



Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**“MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA DISTRIBUCIÓN
GRANULOMÉTRICA DEL PRODUCTO DE UN MOLINO
VERTICAL HIGMILL® EN CIRCUITO ABIERTO”**

TESIS

Que para obtener el grado de:
Maestría en Ingeniería de Minerales

Presenta:
I.Q. Mario Alonso Peters Moreno

Asesorado por:
Dr. José Ángel Delgadillo Gómez

San Luis Potosí, S.L.P.
Enero 2025





Universidad Autónoma de San Luis Potosí

Facultad de Ingeniería

Centro de Investigación y Estudios de Posgrado

**“MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA DISTRIBUCIÓN
GRANULOMÉTRICA DEL PRODUCTO DE UN MOLINO
VERTICAL HIGMILL® EN CIRCUITO ABIERTO”**

TESIS

Que para obtener el grado de:
Maestría en Ingeniería de Minerales

Presenta:

I.Q. Mario Alonso Peters Moreno

Asesorado por:

Dr. José Ángel Delgadillo Gómez

Sinodales:

Dr. José Ángel Delgadillo Gómez

Dr. Mario Moscota Santillán

Dr. Cristóbal Alberto Pérez Alonso

Dr. Roel Cruz Gaona

San Luis Potosí, S.L.P.

Enero 2025





21 de noviembre de 2024

**ING. MARIO ALONSO PETERS MORENO
P R E S E N T E.**

En atención a su solicitud de Temario, presentada por el **Dr. José Ángel Delgadillo Gómez** Asesor de la Tesis que desarrollará Usted con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ingeniería de Minerales**, me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 21 de noviembre del presente año, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

**"MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA DISTRIBUCIÓN
GRANULOMÉTRICA DEL PRODUCTO DE UN MOLINO VERTICAL
HIGMILL® EN CIRCUITO ABIERTO"**

Introducción.

1. Antecedentes de la reducción de tamaño de partículas finas y ultrafinas de minerales.
2. Metodología experimental para el desarrollo del modelo matemático del molino HIGMILL® de Minera Saucito.
3. Resultados y discusión de la generación del modelo matemático para el molino HIGMILL® de Minera Saucito.

Conclusiones.

Referencias.

Anexo.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E


DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION

Copia. Archivo.
*etn

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

"UASLP, con profesionistas abiertos al mundo"



UASLP
Universidad Autónoma
de San Luis Potosí



FACULTAD DE
INGENIERÍA



CENTRO DE
**INVESTIGACIÓN
Y ESTUDIOS
DE POSGRADO**

UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado

D E C L A R A C I Ó N

El presente trabajo que lleva por título:

**“MODELACIÓN MATEMÁTICA DE LA DISTRIBUCIÓN GRANULOMÉTRICA DEL
PRODUCTO DE UN MOLINO VERTICAL HIGMILL® EN CIRCUITO ABIERTO”**

se realizó en el periodo agosto del 2019 a diciembre de 2024 bajo la dirección del Dr. José
Ángel Delgadillo Gómez

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado, y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando existe un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Mario Alonso Peters Moreno



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN LUIS POTOSÍ
SISTEMA DE BIBLIOTECAS

DIRECCIÓN DE BIBLIOTECA VIRTUAL
Zona Universitaria s/n C.P. 78290 Tel. 834 25 42 Fax 828-23-08
San Luis Potosí, S.L.P. México



El que suscribe Mario Alonso Peters Moreno ,
con domicilio en Calle Magnolia 231
Colonia / fraccionamiento Colonia los olivos
C.P. 99094 Tel. 6181471647 Ciudad Fresnillo, Zac.
y en mi carácter de autor y titular de la tesis que
lleva como nombre: Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto
de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto, en lo sucesivo "LA OBRA" y por
ende, cedo y autorizo a la Universidad Autónoma de San Luis Potosí, para que
lleve a cabo la divulgación, publicación, reproducción, así como la digitalización
de la obra, en formato electrónico y sin fines de lucro.

La Universidad Autónoma de San Luis Potosí, se compromete a respetar
en todo momento mi autoría y a otorgarme el crédito correspondiente.

San Luis Potosí, S.L.P., a ____ de _____ de 200__.

Atentamente,

FIRMA
AUTOR

AGRADECIMIENTOS

Con un profundo agradecimiento, deseo expresar mi gratitud a todas las personas que lo largo de mi vida han sido parte fundamental de mi crecimiento personal, profesional y académico, y cuya contribución ha sido pieza clave en el logro de este grado profesional.

