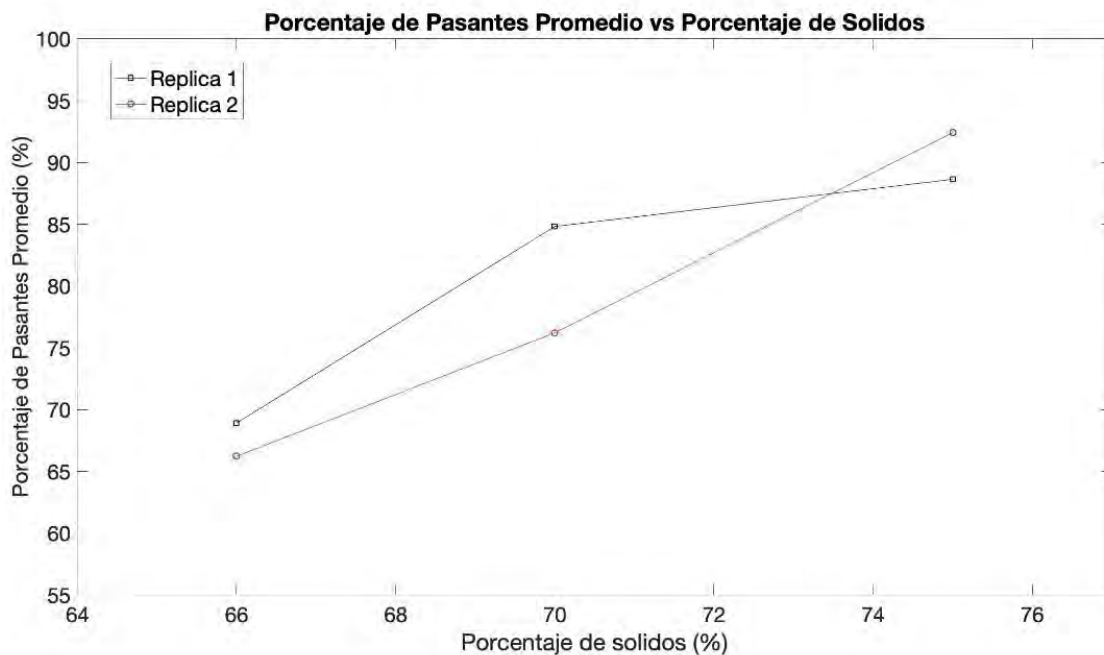


Figura 4.6.- Porcentaje de pasantes promedio vs porcentaje de sólidos.

Adicionalmente, la tabla 4.6 muestra la comparación porcentual del tamaño de partícula respecto al porcentaje de pasantes a una concentración de sólidos de 75%, entre los niveles, para cada réplica.

Esta tabla permite reafirmar, junto con la figura 4.6, lo revisado en el análisis estadístico y las figuras 4.4 y 4.5 sobre la tendencia de un mayor porcentaje de pasantes en el producto a mayor concentración de sólidos.

Esto quiere decir que al disminuir la cantidad agua en la alimentación, se obtiene mayor producto fino.

Tabla 4.6.- Comparación porcentual del porcentaje de pasantes de la malla 200 entre niveles por cada réplica.

Réplica	Porcentaje de pasantes		
	SS1:66%	SS2: 70%	SS3: 75%
1	-15.9%	-3.8%	-
2	-16.2%	-10.0%	-

El aumento de agua, hasta una disminución de 75% a 66% en el porcentaje de sólidos, generó, en los ensayos en la planta piloto, que el porcentaje de pasantes del producto por la malla 200 se reduzca entre 15 y 16%, respecto al valor obtenido a 75% de porcentaje de sólidos.

4.3 Tasa de producto

El comparativo de la tasa de producto, medido en gramos por segundo, a 3 diferentes porcentajes de sólidos es analizado en este segmento.

4.3.1 Resultados en función del tiempo

Replica 1

La figura 4.7 muestra la primera réplica de manera gráfica de la tasa de producto seco (sin agua), en gramos por segundo, a lo largo de un período de 60 minutos para 66%, 70% y 75% de porcentajes de sólidos. De manera general, puede ser notada una ligera tendencia en la condición de 66%, a ser la mayor entre los 3 casos.

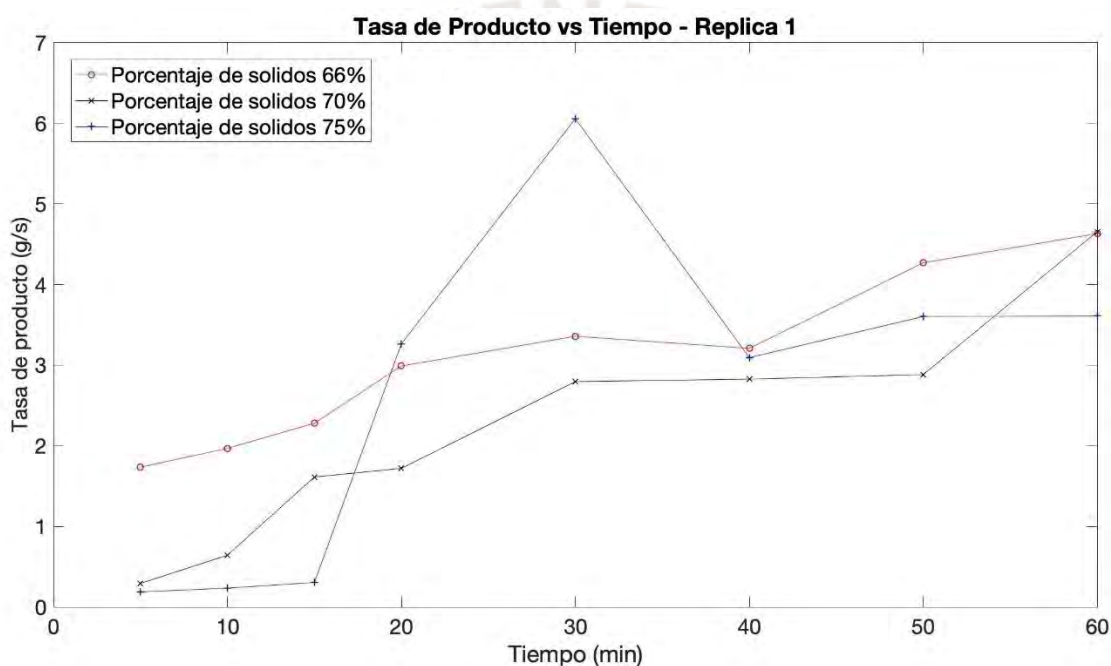


Figura 4.7.- Primera Réplica – Tasa de producto para 3 porcentajes de sólidos.

En los 3 primeros puntos, se observa una clara diferencia, siendo la tasa a la concentración de sólidos de 66% la mayor y, la de 75%, la menor. Asimismo, a lo largo del ensayo, para los 3 casos, la tasa incrementa con el tiempo; por lo que los valores en estos primeros minutos, son menores respecto a los puntos siguientes.

Para la condición de 75%, del minuto 20 al 30, la tasa tuvo un incremento abrupto y, luego, un descenso en la misma magnitud. Posteriormente, del minuto 40 al 60, se incrementó ligeramente.

En el caso de los porcentajes de sólidos a 66% y 70%, la tasa aumentó de manera constante y con una pendiente poco pronunciada.

La condición con los valores mayores fue la de 66% y la de menor no es gráficamente clara entre 70% y 75%.

Réplica 2

La figura 4.8 representa la segunda réplica de la tasa de producto seco (sin agua), en gramos por segundo, a lo largo del período establecido de 60 minutos para los 3 casos. En esta gráfica se observan comportamientos similares a los percibidos en la réplica 1, donde se puede notar que la condición de 66% tiende a ser la mayor entre los 3 casos.

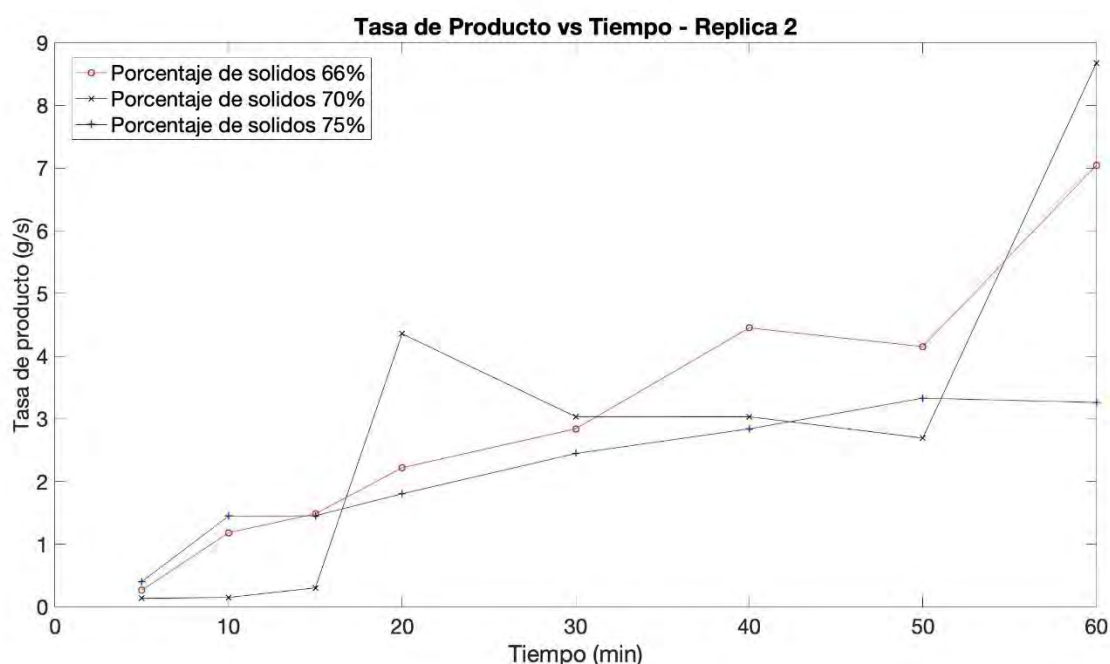


Figura 4.8.- Segunda Réplica – Tasa de producto para 3 porcentajes de sólidos.

De manera similar a la primera réplica, en los primeros puntos, se advierte una tasa de producto menor respecto a los puntos siguientes, en un rango de 0 a 2 g/s. En este caso, la tasa más baja es a la condición de 70% y la más alta, ligeramente superior a la de 66%, es a 75%.

Para la concentración de sólidos de 70%, se percibe un rápido acrecentamiento en el minuto 20 y, del minuto 30 al 50, una disminución lenta pero constante. En el último punto, la tasa se incrementó abruptamente, por encima del valor de 8 g/s.

En el caso de los porcentajes de sólidos a 66% y 75%, la tasa aumenta de manera constante y con una pendiente poco pronunciada a lo largo de los 60 minutos; con excepción del punto en el minuto 60 para la condición de 66%, donde el valor llega rápidamente a 7 g/s.

Por otro lado, hasta el minuto 50, los valores se mantienen por debajo de 5 g/s. No obstante, como se menciona en los párrafos anteriores, en el minuto 60, tanto la condición de 66% como la de 70% llegaron por encima de 7 g/s.