A toda mi familia, por su constante apoyo y motivación a lo largo de los años. Agradezco profundamente a mis padres, Jacobo Peters Nava y María de la Luz Moreno, por su apoyo incondicional y ser ejemplo de esfuerzo y dedicación. A mis hermanos, por sus palabras de aliento, sus consejos y ejemplo de superación personal. A mi querida esposa Norma Esthela Bañuelos Pacheco, por su amor, compañía y apoyo durante todo este proceso.

A mi asesor de tesis, al Dr. José Ángel Delgadillo Gómez, por todo su aprendizaje brindado durante estos últimos años, su orientación y su constante apoyo para el desarrollo y conclusión de esta tesis, por ser para mí una fuente de motivación y de crecimiento académico. A mis sinodales, Dr. Mario Moscosa Santillán, Dr. Cristóbal Alberto Pérez Alonso y Dr. Roel Cruz Gaona por su orientación y recomendaciones que contribuyeron a mejorar el contenido y alcance de esta tesis.

Al Ing. Jaime Bravo por ser una guía y demostrarme la pasión con la que se debe desempeñar esta profesión y las cualidades bajo las cuales se debe regir un profesionista, también por su apoyo para permitir llevar a cabo mis estudios mientras me encontraba laborando en Minera Saucito. Al Ing. Aldo Valenzuela, asesor de operación, por su apoyo para la ejecución de las pruebas industriales en Minera Saucito y que a pesar de las dificultades durante la prueba no desistió con en su desarrollo. Al Ing. Gustavo González e Ing. Luis Contreras por facilitarme los equipos de laboratorio para el análisis de muestras y por brindarme su tiempo, su apoyo y amistad. Al Ing. Edwin González, por su apoyo brindado durante el desarrollo experimental de las pruebas.

Finalmente, quiero extender mi agradecimiento a todas aquellas personas que de alguna u otra manera contribuyeron para este logro académico. Gracias a todos.

RESUMEN

En la actualidad se cuenta una amplia gama de software comercial que permite realizar la optimización de las operaciones de molienda a través del balance de masa, ajuste de los modelos matemáticos y finalmente la simulación; incluyendo dentro de esa secuencia, la ingeniería de diseño de los equipos, propiedades cualitativas y cuantitativas de los diferentes flujos en el proceso, y las ecuaciones fundamentales y empíricas que describen la operación de los equipos tales como molinos horizontales, hidrociclones, cribas, bandas y bombas. Sin embargo, no se cuenta con software comercial orientado a sistemas de molienda vertical atendiendo a la necesidad actual de los procesos a alcanzar moliendas ultrafinas y la incorporación reciente de la tecnología de molienda vertical a las operaciones.

El presente trabajo se enfocó evaluar y seleccionar el modelo matemático para la predicción y simulación de la curva granulométrica de descarga del molino industrial HIGMill® instalado en la Unidad Minera Saucito, considerando dentro de estos las variables operativas y geometría del molino, para esto se utilizaron tres diferentes modelos matemáticos: modelo de mezclado perfecto, modelo matricial (Lynch, 1997) y modelo de Charles (Gao & Forssberg, 1995); que si bien, son aplicados a molinos de bolas, investigaciones recientes demuestran que pueden ser aplicados con muy buenos ajustes y aproximaciones en molienda vertical, principalmente en molinos a nivel laboratorio.

El desarrollo de las 4 pruebas a nivel industrial se definió a partir de un diseño experimental, el primer factor del diseño de experimentos corresponde a la velocidad del rotor en m/s con niveles de 7.0 y 8.8 m/s, el segundo factor es el porcentaje de sólidos de alimentación al molino con niveles de 30% y 40%; durante las pruebas experimentales se mantuvo constante en 7 toneladas el nivel de bola interno y 34 m³/h el flujo volumétrico de alimentación de pulpa al molino. Para cada una de las pruebas se tomaron 4 cortes de muestra en la alimentación y descarga del molino con intervalos de tiempo de 15 minutos, y en cada una de ellas se determinó en laboratorio el porcentaje de sólidos y la distribución granulométrica.