La condición con los valores mayores fue la de 66% y la de menor no fue gráficamente clara entre 70% y 75%.

Análisis de las gráficas tasa de producto vs tiempo

Los comportamientos observados muestran que los valores de tasa aumentan al transcurrir los minutos.

Por otro lado, al comienzo, como el sistema está iniciándose, la tasa es menor comparada al resto de puntos. Esto es debido a que el molino de bolas comienza con el llenado de su interior y el rebose va en aumento.

Cabe resaltar que, en los primeros 3 puntos de la primera réplica, se observó que la tasa de producto a 66% es mayor respecto a las de 70% y 75%; y, la tasa a 70%, mayor a la de 75%. Asimismo, en la réplica 2, la tasa de producto a 66%, en los mismos puntos, fue mayor que la de 70% y similar a la de 75%. En ambos casos, como se mencionó en la descripción por réplica, la condición con los valores más altos fue la de 66% y la que tuvo los menores no fue distinguida, de manera gráfica, entre 70% y 75%.

De manera general, la tasa de producto fue mayor al aumentar la alimentación de agua. Ello es comprensible, pues al ingresar mayor agua al sistema, mayor caudal se tendrá en la salida; lo que conlleva también, a un mayor arrastre de producto. Esto también explica el pequeño pico entre los minutos 20 y 40 para el porcentaje de sólidos a 75%; pues esa menor cantidad de producto expulsada requirió ser aliviada.

Por último, de manera análoga a lo observado en la sección 4.2, la fluctuación pronunciada del último punto de la condición a 70% en la réplica 2 sería consecuencia de un aumento en la tasa de alimentación agua al sistema en esta condición. Ello genera, con cierto desfase temporal, mayor arrastre de mineral.

4.3.2 Análisis de varianza

La tabla 4.7 muestra los valores utilizados en el análisis de varianza para cada nivel, en cada réplica. Estos valores fueron obtenidos del porcentaje de los valores a partir del minuto 30 para cada nivel y cada réplica. Asimismo, se presenta el error relativo entre cada nivel.

De este análisis, se observa que la tasa de producto, en un lapso de tiempo de 60 minutos, para ambas réplicas, se encuentra entre 3 y 5 g/s. Por otro lado, el error relativo en cada nivel es de hasta 28%.

Tabla 4.7.- Resultados de la tasa de producto en los ensayos en flujo continuo para el análisis de varianza.

Porcentaje de Sólidos	Tasa de producto (%)		Error relativo de las medidas
	Réplica 1	Réplica 2	
66%	4.037	5.216	22.6%
70%	3.455	4.800	28.0%
75%	3.436	3.144	8.5%

La tabla 4.8 muestra el análisis de varianza de un factor, donde el factor es el porcentaje de sólidos y la variable de análisis es el porcentaje pasante de la malla 200.

Tabla 4.8.- Análisis de varianza de un factor, el porcentaje de sólidos, respecto a la tasa de producto.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Probabilidad	Valor de F_0	Valor crítico para F
Entre grupos	1.825	2	0.912	0.326	1.667	9.552
Dentro de los grupos	1.643	3	0.548	-	-	-
Total	3.468	5	-	-	-	-

Como se observa en la tabla 4.8, F_0 es menor que $F_{crítico}$ por lo que estadísticamente no se puede rechazar la hipótesis nula H_0 .

El análisis de varianza muestra que estadísticamente no hay una diferencia significativa entre las tasas de producto para cada condición. Esto se debe principalmente a los altos errores relativos entre cada réplica, lo que muestra, estadísticamente, poca repetitividad.

4.3.3 Comparación entre condiciones

Realizando la representación gráfica de los valores usados en el análisis de varianza, que son el promedio de tasa de producto de los minutos 40 al 60 para cada condición, en cada réplica; y esquematizándolas vs. el porcentaje de sólidos, se obtiene la figura 4.9.

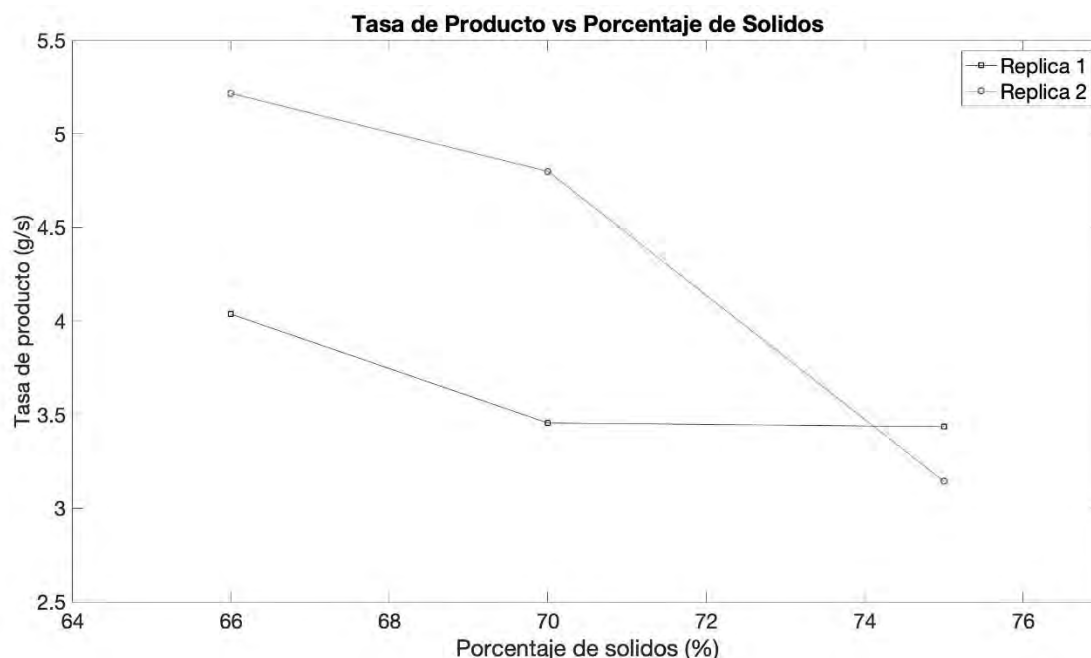


Figura 4.9.- Tasa de producto promedio vs porcentaje de sólidos.

Adicionalmente, la tabla 4.9 muestra la comparación porcentual de la tasa de producto promedio respecto al porcentaje de pasantes a una concentración de sólidos de 75%, entre los niveles, para cada réplica.

Tabla 4.9.- Comparación porcentual de la tasa de producto promedio entre niveles por cada réplica.

Réplica	Tasa de producto promedio		
	SS1:66%	SS2: 70%	SS3: 75%
1	+17.5%	+0.6%	-
2	+65.9%	+52.7%	-

Esta tabla permite reafirmar, junto con la figura 4.9 y el análisis estadístico, que no se tiene una repetitividad en los valores promedio de tasa de producto por condición. Esto es comprensible en este caso pues, como se menciona en las secciones 4.1 y 4.2, las características inherentes del sistema generan un retraso en el tiempo de respuesta y es claro que este parámetro no ha terminado de estabilizar. La teoría indica que eventualmente, se debe llegar a un equilibrio másico en el sistema para las 3 condiciones.

Las variaciones fueron solo en el flujo de agua, mas no en el de mineral, por lo que la tasa de producto (salida) debe igualar el flujo másico de alimentación de mineral (entrada).

No obstante, durante este período, ambas réplicas muestran tendencias similares de manera gráfica, donde claramente la condición de 66% muestra mayores valores en ambas condiciones. Como se menciona en el análisis gráfico, al ingresar mayor agua al sistema, el aumento de caudal en la salida conlleva a un mayor arrastre de producto. Esto quiere decir que al disminuir la cantidad agua en la alimentación, se obtiene menor tasa de producto en este período.

4.4 Work Index de Operación

En la sección actual es presentado el análisis de *Work Index* de Operación, a 3 porcentajes de sólidos en la alimentación.

4.4.1 Resultados en función del tiempo

El valor del *Work Index* de Operación tiene como objetivo mostrar la interacción de los factores de tasa de producto, energía consumida y tamaño de producto. Esta variable es obtenida calculando primero la energía específica de operación, que se obtiene al dividir la potencia del molino entre la tasa de producto del circuito. Luego, se compara con los tamaños de partícula del producto y la alimentación, según las ecuaciones mostradas en el capítulo 1.

Al observar el comportamiento del *Work Index* de Operación, se puede formar una idea más clara de cómo influyen cada uno de estos factores en el desempeño del sistema. A menor *Work Index* de Operación, menor energía es requerida para producir una misma cantidad de partículas finas. Es decir, esta variable busca comparar la eficiencia del sistema para cada condición.

Replica 1

La figura 4.10 muestra la primera réplica de manera gráfica de los resultados de *Work Index* de Operación, a lo largo de los minutos 20 a 60 para 66%, 70% y 75% de porcentajes de sólidos en la alimentación. A grandes rasgos, a partir del minuto 30, puede ser notada una diferencia en la condición de 70%, respecto a las condiciones de 66% y

70%. Entre las condiciones de 66% y 70%, se puede observar una ligera tendencia en la condición de 66% a un valor menor respecto a la condición de 75%.

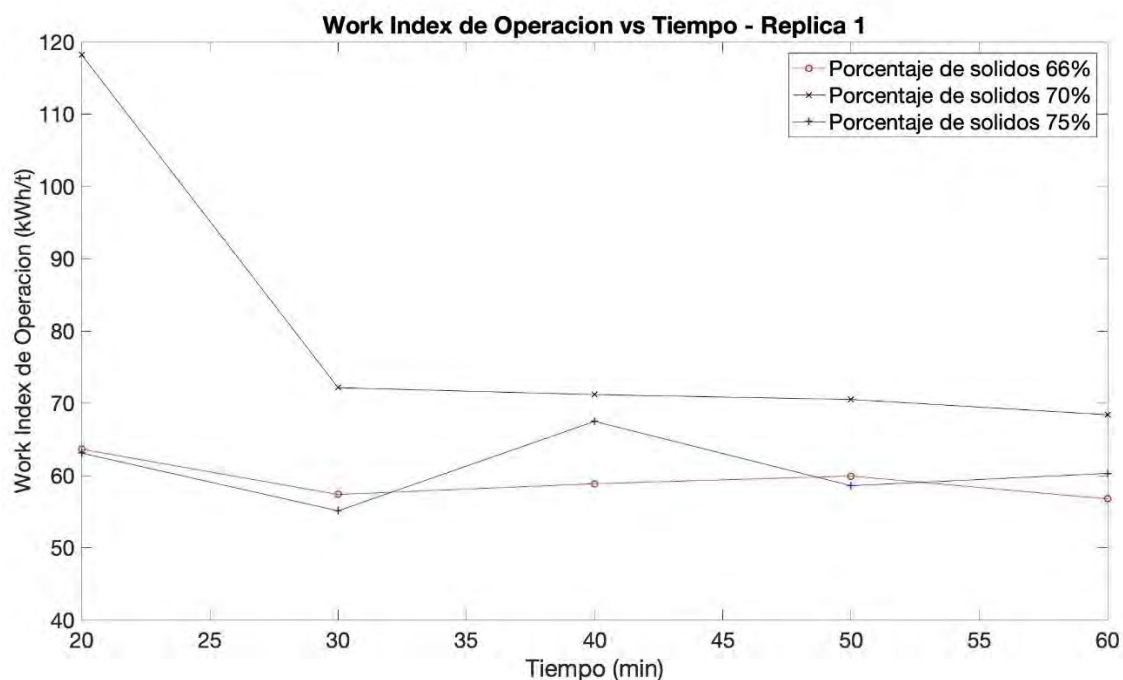


Figura 4.10.- Primera Réplica – *Work Index* de Operación para 3 porcentajes de sólidos

Los 3 primeros puntos, minutos 5, 10 y 15, no son mostrados debido a disparidad con los valores de los minutos posteriores, a causa del arranque del sistema. Durante el inicio, la tasa de descarga del producto es mínima, como se observó en las figuras 4.7 y 4.8, lo que genera un *Work Index* de Operación elevado (ver tabla A.4).