A partir de los resultados obtenidos, se demostró que el modelo matricial (Lynch, 1997) obtenido en la prueba 4 es el mejor modelo para realizar la simulación de la operación del molino con un error absoluto de 0.3 micrómetros y un error relativo del 2.33% en la predicción del P_{80} , y un error absoluto de 0.5 micrómetros y un error relativo del 17.0% en la predicción del P_{25} , dichos errores fueron determinados entre los resultados obtenidos en la simulación y condiciones reales en la operación del molino. En el caso del modelo Charles (Gao & Forssberg, 1995), se demostró que puede predecir el P_{80} con un error relativo de 1.4% a 4.7% y para el P_{25} con un error relativo de 1.7 a 14.3%. Este último modelo permite determinar observar rápidamente el efecto del consumo de energía específica (kWh/t) en el tamaño de partícula producido por el molino, pero una gran desventaja es que no permite realizar la simulación de las operaciones si existe un cambio en la granulometría.

Finalmente se determina que el modelo matemático que describe el proceso de molienda del molino vertical HIGMill® de Unidad Minera Saucito corresponde al modelo matricial (Lynch, 1997) de la prueba 4, el modelo demostró realizar predicciones válidas de simulación comparadas con el valor experimental, dicho modelo delimitado por las condiciones o rangos en los que fue desarrollado. Con base en este estudio fue posible desarrollar una plantilla en Excel con los modelos matemáticos validados para el molino vertical de Minera Saucito, que permiten simular escenarios y predecir el tamaño del producto de descarga al ajustar las variables operativas.

ÍNDICE

RESUMEN.....	ii
NOMENCLATURA.....	vi
INTRODUCCIÓN.....	viii
Justificación.	ix
Objetivo.....	x
1. ANTECEDENTES DE LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS FINAS Y ULTRAFINAS DE MINERALES	1
1.1. Principios de conminución.....	2
1.2. Energía necesaria para la reducción de tamaño.	3
1.3. Molienda ultrafina.	4
1.3.1. Molino de bolas.	4
1.3.2. Molinos agitados (molino vertical).....	5
1.3.3. Molino de pasadores.....	6
1.3.4. IsaMill.	7
1.3.5. Molino centrífugo.....	8
1.3.6. Molino de chorro.....	8
1.4. Mecánica de molienda en molinos verticales.....	9
1.5. Variables operativas.....	10
1.6. Modelación matemática en procesos de conminución.	11
1.6.1. Modelo de potencia de Tuzun.	11
1.6.2. Modelo de potencia de Duffy.....	12
1.6.3. Modelo de potencia de Nitta.	13
1.6.4. Modelos de reducción de tamaño.....	13
1.6.5. Modelo de Charles.....	16
1.6.6. Modelado de balance poblacional.....	17
1.6.7. Modelo de mezclado perfecto.	18
1.6.8. Función de selección.....	21
1.6.9. Función de rompimiento.....	24
1.6.10. Modelo matricial.....	25
2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO DEL MOLINO HIGMILL® DE MINERA SAUCITO.....	27
2.1. Diseño de experimentos.	27

2.2.	Muestreo de molinos.....	28
2.3.	Equipo de difracción de rayos láser Helos®.	30
2.4.	Recolección de datos de proceso.	32
2.5.	Ajuste de parámetros de modelos matemáticos.	33
3.	RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA GENERACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL MOLINO HIGMILL® DE MINERA SAUCITO	36
3.1.	Calibración del modelo de potencia.	37
3.2.	Calibración del modelo de mezclado perfecto.....	37
3.3.	Calibración del modelo matricial.	41
3.4.	Calibración del modelo de Charles.	45
3.5.	Simulación de la curva granulométrica a la descarga del molino utilizando el modelo de mezclado perfecto a diferentes condiciones de muestreo.	49
3.6.	Simulación de la curva granulométrica a la descarga del molino utilizando el modelo matricial a diferentes condiciones de muestreo.	51
3.7.	Modelo integrado de molino HIGMILL®.....	54
	CONCLUSIONES.....	62
	REFERENCIAS	64
	ANEXO.....	67

NOMENCLATURA

a y α	Parámetro de la ecuación de Charles.
A	Parámetro del modelo de Austin (min^{-1}).
A^*	Matriz de apariencia, adimensional.
b_{ij}	Función de distribución de rompimiento, adimensional.
B_{ij}	Función acumulativa de distribución de rompimiento, adimensional.
c, k', k''	Constantes del modelo de potencia de Tuzun.
d_M	Diámetro del molino (m).
d_m	Diámetro del medio de molienda (m).
d_i	Tamaño original antes del rompimiento (μm).
d_j	Tamaño de partícula en la fracción i (μm).
D_b	Tamaño promedio de bola (mm).
D_s	Diámetro del agitador (m).
E	Energía específica (kWh/t).
F_i	Masa de partículas de tamaño i en la alimentación (t).
F	Distribución del tamaño de partícula en la alimentación (t).
H	Altura del medio de molienda (m).
H_b	Altura de la carga de bola (m).
i, j	Índice de tamaño, desde el tamaño 1 hasta el tamaño n .
I	Matriz identidad, adimensional.
L	Longitud del molino (m).
m_i	Masa de partículas contenidas en el tamaño i (t).
M	Masa (t).
N	Velocidad del tornillo (rps).
N_s	Velocidad del agitador (rpm).
P	Distribución del tamaño de partícula del producto (t).
P_i	Masa de partículas de tamaño i en la descarga (t).
P_{net}	Potencia neta del molino (W ó kW).
R_m	Tasa de reducción a un porcentaje pasante (m).

s	Masa retenida en cada fracción de tamaño i (t).
S	Diámetro externo del molino (m).
S_i	Función de selección ($\min^{-1}$ ó $\sec^{-1}$)
S_i^E	Función de selección específica (t/kWh).
t	Tiempo (h ó $\min$).
T	Número de vueltas del tornillo helicoidal por arranque.
v_T	Velocidad tangencial (m/s).
V	Velocidad del agitador (m/s).
W_s	Peso del tornillo (kg).
$x_{m,f}$	Tamaño característico de la alimentación (μm).
$x_{m,p}$	Tamaño característico del producto (μm).
x_i	Tamaño de partícula (μm).
α, μ y Λ	Parámetros del modelo Austin, adimensionales.
ρ_c	Densidad de la carga (t/m^3).
ρ_{SL}	Densidad de pulpa (kg/m^3).
ρ_m	Densidad del medio (kg/m^3).
τ	Tiempo de residencia ($\min$).
μ	Viscosidad de la pulpa ($Pa \cdot s$).
μ^*	Tamaño máximo de partícula del sistema (μm).
ϕ, γ, β	Parámetros de la función de rompimiento.
ζ_1 y ζ_2	Constantes de la ecuación de Rajamani y Herbst.

INTRODUCCIÓN

Los retos actuales a los que se enfrenta la industria minero-metalúrgica actualmente son la disponibilidad de agua, aumento en la demanda de minerales, aumento en los costos de energía, la reducción en las leyes de cabeza y la complejidad de los minerales procesados. Cuando se agotan los recursos no renovables de fácil extracción, refinación y transformación, acudimos a los materiales más complejos, con procesos más complejos. Por tanto, esto obliga a la generación de tecnologías sustentables y más eficientes en las operaciones mineras (Joffré Encinas, 2012).

En los procesos de flotación, con el avance de tecnología ahora es posible una flotación efectiva en el rango de tamaño inferior a 10 micrómetros, lo que lo hace posible separar minerales finamente diseminados de la ganga. Del mismo modo, la capacidad de producir alimentación ultrafina para diversos procesos de lixiviación, incluida la lixiviación biológica y oxidación a baja presión requiere molienda fina o ultrafina para mejorar la cinética de reacción al nivel en el que estos procesos pueden ser comercialmente viables. Los procesos económicos de molienda ultrafina también hacen posible lixiviar minerales de oro refractarios, en lugar del tostado más convencional o autoclave de alta presión (Lichter & Davey, 2006).

La molienda fina y ultrafina se está convirtiendo en un proceso indispensable para la industria minera y los molinos de medios agitados son una opción atractiva ya que tienen la capacidad de moler hasta tamaños finos, creciendo su interés en las aplicaciones de molienda primaria debido a su mayor eficiencia en comparación a los molinos de bolas, que generalmente se utilizan en esta etapa (Mazzinghy et al., 2015). Se ha demostrado que los molinos verticales de medios agitados muelen más fino con menor energía específica. Requieren aproximadamente de 30% a 50% menos energía que un molino de bolas para molienda fina y ultrafina (Palaniandy et al., 2015).