La condición de 70%, a partir del minuto 30 se mantiene alrededor del valor de 70 kWh/t, por encima de las condiciones de 66% y 75%; mientras que, estas últimas oscilan alrededor de 60kWh/t, observándose una ligera tendencia en la condición de 66% a un valor menor, respecto a la condición de 75%.

Réplica 2

La figura 4.11 representa la segunda réplica del *Work Index* de Operación, a lo largo del período establecido de 20 a 60 minutos para los 3 casos. En esta gráfica se observan comportamientos más oscilantes y en un rango más amplio; así como, una distinción menos clara entre las 3 condiciones, comparado con lo percibido en la réplica 1.

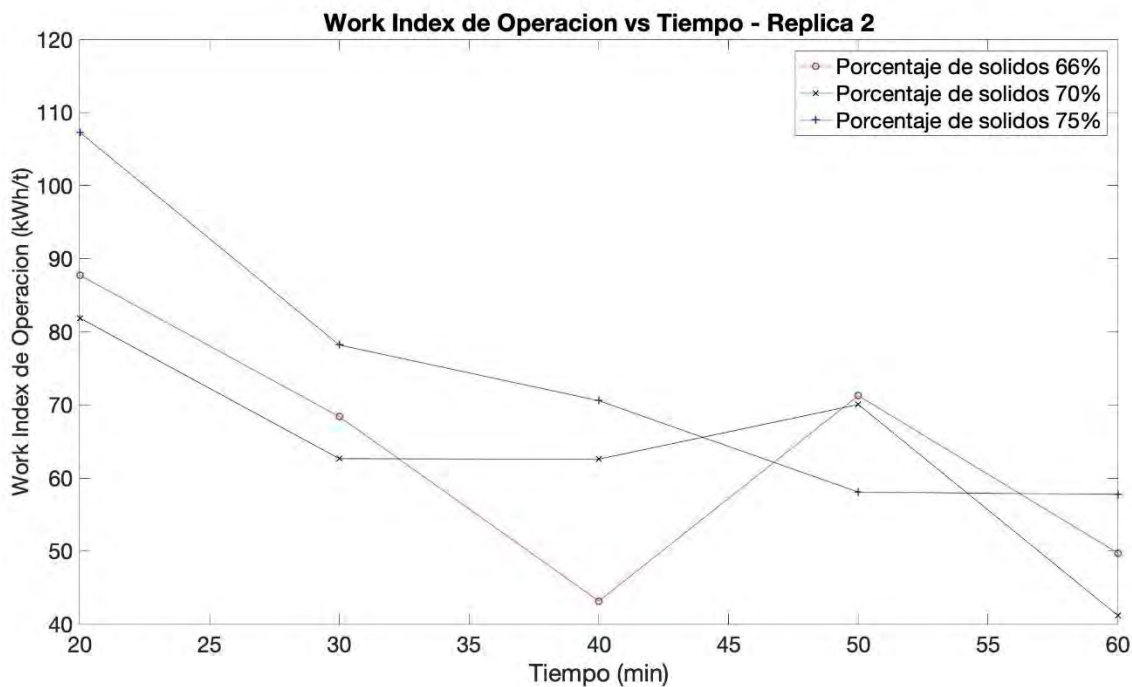


Figura 4.11.- Segunda Réplica - *Work Index* de Operación para 3 porcentajes de sólidos

De manera análoga a la réplica 1, a causa del arranque del ensayo, los puntos de los minutos 5, 10 y 15 no son mostrados por la amplia diferencia con los valores de los minutos posteriores.

Posteriormente, en los minutos 20 y 30, se aprecia una diferencia, con tendencia a disminuir, entre las condiciones, siendo en esta ocasión la condición de 75% de porcentaje de sólidos la de mayor *Work Index* de Operación y la de 70%, la de menor valor.

A partir del minuto 40, en la condición de 75%, se observa una tendencia hacia un valor cercano al 60 kWh/t; para la condición de 70%, se muestra entre el rango de 60 y 70 hasta el minuto 60, en el cual tiene una caída pronunciada hasta un valor cercano a 40; y para 66%, se observa una oscilación entre el rango de 40 y 70 kWh/t.

Análisis de las gráficas Work Index de Operación vs tiempo

En ambas réplicas, se observa un primer tramo, de los minutos 5, 10 y 15, donde los valores son más altos comparados a los puntos siguientes (ver tabla A.4), en una proporción de 10 a 1.

En este segmento, si bien el porcentaje de partículas pasantes de la malla 200 es alto, señal de un valor menor de P_{80} respecto a los puntos de minutos posteriores (ver figuras 4.4 y 4.5), debido al mayor tiempo de residencia en el molino; es la tasa de producto la que es baja (ver figuras 4.7 y 4.8), pues el sistema está arrancando y tanto el molino de bolas como el clasificador helicoidal llenándose. Al comparar esta tasa con una potencia de molino más estable en todos los puntos, es indudable que el *Work Index* de Operación tienda a ser considerablemente más elevado.

La diferencia entre las condiciones en el minuto 20 es el reflejo de los arranques distintos en cada condición y cada réplica (ver figuras 4.7 y 4.8). En la réplica 1, en este punto, la condición de 70% fue la que tuvo un valor menor de tasa, mientras que la condición de 75% tuvo una subida rápida, que la colocó como la de mayor valor, y la condición de 66% se mantuvo por encima de la de 70%, como en los minutos anteriores. En la réplica 2, sucede algo similar para la condición de 75%. El valor de tasa es el menor en este minuto, en comparación con la de 66% y con la de 70%, que tuvo también un aumento rápido en este minuto.

A partir del minuto 30, con una tasa creciente, pero con menor pendiente; los valores de *Work Index* de Operación se mantienen ya en un rango similar para las 3 condiciones y se puede observar, en mayor medida, la influencia de los otros 2 parámetros.

En la réplica 1, las condiciones de 66% y 75% mantienen valores similares pues las tasas de producto para ambos son similares y la interacción de los efectos de la potencia (menor para la condición de 66%) y el tamaño de producto (menor para la condición de 75%) se cancelan. Esto se observa, por ejemplo, en el minuto 30. La condición de 75%, a pesar de tener un valor alto en la tasa de producto en ese punto, no mostró la misma tendencia pronunciada en el *Work Index* de Operación, pues mostró, por otro lado, un bajo valor en el tamaño de producto; así como, un valor de potencia que durante todo el ensayo fue mayor. Esa interacción de condiciones dio como resultado un valor de *Work Index* de Operación muy similar al del caso de 66%.

El valor de potencia, que fue menor durante toda la réplica, y la tasa de producto, que también fue ligeramente superior en los minutos 50 y 60, inclinó la tendencia del *Work Index* de Operación de la condición de 66% a ser el menor de los 3 niveles.

Para el porcentaje de sólidos de 70%, por otro lado, se mantiene consistentemente por encima de las otras condiciones debido a la tasa que es siempre menor. Los efectos del

promedio de potencia y tamaño de producto, que se mantiene entre los de 66% y 75%, mantienen la tendencia. Esto es más visible en el minuto 60, donde tuvo una subida rápida en la tasa de producto, pero una caída también marcada en el tamaño de producto. Esta interacción de efectos, mantuvo el valor de *Work Index* de Operación en el mismo rango de los valores anteriores y por encima de las condiciones de 66% y 75%.

En la réplica 2, debido a que los valores de potencia son más similares para las 3 condiciones (ver figura 4.2), los factores que influyen más son el tamaño y tasa de producto. Asimismo, en esta réplica, a pesar de que se muestran tendencias menos claras, se puede observar en el minuto 30 que las diferencias entre condiciones en el *Work Index* de Operación, respecto al minuto 20, se acortan, como reflejo de un acercamiento también en los valores de tasa de producto.

En el minuto 40, el valor de *Work Index* de Operación es menor para 66%, pues presenta la mayor tasa de producto. No obstante, para el minuto 50, se eleva debido a que el tamaño de producto empieza a disminuir rápidamente. Para el minuto 60, un elevado aumento en la tasa, revierte la tendencia y cae por debajo del valor de 75% nuevamente.

Para el caso de 70%, se observa que en el minuto 40 y 50, se acerca a valores similares a los de la réplica 1, alrededor de 70kWh/t, reflejo de una tasa baja y la anulación de los efectos de potencia y tamaño. Sin embargo, la caída rápida en el minuto 60 se da en respuesta a un altísimo y atípico valor de tasa.

La condición de 75%, por otro lado, se mantiene consistentemente en un rango de 60 a 70 kWh/t, con menor oscilación y aproximándose a valores y comportamientos similares a los de la réplica 1.

4.4.2 Análisis de varianza

La tabla 4.10 muestra los valores utilizados en el análisis de varianza para cada nivel, en cada réplica. Estos valores fueron obtenidos del porcentaje de los últimos 3 valores para cada nivel y cada réplica, con excepción del valor en el minuto 60 de la réplica 2 para la condición de 70%. Asimismo, se presenta el error relativo entre cada nivel.

Tabla 4.10.- Resultados del *Work Index* de Operación promedio de los ensayos en flujo continuo para el análisis de varianza.

Porcentaje de Sólidos	<i>Work Index</i> de Operación Promedio (%)		Error relativo de las medidas (%)
	Réplica 1	Réplica 2	
66%	58.52	54.71	6.9%
70%	70.04	66.31	5.6%
75%	62.12	62.13	0.0%

De este análisis, se observa que el *Work Index* de Operación promedio, para ambas réplicas, a partir del minuto 30, se encuentra entre 50 y 70 kWh/t y que el error relativo en las condiciones no es mayor a 7%.

La tabla 4.11 muestra el análisis de varianza de un factor, donde el factor es el porcentaje de sólidos y la variable de análisis es el *Work Index* de Operación.

Tabla 4.11.- Análisis de varianza de un factor, el porcentaje de sólidos, respecto al *Work Index* de Operación.

Origen de las variaciones	Suma de cuadrados	Grados de libertad	Promedio de los cuadrados	Probabilidad	Valor de F_0	Valor crítico para F_0
Entre grupos	133.79	2	66.90	0.030	14.17	9.552
Dentro de los grupos	14.16	3	4.72	-	-	-
Total	147.96	5	-	-	-	-

Como se observa en la tabla, F_0 es mayor que $F_{crítico}$ por lo que estadísticamente se puede rechazar la hipótesis nula H_0 y aceptar la hipótesis alternativa H_1 .