Con la creciente adopción de esta tecnología de molienda fina, ha aumentado la demanda de un modelo de proceso práctico para predecir el tamaño de las

partículas del producto del molino, bajo diferentes condiciones operativas para una distribución de tamaño de alimentación determinada (Hasan et al., 2018).

Diversos investigadores han realizado de manera satisfactoria la predicción de la curva granulométrica a la descarga de molinos verticales. Morrell et al. (1993) utilizó con éxito el modelo de balance poblacional para representar la fractura de partículas en un molino vertical. Hasan et al. (2018) demostró que el modelo de balance poblacional aplicado a un molino industrial VertiMill® es capaz de predecir la distribución del tamaño de las partículas del producto con cambio en la potencia del molino, la distribución del tamaño de la alimentación y el porcentaje de sólidos. Rocha et al. (2018) determinó que el desempeño de un molino vertical agitado a nivel laboratorio se puede describir utilizando un modelo de balance poblacional desarrollado originalmente para molinos de bolas. Mazzinghy & Cabello (2014) demostraron que es posible predecir la distribución del tamaño de partículas del producto de un molino VertiMill®, con buena precisión, utilizando el modelo de mezclado perfecto. Zavala (2024) logró realizar la predicción de la curva granulométrica a la descarga de un molino vertical HIGMill® utilizando el modelo de balance poblacional y logró determinar la potencia del molino con el modelo propuesto por Heath et al. (2017)

Justificación.

Se espera que la planta PLD de Minera Saucito mejore la recuperación general de oro y plata y, por lo tanto, maximice la producción en el distrito de Fresnillo, con una producción proyectada de 3,5 millones de oz de plata y 14 mil oz de oro por año, una vez que esté operando a plena capacidad. Este proyecto se dividió en dos fases: la primera fase estuvo compuesta por el circuito de flotación de hierro y la planta de lixiviación de piritas en Minera Saucito, la segunda fase, una planta de flotación de relaves de 14,000 t/d para tratar los relaves actuales e históricos de la mina Fresnillo para producir un concentrado de pirita que será enviado a una planta de lixiviación en Minera Saucito, parte final del proceso para producir los precipitados.

En el proceso de remolienda de concentrados de hierro de la planta de PLD de Minera Saucito, de acuerdo con diseño original debería estar obteniendo un P_{80} de 8 micrómetros a partir de un F_{80} de 40 micrones. En base a la estadística reciente de planta, el promedio fue alrededor de 29 a 33 micrómetros para la alimentación y 11 a 12 micrómetros para la descarga, lograr el P_{80} presupuesto incrementará la liberación de especies de oro y plata.

La evaluación y selección del modelo para el molino HGMill® instalado en la unidad Minera Saucito permitirá optimizar la operación de los molinos que actualmente se encuentran en operación a través de simulaciones considerando como variables operativas: nivel de bola, % sólidos de alimentación y velocidad de agitación.

Objetivo.

Predecir la curva granulométrica a la descarga del molino HGMill® vertical utilizando los modelos matemáticos de mezclado perfecto, modelo matricial (Lynch, 1997) y modelo de Charles (Gao & Forssberg, 1995) a través de las variables operativas del molino.

Objetivos específicos:

- Evaluar los diferentes modelos matemáticos para simular el funcionamiento de los molinos HGMill® y predecir su granulometría de descarga.
- Determinar los parámetros de los modelos de la función de selección y función de rompimiento y modelo matricial.
- Determinar los parámetros de modelo de Charles (Gao & Forssberg, 1995)
- Determinar el consumo de energía del molino a diferentes condiciones operativas utilizando los modelos propuestos por Nitta (2006) y Duffy (1995).
- Generar un simulador en Excel con los modelos encontrados para predecir la operación del molino HGMill® de Minera Saucito.

1. ANTECEDENTES DE LA REDUCCIÓN DE TAMAÑO DE PARTÍCULAS FINAS Y ULTRAFINAS DE MINERALES

La molienda es una operación que permite reducir el tamaño de mineral mediante diversos equipos que combinan esfuerzos de impacto y abrasión, cuyo objetivo principal es liberar las partículas de interés económico de la ganga para facilitar su posterior separación, regularmente etapas de trituración preceden a la etapa de molienda. Durante el proceso de molienda, las partículas pasan de tamaños de 5 y 200 milímetros hasta tamaños finales de 10 y 300 micrómetros. Es importante resaltar que la molienda es la operación que más consume energía en la planta, llegando a consumir hasta el 50% de toda la energía eléctrica. La mayor parte de la energía se pierde como calor y ruido.

A medida que los yacimientos de fácil extracción se van agotando, se encuentran cada vez más yacimientos con minerales diseminados. Por tanto, el proceso de liberación económica de estos minerales de la ganga se está volviendo cada vez más desafiante, ya que tales cuerpos minerales tienen tamaños de liberación del orden de aproximadamente 15 micrómetros y para lograrlo mediante molienda en molinos de bolas de convencionales es costoso y requiere mucho tiempo; por lo que la molienda ultrafina se está generalizando en la industria de los minerales.

La introducción de molinos de medios agitados en la industria de minerales ha ayudado a proporcionar el grado de molienda fina necesario para lograr los tamaños de liberación de minerales y su principal uso de estos molinos en la industria de la minería ha sido la liberación de minerales de oro finamente dispersos, minerales de magnetita, depósitos de cobre, plomo y zinc y minerales de platino donde el tamaño de liberación del mineral de interés es de 15 micrómetros o menos. Estos molinos son atractivos porque su consumo de energía es entre un 30% y un 40% menor que el de los molinos de bolas convencionales para obtener un producto de tamaño comparable (Gupta & Yan, 2016).

1.1. Principios de conminución.

Los materiales particulados se fracturan principalmente por la imposición de una tensión de compresión aplicada con bastante rapidez por el impacto. La fractura subsidiaria es causada por un alto esfuerzo cortante, particularmente en la superficie de la partícula. Lo primero conduce a la división y la fractura, mientras que lo segundo conduce al desgaste. Todos los materiales resisten la fractura en mayor o menor medida y se debe gastar energía para romper un sólido.

Es importante comprender la diferencia entre dureza y tenacidad. La dureza de un material representa su capacidad para resistir deformaciones. La tenacidad, por otro lado, es la capacidad de soportar tensiones sin fracturarse ni fallar; es esta última característica la que interesa principalmente en la conminución. Generalmente la mayoría de los minerales son frágiles, la razón es la tenacidad debido a la presencia de micro y macro defectos en los materiales. Griffith desarrolló una teoría de la fractura frágil durante la década de 1920, que finalmente condujo a la teoría moderna de la mecánica de la fractura. En esencia, Griffith (King, 2012) pudo explicar por qué la resistencia real de materiales frágiles como el vidrio era considerablemente menor que la resistencia esperada a partir de cálculos teóricos suponiendo que es necesario romper los enlaces interatómicos entre pares de átomos. Griffith postuló que las bajas resistencias observadas en los materiales elásticos frágiles se debían a la presencia de pequeñas grietas o fallas en el material. Cuando se estresa un material que contiene fallas, las fallas actúan como generadores de tensión, de modo que la tensión a lo largo del borde de las fallas es considerablemente mayor que la tensión promedio en la sección transversal del material (King, 2012).

Cuando el sólido original tiene algunas superficies preferidas a lo largo de las cuales es probable que se produzca la fractura, se produce el clivaje. La atricción ocurre cuando la partícula es grande y las tensiones no son lo suficientemente grandes para causar fracturas (esto ocurre a menudo en molinos autógenos donde las partículas grandes están presentes para actuar como medios molienda), la partícula

original apenas cambia de tamaño, pero en el proceso de desgaste genera un número significativo de partículas que son mucho más pequeñas.

1.2. Energía necesaria para la reducción de tamaño.

Desde el punto de vista de utilización de la energía, la reducción del tamaño es un proceso poco eficaz, tan solo una cantidad comprendida entre 0.1 y 2.0% de la energía suministrada a la maquina aparece en forma de incremento de energía superficial en los sólidos. La eficacia del proceso depende de la magnitud de la fuerza y de la forma en que se aplica, siendo también muy importante la naturaleza de la fuerza ejercida. Si la fuerza aplicada es insuficiente para exceder el límite de elasticidad, el material es comprimido almacenándose energía en la partícula. Al cesar la fuerza, la partícula regresa a su estado original y la energía aparece en forma de calor y no hay proceso de reducción de tamaño. Sin embargo, si una fuerza mayor provocara la fractura de la partícula, para tener la mejor utilización de la energía, la fuerza debe ser tan solo ligeramente superior a la tensión de rotura del material.