El análisis de varianza muestra que estadísticamente hay una diferencia significativa entre los valores de *Work Index* de Operación para cada condición.

4.4.3 Comparación entre condiciones

Tomando el promedio de *Work Index* de Operación de los minutos 40 al 60, para cada condición y réplica, con excepción del valor en el minuto 60 de la réplica 2 para la condición de 70%; y esquematiéndolas en función del porcentaje de sólidos, se obtiene la figura 4.12.

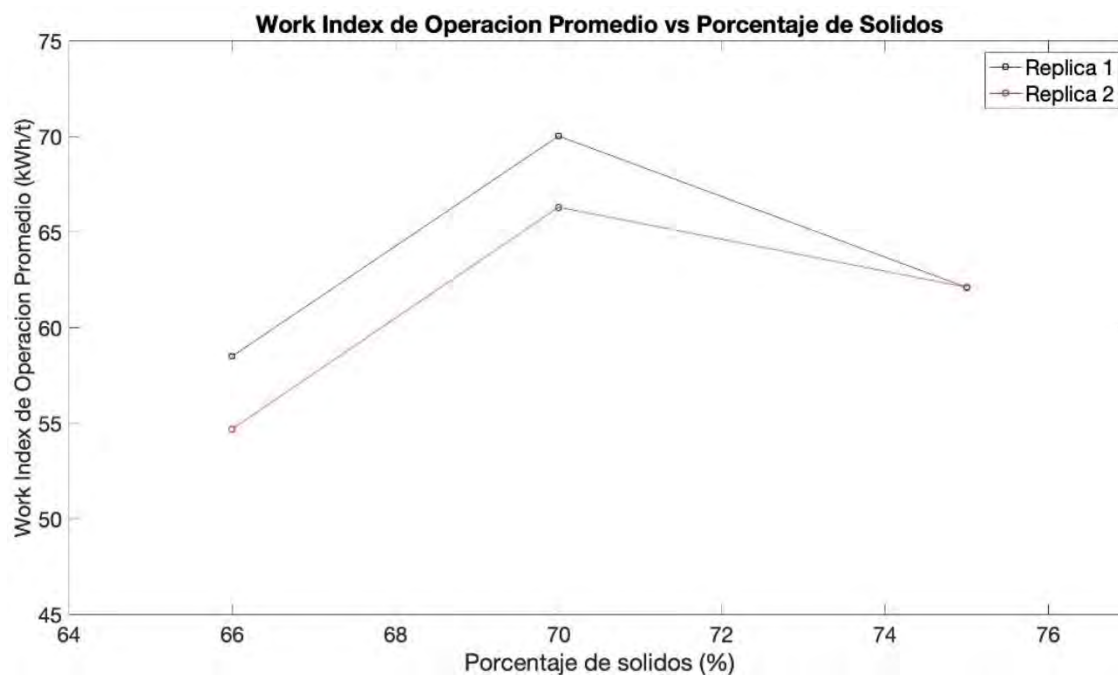


Figura 4.12.- *Work Index* de Operación promedio vs porcentaje de sólidos.

Al observar esta gráfica, se puede visualizar una tendencia en ambas réplicas. Esta indica que el menor promedio de *Work Index* de Operación obtenido se dio a 66% y el mayor a 70%. A pesar de las variaciones en la réplica 2, se observa que el promedio coincide en valores similares a los obtenidos en la réplica 1.

Por otro lado, la tabla 4.12 muestra la comparación del promedio de *Work Index* de Operación entre los niveles, para cada réplica, respecto al porcentaje de pasantes a una concentración de sólidos de 75%.

Tabla 4.12.- Comparación porcentual del *Work Index* de Operación entre niveles por cada réplica.

Réplica	<i>Work Index</i> de Operación Promedio		
	SS1:66%	SS2: 70%	SS3: 75%
1	-5.8%	+12.7%	-
2	-11.9%	+6.7%	-

Como se observa en la tabla 4.12, al realizar una comparación en cada réplica respecto al *Work Index* de Operación con el porcentaje de sólidos de 75%, los valores obtenidos a la condición de 66% fueron 5.8% y 11.9% menores. Por otro lado, para el caso de 70% se visualiza que los valores son mayores 12.7% y 6.7%.

Este conjunto de gráficos y tablas permite visualizar y confirmar la tendencia en los resultados de *Work Index* de Operación para el caso del porcentaje de sólidos de 66%. El valor numérico es el menor entre los 3 niveles para ambas réplicas, se visualizó gráficamente y se pudo confirmar lo mismo de manera estadística.

Para el caso de 70%, se obtuvieron los valores más altos de *Work Index* de Operación y para 75%, un valor intermedio.

Por otro lado, al comparar los valores de *Work Index* de Operación promedio respecto al referente determinado en la sección 3.2.5 y, empleando la relación de W_i/W_{i0} presentada en el capítulo 1, se observan valores entre 0.28 y 0.4. Esto muestra que el circuito tiene posibilidades de seguir siendo optimizado.

4.5 Comparación bibliográfica

En esta sección se realiza una comparación con los ensayos de Jankovic (2003) y con los de Gao (1996), para los ensayos en flujo continuo en la planta piloto.

4.5.1 Energía específica respecto al tamaño de producto

Si se compara la energía específica de operación, hallada en el cálculo de *Work Index* de Operación en la sección 4.4, respecto al tamaño de partícula del producto, se obtienen tendencias las figuras 4.13 y 4.14. Estos gráficos buscan mostrar las tendencias de gasto energético para reducir una misma cantidad de mineral a distintos tamaños de partícula. En este caso, para el tamaño de producto se utiliza el porcentaje pasante de la malla 200. Asimismo, de manera similar a las secciones anteriores, para la obtención de estos gráficos se tomaron los últimos 3 valores de cada réplica, donde se observa de manera más clara las tendencias y diferencias entre cada condición.

Réplica 1

La figura 4.13 muestra una ligera tendencia en las 3 condiciones, a aumentar la energía específica a mayor porcentaje pasante de la malla 200; es decir, mayor energía es necesaria para obtener una misma cantidad de producto, pero más fino.

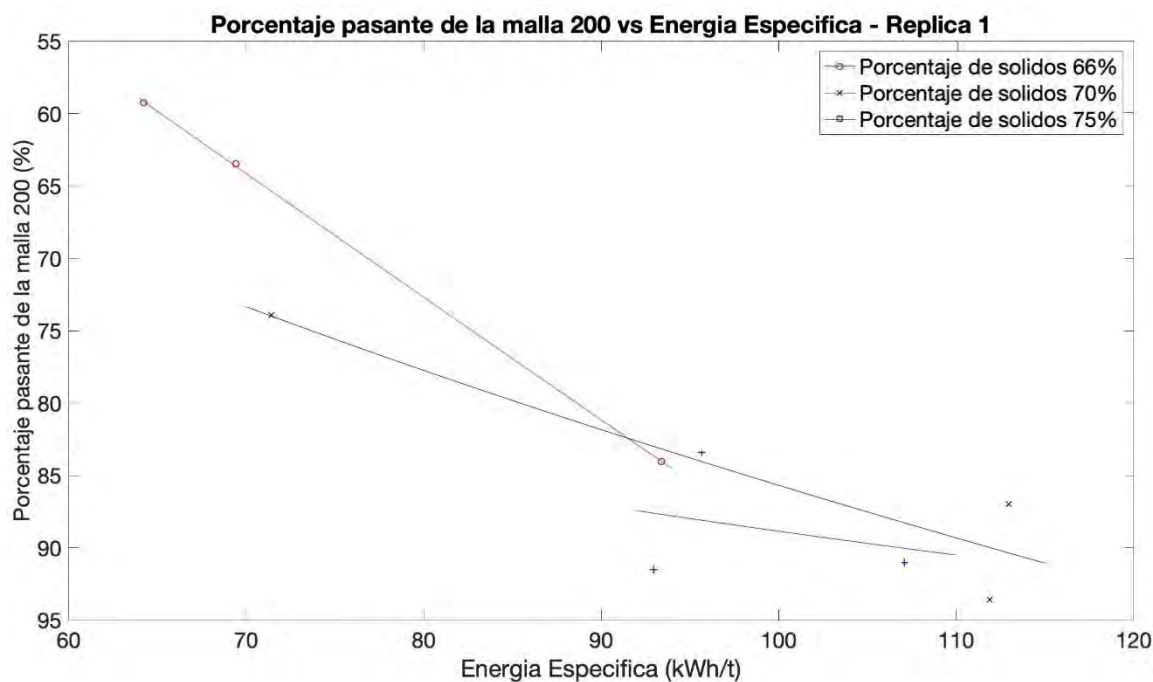


Figura 4.13.- Primera Réplica – Porcentaje pasante de la malla 200 vs Energía específica

Se observa también que a 66% de concentración de sólidos se tienen valores menores de energía específica, pero también menor porcentaje pasante de la malla 200 comparado a las otras 2 condiciones. La curva de 75% es la que se muestra ligeramente mayor en energía específica y porcentaje pasante y la de 70% se sitúa entre ambas.

Réplica 2

En la segunda réplica se muestran tendencias similares a la primera. La energía específica tiende a aumentar a mayor porcentaje pasante de la malla 200.

A pesar de que el valor de 34 kW/h de la condición en 70% es atípico a las tendencias mostradas por los demás puntos, se puede percibir que las tendencias coinciden con la réplica 1. A 66% de concentración de sólidos se tienen valores menores de energía específica y porcentaje pasante de la malla 200; así como, la curva de 75% es la que se muestra ligeramente mayor en energía específica y porcentaje pasante, y la de 70% se sitúa entre ambas.