Resulta imposible calcular con precisión la cantidad de energía requerida para llevar a cabo la reducción del tamaño de un determinado material, si bien existe un cierto número de leyes empíricas (Coulson et al., 2020).

Ley de Kick (1885). Está más estrechamente relacionada con la energía necesaria para provocar una deformación elástica antes de que tenga lugar una fractura. Esta ley supone que la energía requerida está directamente relacionada con la relación de reducción y que la energía necesaria para quebrar una determinada cantidad de material desde un tamaño de 50 milímetros hasta 25 milímetros es misma que la necesaria para reducir el tamaño desde 12 milímetros hasta 6 milímetros.

Ley de Rittinger (1867). Relaciona la energía consumida con la distribución de tamaños de los productos. Según esto, la nueva superficie producida es proporcional a la energía consumida por la fractura. Esta ley es aplicable principalmente a aquellos procesos en los que se crea superficie nueva, y resulta

más precisa en molturación fina, en la que el incremento de superficie por unidad de masa del material es elevado.

Ley de Bond (1952). Bond sugirió una ley intermedia entre las de Rittinger y Kick introduciendo el índice de trabajo, expresándolo como la cantidad de energía requerida para reducir la unidad de masa de material desde un tamaño de partícula infinito hasta un tamaño de 100 micrómetros. El tamaño del material se toma como el de un orificio cuadrado a través del cual pasa el 80% del mismo.

1.3. Molienda ultrafina.

El tiempo y la innovación han dado como resultado numerosos diseños de molinos diferentes capaces de producir finos (Lichter & Davey, 2006); los molinos para molienda fina y ultrafina se clasifican en verticales y horizontales (Gupta & Yan, 2016) y algunos tipos son:

- Molinos de bolas.
- Molinos agitados.
- Molino centrífugo.
- Molino de chorro.

La definición de productos ultrafinos no es un estándar de la industria, pero de acuerdo con la publicación Lichter y Davey (2006) definen para su publicación “*Selección y dimensionamiento de molinos ultrafinos y agitados*” que la molienda ultrafina es por debajo de 15 micrómetros.

1.3.1. Molino de bolas.

Los molinos de bolas tienen un uso extenso para la producción de partículas finas, sin embargo, estos tienden a ser en aplicaciones de molienda seca en industrias específicas. Las aplicaciones de minerales industriales hacen uso extenso de molinos de bolas en molienda seca, a menudo utilizando medios de molienda de cerámica (para evitar la contaminación con metales provenientes de la bola) para la producción de polvos finos y ultrafinos. Los molinos de bolas en estas aplicaciones

operan normalmente en circuito cerrado con clasificadores dinámicos. Este tipo de molinos tienen una relación longitud-diámetro de más de 3 a 1. Para aplicaciones en molienda húmeda, el molino de bolas está limitado por los altos tonelajes procesados en este tipo de operaciones y moliendas relativamente gruesas. Las ventajas de eficiencia de los molinos de medios agitados sobre los molinos de bolas convencionales se han observado en aplicaciones finas y ultrafinas (Lichter & Davey, 2006). En molienda gruesa el molino de medios agitados requiere aproximadamente 30% menos energía que un molino de bolas mientras que para moliendas ultrafinas la diferencia se incrementa a 50% (Figura 1).