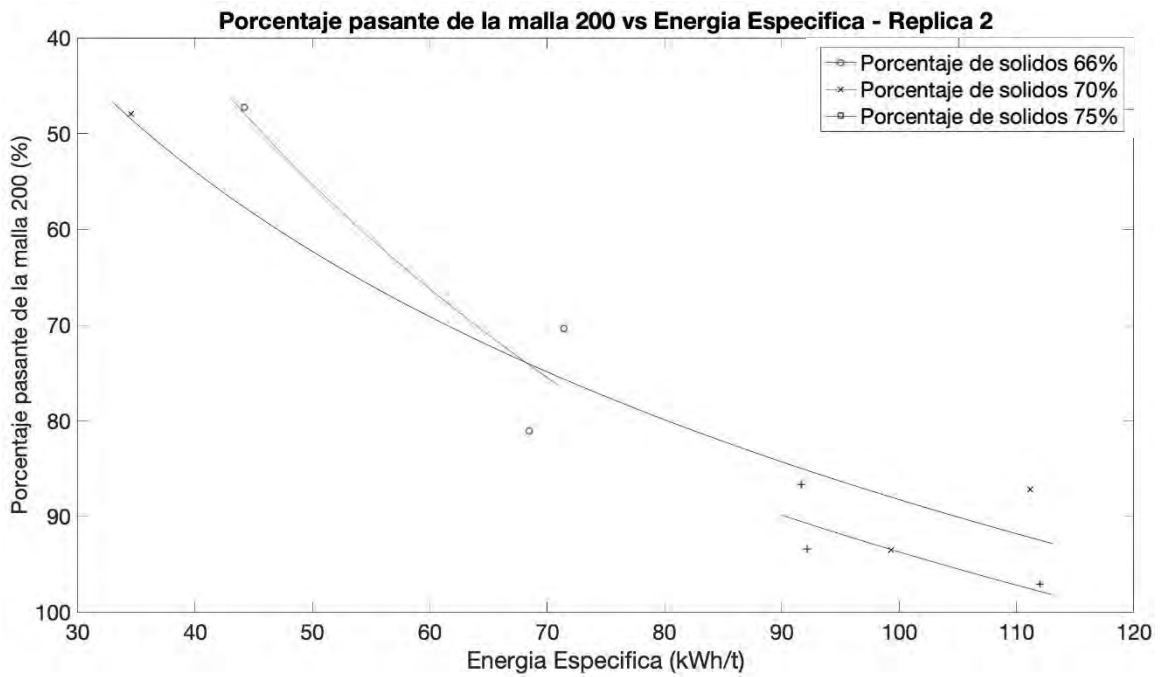


Figura 4.14.- Segunda Réplica – Porcentaje pasante de la malla 200 vs Energía específica.

Referencia y comparación bibliográfica

La figura 4.15 muestra los resultados de Jankovic (2003) realizados en un molino de bolas, a distintos porcentajes de sólidos. La gráfica muestra una comparación entre el P_{80} respecto a la energía específica.

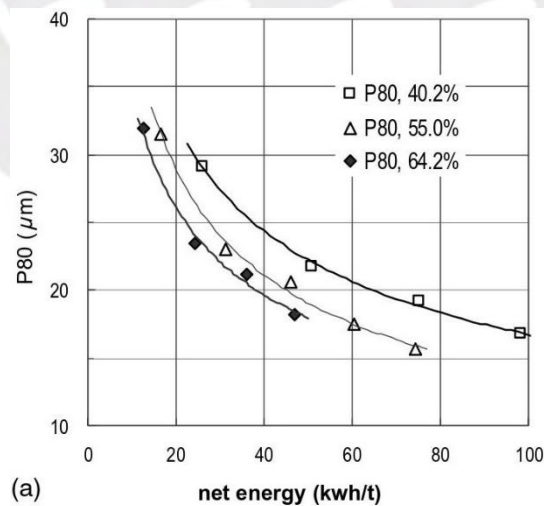


Figura 4.15.- Variación de la energía específica a diferentes porcentajes de sólidos (Fuente: Jankovic, 2003).

Si bien una comparación directa no es posible debido a que Jankovic (2003) empleó el P_{80} , a diferencia del porcentaje pasante de la malla 200, utilizado en el presente documento; al realizar una comparación con estos ensayos, se observan comportamientos similares a los mostrados para la planta piloto.

Como se muestra en la figura 4.15, a menor P_{80} (producto más grueso) menor energía es necesaria para generar una misma cantidad de mineral.

Este comportamiento se pudo verificar en los ensayos del presente trabajo, mediante las figuras 4.13 y 4.14.

4.5.2 Potencia de molino respecto al porcentaje de sólidos

El comportamiento de la energía consumida por el molino de bolas en el tiempo y respecto al porcentaje de sólidos (o también llamada densidad de pulpa) es mostrada en la figura 4.15.

Para el caso específico de esta sección, la figura 4.16, que compara la potencia del molino con el porcentaje de sólidos en la alimentación, es la se utiliza para la comparación respecto a la bibliografía.

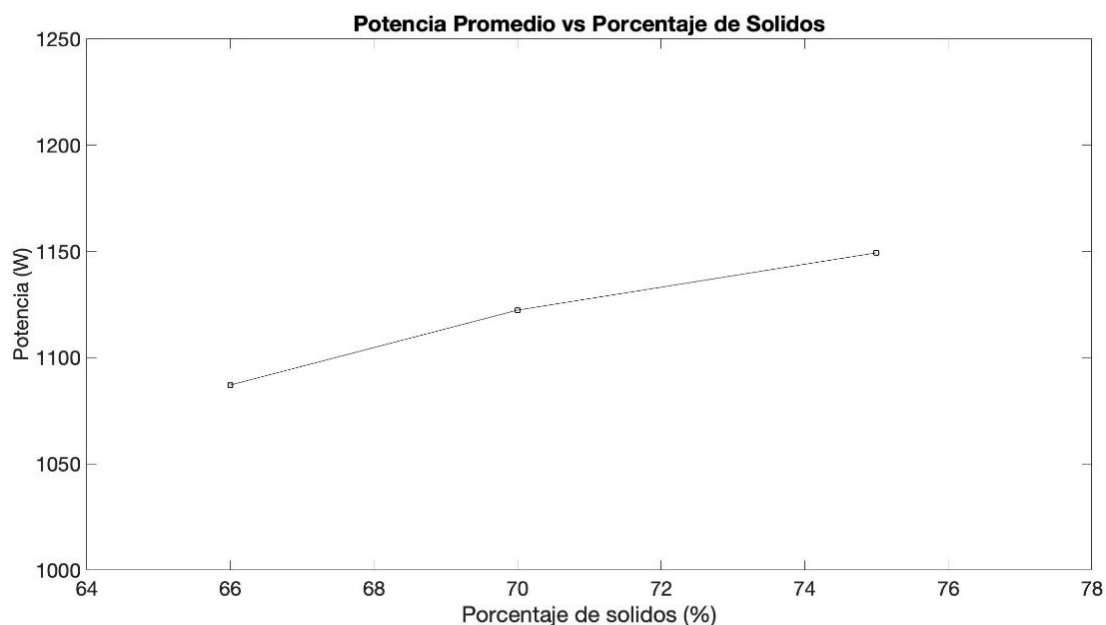


Figura 4.16.- Réplica 1 - Potencia promedio en el molino de bolas a distintos porcentajes de sólidos.

La figura 4.15 muestra solo la réplica 1. En esta podemos ver que, a mayor porcentaje de sólidos, mayor potencia en el molino.

Referencia y comparación bibliográfica

La figura 4.17 muestra la investigación de Gao *et al.* (1996), donde realiza la comparación de potencia de molino, en kW; con la densidad de la pulpa, expresada como porcentaje de sólidos.

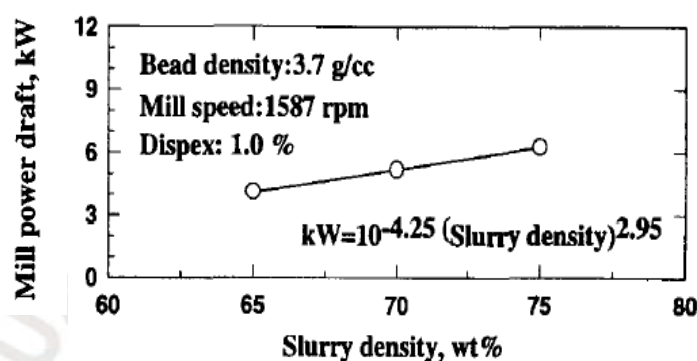


Figura 4.17.- Potencia para distintas densidades de pulpa (Gao *et al.*, 1996).

Como se puede analizar en esta figura, la tendencia es similar a la observada en la planta piloto. La potencia del molino aumenta a medida que el porcentaje de sólidos también lo hace. Es decir, para un valor de 75% de porcentaje de sólidos, el consumo de energía es mayor.

Estas comparaciones realizadas muestran que los ensayos desarrollados en el presente documento describen comportamientos similares a los encontrados en las referencias bibliográficas.

CONCLUSIONES

En el presente trabajo se analizaron energética y mineralógicamente las pulpas obtenidas de los experimentos en una planta a escala de laboratorio.

Se estudiaron los efectos producidos por la variación del factor de porcentaje de sólidos en la pulpa de alimentación, sobre el comportamiento de un sistema continuo y cerrado que procesa el mineral cobre-calcopirita.

Los porcentajes que se usaron fueron 3: 66%, 70% y 75%; y fueron modificados variando la tasa de alimentación de agua al sistema, en el ingreso al molino. La secuencia de ensayos fue realizada tomando como referencia las recomendaciones del Diseño de Experimentos Factorial.

Estos ensayos buscaron determinar, en particular, la influencia de este factor en la distribución de tamaños de partícula, en el consumo energético del proceso de molienda, la tasa de producto y el *Work Index* de Operación. En base a estos resultados obtenidos se concluye lo siguiente:

- Una disminución en el consumo de energía al aumentar la tasa de agua de alimentación (al reducirse el porcentaje de sólidos) fue detectada. Esto es a causa de una disminución en la viscosidad de la pulpa, pues decrecen las interacciones partícula-partícula; que, mecánicamente, se traducen en un menor torque en el motor del molino. La reducción registrada de 75% a 66% en el porcentaje de sólidos, en los ensayos, fue de 1% y 9%. En la escala de la planta piloto, el consumo de energía en 1 hora se redujo de 1.184 kW-h a 1.082kW-h en la primera réplica.
- El tamaño de partícula en el producto disminuyó al reducir la tasa de agua de alimentación (aumentar el porcentaje de sólidos). Al tener el mineral menos diluido en agua, menor recirculación de partículas finas al molino es producida, con lo que este último no se carga y satura y puede moler el mineral dentro del equipo a un menor tamaño. Se pudo comprobar gráfica y estadísticamente esta tendencia; así como, en el estudio, se registró que el porcentaje de partículas que pasaron la malla 200 (75 μ m) fue de 15% a 16% mayor con la condición de 75% de porcentaje de sólidos en la alimentación, comparado con la de 66% de porcentaje de sólidos.

- En base a un análisis estadístico de la tasa de producto, no se tiene una repetitividad en los valores promedio de tasa de producto por condición. Esto es debido a las características inherentes del sistema que generan un retraso en el tiempo de respuesta en cada réplica y que, además, este parámetro no ha terminado de estabilizar en el tiempo de ensayo. Teóricamente, los valores de tasa de producto para las 3 condiciones deben llegar a un punto de equilibrio e igualar el flujo másico de entrada de mineral. Sin embargo, durante este período, se verificó gráficamente en ambas réplicas que la condición de 66% muestra mayores valores de tasa de producto. Al ingresar mayor agua al sistema, produce que un mayor caudal de agua en la salida genere mayor arrastre de producto y se tenga, en este lapso de tiempo, mayor tasa comparada a las otras condiciones.
- El *Work Index* de Operación busca ilustrar la interrelación de la potencia del molino, el tamaño y la tasa del producto. En los ensayos se pudo comprobar que, si bien el consumo energético disminuye al aumentar la tasa de alimentación de agua (disminuir el porcentaje de sólidos), el tamaño de producto (P_{80}) también aumenta; por lo que los efectos tienden a contrarrestarse entre ellos. Las variaciones de la tasa de producto dentro de cada condición (cada porcentaje de sólidos) suelen estar interrelacionadas con los otros dos factores, principalmente el de tamaño de producto. Lo que resulta en que variaciones en la tasa de producto suelen verse compensadas con cambios en el P_{80} y en que, por ende, el valor de *Work Index* de Operación muestre variaciones menos marcadas. No obstante, se verificó que una oscilación pronunciada en la tasa de producto, conduce a que el *Work Index* de Operación también cambie de forma acentuada.
- Por otro lado, las diferencias en la tasa de producto entre condiciones inclinaron las tendencias. Tanto gráfica como estadísticamente se pudo confirmar una diferencia significativa en el *Work Index* de Operación al variar el porcentaje de sólidos. Se obtuvo que en ambas réplicas el menor *Work Index* de Operación fue a la concentración de sólidos de 66%; mientras que para la de 70%, fue la mayor. Al comparar esta condición respecto a los valores obtenidos con la condición de 75%, en los ensayos del presente estudio, se obtuvieron valores de 5,8% y 11,9% menores. No obstante, para el caso de 70% los valores fueron 12.7% y 6.7% mayores en la réplica 1 y 2, respectivamente.

- La comparación entre el *Work Index* de Operación y el *Work Index* de laboratorio hallado mediante el método de Bond, revelan valores entre 0.28 y 0.4; señal de que el circuito puede continuar siendo optimizado.
- Por último, los resultados del estudio se pudieron comparar con los obtenidos en la bibliografía y se verificaron comportamientos similares.

En base a lo expuesto, un compromiso entre bajo consumo energético pero un mayor tamaño de producto en un circuito cerrado y continuo de cobre-calcopirita, evaluado en este estudio, sería optar por la opción de trabajar a un porcentaje de sólidos de 66%.



RECOMENDACIONES

Debido a los diferentes tiempos de respuesta, no todos los parámetros llegaron a un punto de estabilización en el transcurso de 60 minutos. En base a ello, se recomienda que se extienda el tiempo de recopilación y extracción de muestras a un lapso entre 90 a 120 minutos.

Para mayor precisión en el monitoreo de las variables fijas sería oportuno utilizar un sistema de medición de la tasa de alimentación de mineral; puesto que, una variación en este punto puede tener un impacto importante en los resultados y resulta pertinente verificar su estabilidad.

Se sugiere realizar ensayos utilizando un hidrociclón, en lugar de un clasificador helicoidal. De acuerdo a la teoría, un clasificador helicoidal permite una estabilización más rápida en los ensayos de laboratorio; no obstante, la descarga por rebose no facilita una clasificación precisa ni una rápida respuesta a las variaciones en el circuito. Asimismo, los hidrociclones son mayormente usados en la industria.

Se recomienda realizar una mayor cantidad de réplicas para facilitar los análisis de varianza y observar mayores puntos en los análisis de tendencias. Esto permitiría realizar un estudio con mayor cantidad de información.

Se propone realizar la implementación de un sistema de recepción de muestras que permita separar las muestras en tiempos especificados previamente. Esto facilitaría el análisis y disminuiría errores en el muestreo.

Se propone también ampliar el alcance del trabajo y usar otros niveles como velocidad de giro del molino, diferentes tamaños de elementos molturantes, uso de aditivos, entre otros.

BIBLIOGRAFÍA

- Chen, X., Zhai, J., Li, Q., & Fei, S. (2007). *Fuzzy Logic Based On-Line Efficiency Optimization Control of a Ball Mill Grinding Circuit*. Fourth International Conference on Fuzzy Systems and Knowledge Discovery (FSKD 2007), 575-580. <https://doi.org/10.1109/FSKD.2007.329>
- Conger, W., DuPont, J. F., McIvor, R. E., & Weldum, T. P. (2018). *Ball mill media optimization through functional performance modeling*. Mining Engineering, 70(11), 28-40.
- Davis, E.W. (1925). *Ball Mill Crushing in Closed Circuit with Screens,*” Bulletin of the University of Minnesota School of Mines Experimental Station, v.28, no.42, pp.14-18.
- Ernst & Young Consultores (2021). *Guide to Investing in energy Projects in Oeru*. Repositorio de la Biblioteca Nacional del Perú.
- Ernst & Young Consultores (2021). *Peru's Economic and Business Report*. Repositorio de la Biblioteca Nacional del Perú.
- Ernst & Young Consultores (2020). *Peru's mining & metals investment guide*. Repositorio de la Biblioteca Nacional del Perú.
- Fuerstenau, M. C., & Han, K. N. (2003). *Principles of mineral processing*. Littleton, Colo: Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Fueyo, C. L. (2002). *Equipos de trituración, molienda y clasificación: Tecnología, diseño y aplicación*. Madrid: Editorial Rocas y Minerales.
- Gao, M. et. Al. (1996). *Power predictions for a pilot scale stirred ball mill*. International Journal of Mineral Procession.
- Gaudin, A. M. (1939). *Principles of Mineral Design*. First Edition, McGraw Hill, New York. pp. 110-113.

- Gupta, A., & Yan, D. (2016). *Mineral Processing Design and Operations* (Edición: 2). Elsevier.
- Hassanzadeh, A. (2017). *Measurement and Modeling of Residence Time Distribution of Overflow Ball Mill in Continuous Closed Circuit*. *Geosystem Engineering*, 20, 251-260. <https://doi.org/10.1080/12269328.2016.1275824>
- Husman, H. (2014). *Measuring the efficiency of the tumbling mill as a function of lifter configurations and operating parameters*. Colorado School of Mines
- Internation Mining (2021). *Weir-backed report highlights decarbonisation opportunities in mineral processing*.
- Kelly, E. G., Spottiswood, D. J., & García, D. R. (1990). *Introducción al procesamiento de minerales*. México: Noriega Edits.
- McIvor, R. E. (2009). *The importance of water utilization for maximizing grinding circuit classification system efficiency*. 2, 430-434.
- McIvor, R.E., (2014). *Plant performance improvements using the grinding circuit classification system efficiency*. *Mining Eng.* 66 (9), 72-76.
- Muñoz, M. J. (2013). *El mercado del cobre a nivel mundial: evolución, riesgos, características y potencialidades futuras*. *Ingeniare. Revista chilena de ingeniería*, 21(2), 248-261. <https://doi.org/10.4067/S0718-33052013000200008>
- Perov, V., Andreev, E. & Bilenko, L. (1990). *Grinding, Milling and Screening of Mineral Products*, Nedra Publishing House, ISBN 5-247-00984-3, Moscow (Russia).
- Sud, S., & Kamath, A. (2013). *Methods of size reduction and factors affecting size reduction in pharmaceuticals*. *International Research Journal Of Pharmacy*, 4, 57-64. <https://doi.org/10.7897/2230-8407.04810>
- Wills, B. A., & Finch, J. A. (2016). *Mineral Processing Technology (Eighth Edition)* <https://doi.org/10.1016/B978-0-08-097053-0.00005-4>

- Yianatos, J., Lisboa, M., & Baeza, D. (2002). *Grinding capacity enhancement by solid concentration control of hydrocyclone underflow*. Minerals Engineering, 15(5), 317-323. [https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(02\)00027-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(02)00027-4)
- Zixin Y., Yuxing P. Zhencai Z., Chenbo M., Zhangfa Y., Guiyi W. (2019). *Effect of mill speed and slurry filling on the charge dynamics by an instrumented ball*. Advanced Powder Technology. <http://doi.org/10.1016/j.apt.2019.05.009>



ANEXOS

A. ANEXO A – TABLAS DE RESULTADOS	1
B. ANEXO B – RESULTADOS DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE PARTÍCULAS	3
C. ANEXO C – MEDICIONES DE FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE AGUA.....	6
D. ANEXO D – ENSAYOS DE WORK INDEX.....	7
E. ANEXO E – ENSAYOS DE DENSIDAD	8



A. ANEXO A – TABLAS DE RESULTADOS

Tabla A.1.- Resultados de tasa de producto (g/s) por condición y réplica

		66-1	70-1	75-1	66-2	70-2	75-2
Tiempo (min)	5	1.735	0.293	0.188	0.267	0.137	0.403
	10	1.968	0.643	0.235	1.183	0.150	1.448
	15	2.280	1.613	0.305	1.483	0.303	1.453
	20	2.990	1.720	3.265	2.220	4.357	1.805
	30	3.358	2.797	6.057	2.842	3.035	2.447
	40	3.208	2.827	3.093	4.452	3.033	2.840
	50	4.270	2.883	3.603	4.152	2.693	3.330
	60	4.632	4.655	3.610	7.045	8.673	3.262

Tabla A.2.- Resultados de porcentaje de pasantes de la malla 200 (%) por condición y réplica

		66-1	70-1	75-1	66-2	70-2	75-2
Tiempo (min)	5	93.16	96.93	98.11	96.73	93.90	95.88
	10	93.84	93.60	97.79	96.18	96.63	95.68
	15	92.93	97.05	95.51	95.49	97.73	96.31
	20	89.56	95.74	90.50	95.65	72.77	98.05
	30	91.64	92.96	69.64	90.38	92.27	98.42
	40	84.05	86.97	91.03	81.08	93.51	97.11
	50	63.49	93.58	91.50	70.39	87.20	93.43
	60	59.26	73.93	83.40	47.26	47.97	86.70

Tabla A.3.- Resultados de P₈₀ (μm) por condición y réplica

		66-1	70-1	75-1	66-2	70-2	75-2
Tiempo (min)	5	50	50	50	50	50	50
	10	50	50	50	50	50	50
	15	50	50	50	50	50	50
	20	50	50	50	50	133	50
	30	50	50	106	50	50	50
	40	50	50	50	50	50	50
	50	83	50	50	103	50	50
	60	86	97	50	123	134	50

Tabla A.4.- Resultados de *Work Index* de Operación

		S66-1	S70-1	S75-1	S66-2	S70-2	S75-2
Tiempo (min)	5	108.87	716.78	1052.85	706.57	1383.93	492.53
	10	96.97	318.54	853.41	159.09	1264.85	139.01
	15	84.54	128.36	687.41	127.15	622.94	136.53
	20	63.64	118.22	63.10	87.75	81.88	107.29
	30	57.37	72.15	55.11	68.39	62.64	78.19
	40	58.87	71.19	67.49	43.15	62.58	70.57
	50	59.92	70.52	58.59	71.27	70.06	58.07
	60	56.76	68.41	60.29	49.72	41.19	57.76

Tabla A.5.- Resultados de Energía Específica

		EE66-1	EE70-1	EE75-1	EE66-2	EE70-2	EE75-2
Minuto (min)	5	172.75	1137.42	1670.71	1121.22	2196.07	781.57
	10	153.88	505.47	1354.22	252.45	2007.11	220.59
	15	134.15	203.69	1090.82	201.76	988.51	216.66
	20	100.98	187.60	100.13	139.25	68.94	170.24
	30	91.04	114.49	54.24	108.52	99.41	124.08
	40	93.41	112.97	107.09	68.47	99.30	111.99
	50	69.43	111.90	92.97	71.43	111.17	92.15
	60	64.23	71.42	95.67	44.18	34.57	91.65

B. ANEXO B – RESULTADOS DE DISTRIBUCIÓN DE TAMAÑOS DE PARTICULAS

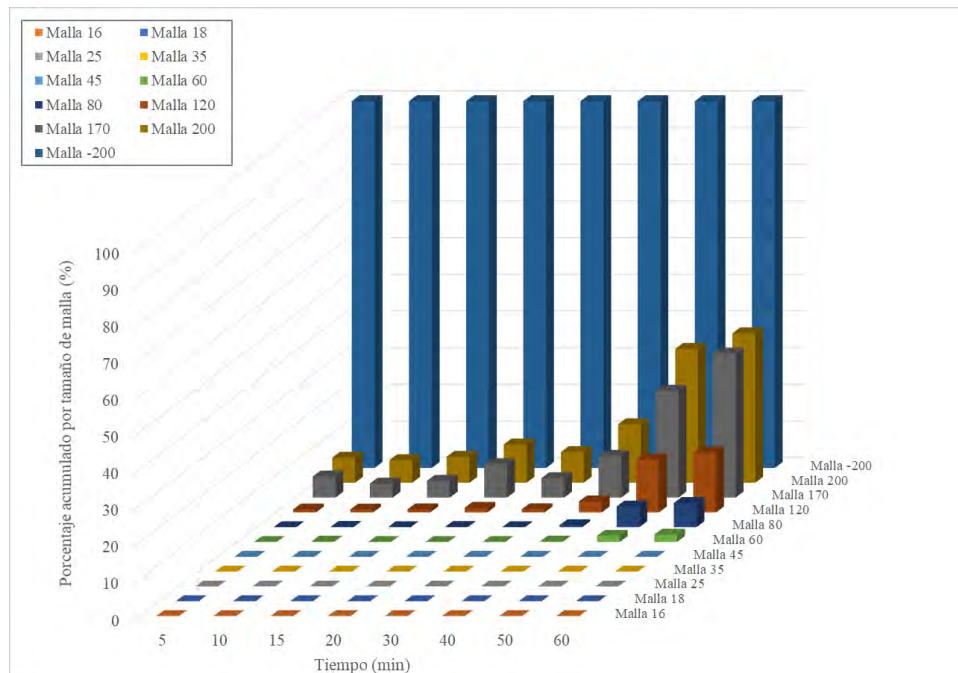


Figura B.1.- Distribución de tamaño de partículas – Porcentaje acumulado por tamaño de malla para la condición de 66% en la réplica 1

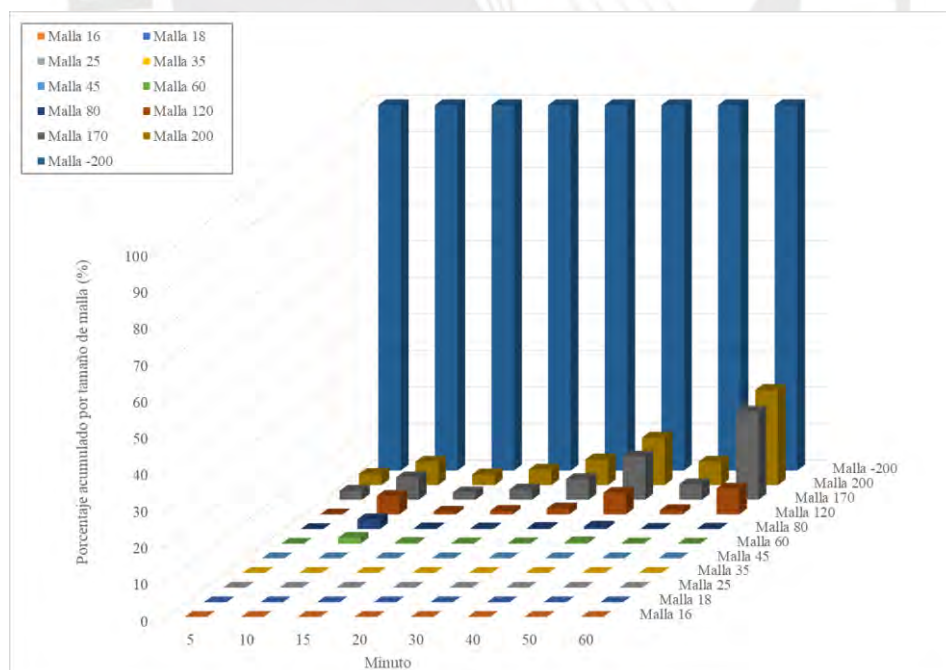


Figura B.2.- Distribución de tamaño de partículas – Porcentaje acumulado por tamaño de malla para la condición de 70% en la réplica 1

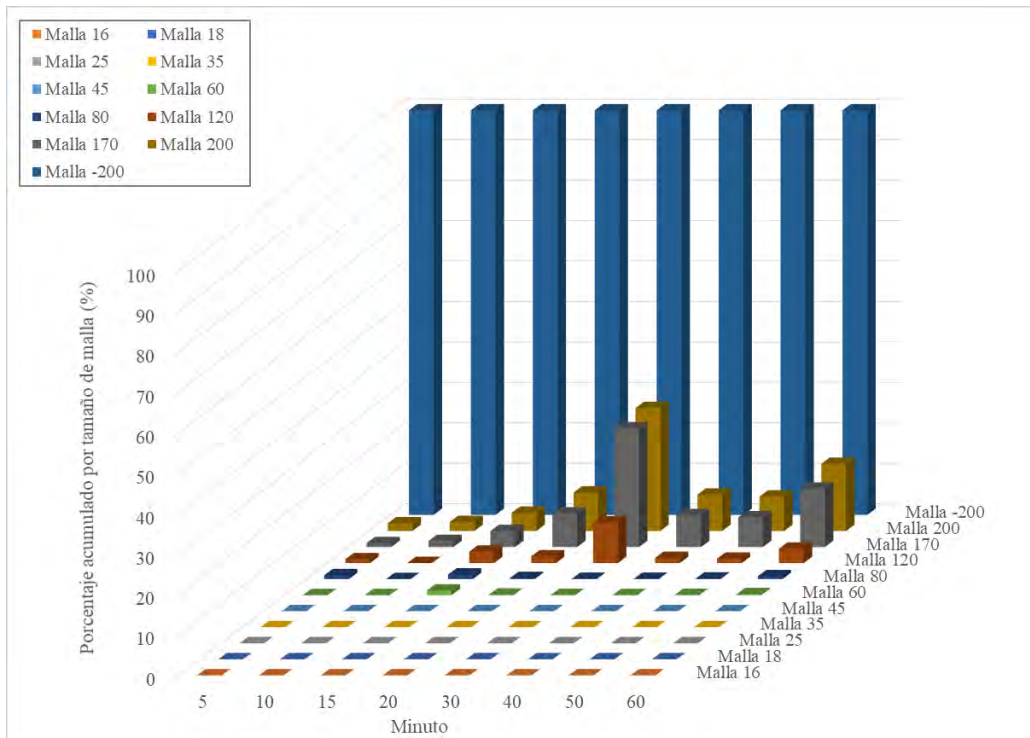


Figura B.3.- Distribución de tamaño de partículas – Porcentaje acumulado por tamaño de malla para la condición de 75% en la réplica 1

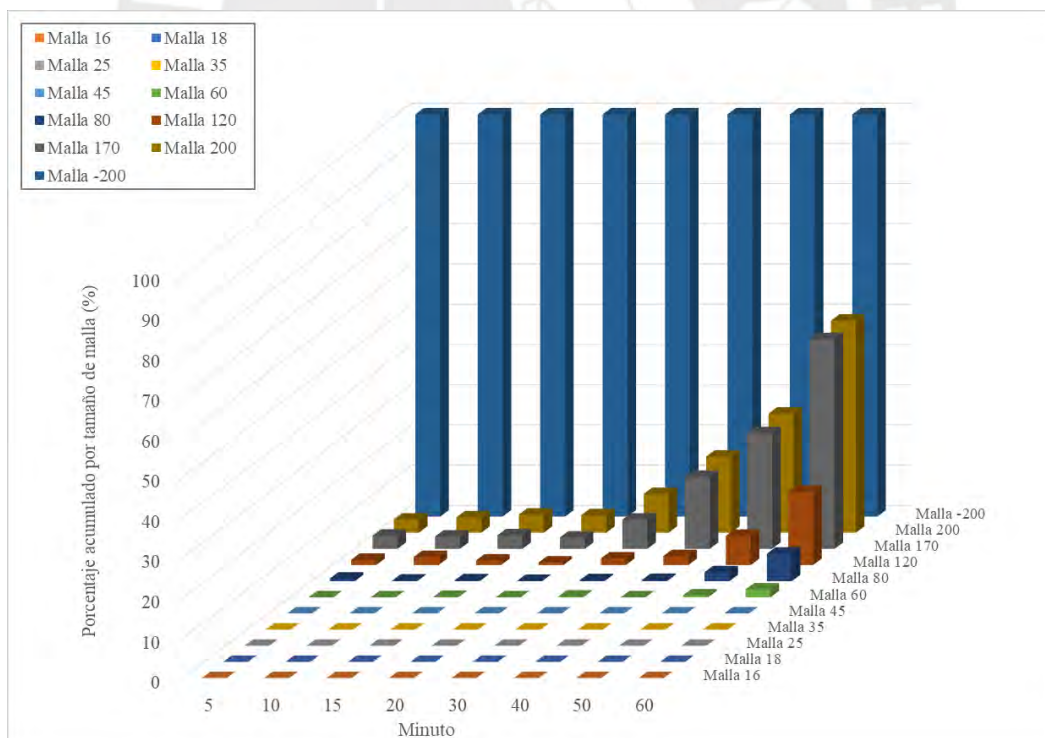


Figura B.4.- Distribución de tamaño de partículas – Porcentaje acumulado por tamaño de malla para la condición de 66% en la réplica 2

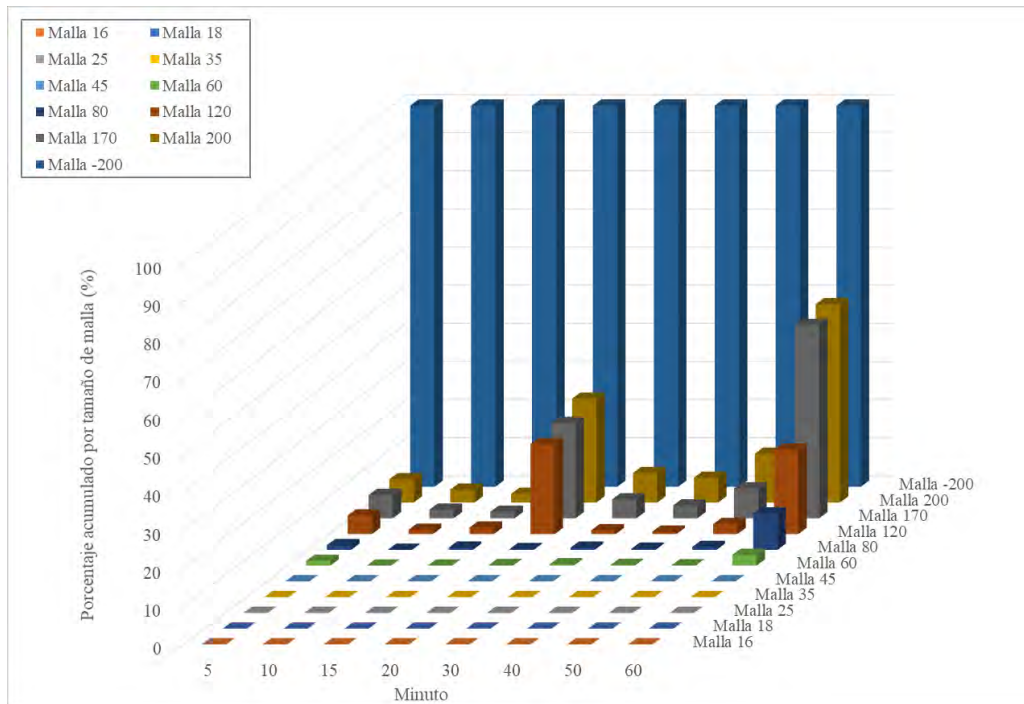


Figura B.5.- Distribución de tamaño de partículas – Porcentaje acumulado por tamaño de malla para la condición de 70% en la réplica 2

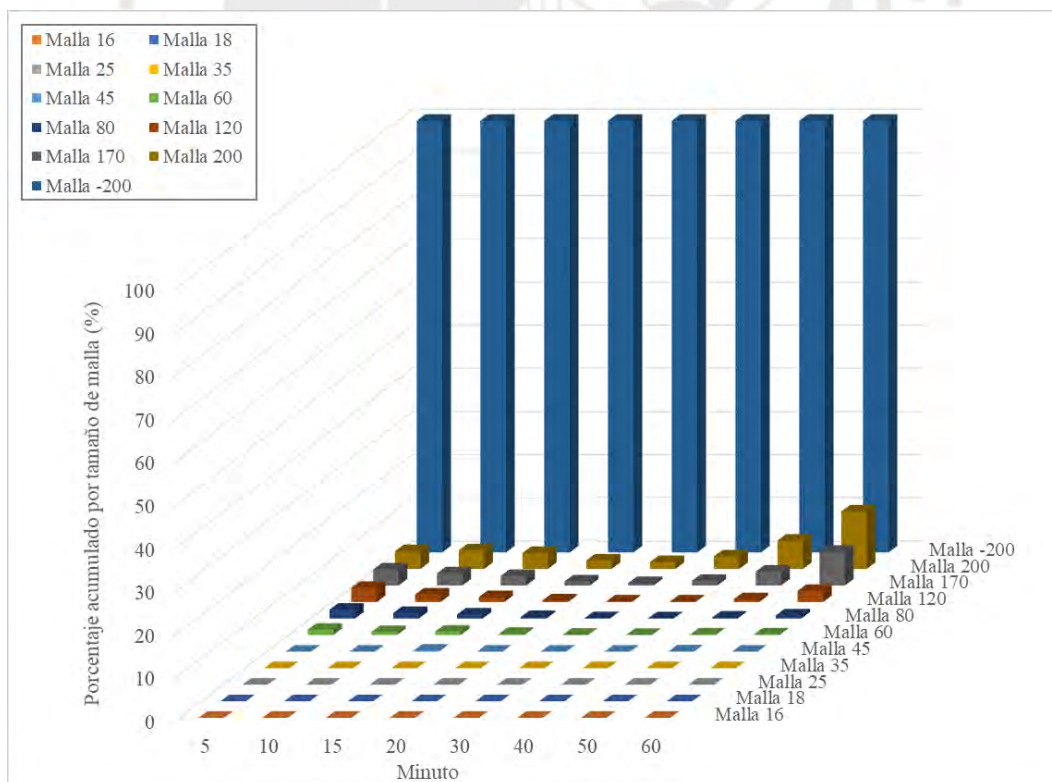


Figura B.6.- Distribución de tamaño de partículas – Porcentaje acumulado por tamaño de malla para la condición de 75% en la réplica 2

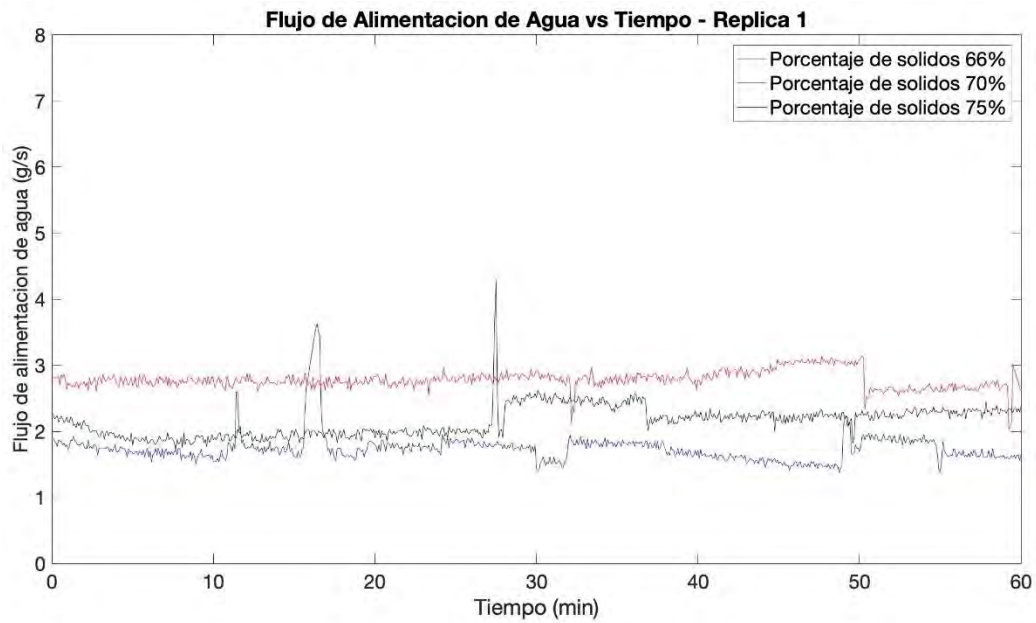
C. ANEXO C – MEDICIONES DE FLUJO DE ALIMENTACIÓN DE AGUA

Figura C.1.- Primera Réplica – Flujo de alimentación de agua al molino, para 3 porcentajes de sólidos.

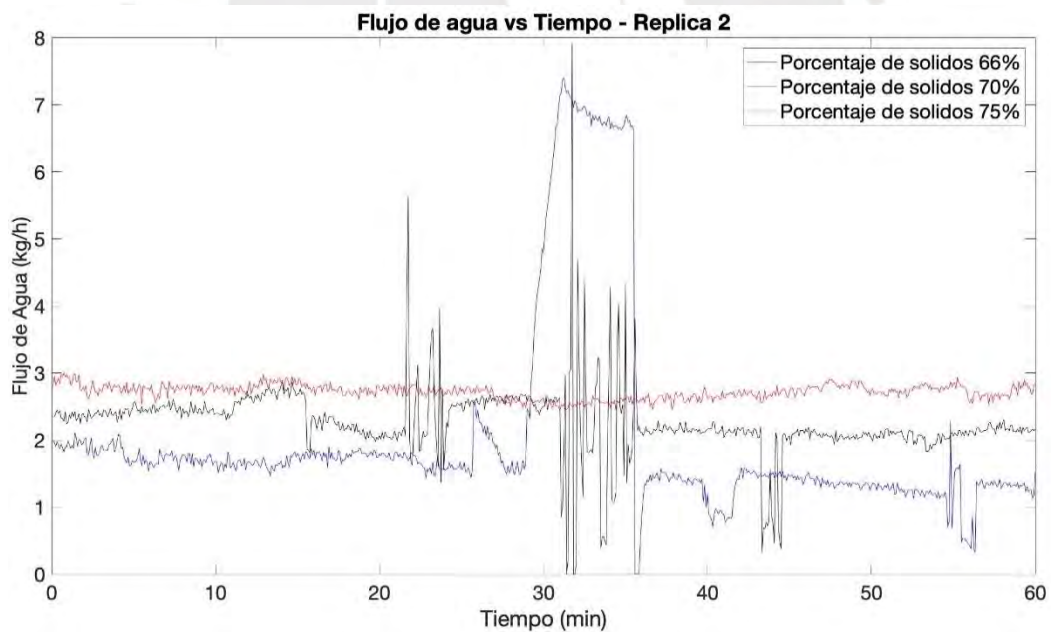


Figura C.2.- Segunda Réplica – Flujo de alimentación de agua al molino, para 3 porcentajes de sólidos.

D. ANEXO D – ENSAYOS DE WORK INDEX

Tabla D.1.- Resultados de Ensayo de Work Index en el molino de Bond

Período	Nueva alimentación (g)	Producto en la alimentación (%)	Producto en la alimentación (g)	Número de revoluciones (rev)	Rebose (g)	Producto (g)	Producto neto generado (g)	Producto neto generado por revolución (g/rev)	Producto a generar (g)	Carga circulante (%)
1	1771.3	13	230.18	100	1456.0	315.3	85.12	0.85	465.11	461.78
2	315.3	13	40.97	546	1224.8	546.5	505.53	0.93	392.84	224.12
3	546.5	13	71.02	425	1270.8	500.5	429.48	1.01	397.89	253.91
4	500.5	13	65.04	393	1281.6	489.7	424.66	1.08	399.08	261.71
5	489.7	13	63.64	370	1329.0	442.3	378.66	1.02	404.28	300.47
6	442.3	13	57.48	395	1285.1	486.2	428.72	1.09	399.46	264.32
7	486.2	13	63.18	368	1321.0	450.3	387.12	1.05	403.40	293.36
8	450.3	13	58.52	383	1340.0	431.3	372.78	0.97	405.49	310.69
9	431.3	13	56.05	417	1261.9	509.4	453.35	1.09	396.91	247.72

Tabla D.2.- Valores de variables finales del Ensayo de Work Index en el molino de Bond

VARIABLES	Valores	Descripción	Unidades
A	74	Tamaño del tamiz de prueba	μm
Gbp	1.04	Tasa de molienda	g/rev
P80	74	80% de tamaño de paso del producto del circuito	μm
F80	1200	80% del tamaño de paso de la nueva alimentación	μm
Wi	18.36	Work Index	kWh/t

E. ANEXO E – ENSAYOS DE DENSIDAD

Tabla E.1.- Resultados de ensayos de densidad con picnómetro

	Mediciones						Cálculos			
	Picnómetro (W1)	Picnómetro y mineral (W2)	Picnómetro, mineral y agua (W3)	Picnómetro y 100ml de agua (W4)	Temperatura	Densidad de agua	Peso del mineral $W0=(W2-W1)$	Peso de agua desplazada $(W0+W4-W3)$	Gravedad específica $(W0 / (W0+W4-W3))$	Densidad de mineral
Unidades	g				°C	g/ml	g	g	-	g/ml
Muestra 1	30.9	38.9	137.3	131.5	28	0.9963	8	2.20	3.64	3.62
Muestra 2	30.6	50.7	145.7	131.2	28	0.9963	20.1	5.60	3.59	3.58
Muestra 3	30.6	41.9	139.4	131.2	26	0.9969	11.3	3.10	3.65	3.63
Muestra 4	30.9	41.5	139.1	131.4	26	0.9969	10.6	2.90	3.66	3.64