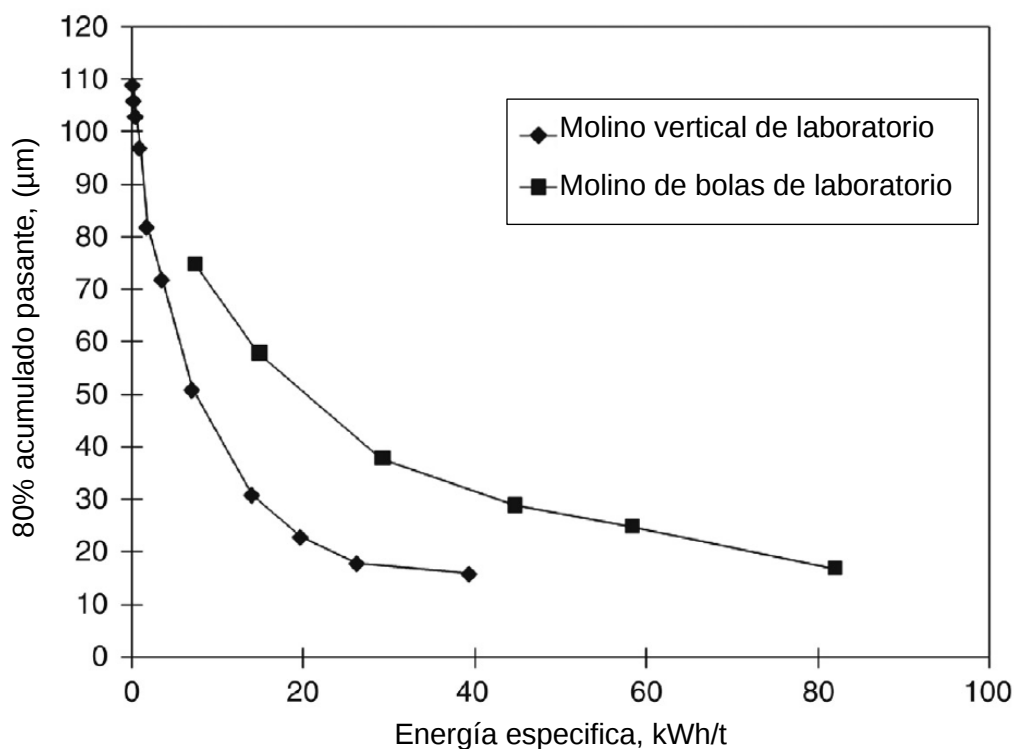


Figura 1. Consumo de energía específica vs tamaño del producto para un molino de bolas y un molino de medios agitados (Gupta & Yan, 2016).

1.3.2. Molinos agitados (molino vertical).

Es un molino de medios agitados consisten en un cilindro vertical con un agitador tipo tornillo de velocidad relativamente lenta (Figura 2). Normalmente son usados para remoliendas de concentrados con tamaños de alimentación alrededor de 100 a 300 micrómetros y productos típicos de 100 a 15 micrómetros. La bola utilizada principalmente son bolas de acero que varían en tamaño de 40 a 6 mm, también

son capaces de usar pebbles como medio de molienda lo que lo hace atractivamente económico. Generalmente este tipo de molinos son húmedos (Lichter & Davey, 2006). Pueden ser de baja o alta velocidad de rotación, generando productos debajo del 80% pasante a 1.5 micrómetros para los de baja velocidad y 0.5 micrómetros para los molinos de alta velocidad (Gupta & Yan, 2016).

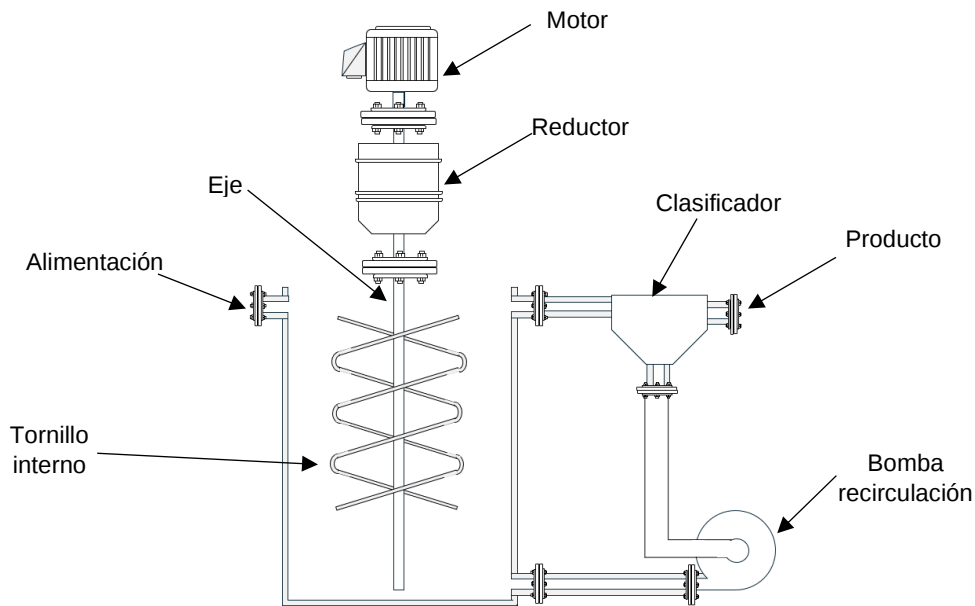


Figura 2. Esquema de un molino vertical (Vertimill)

1.3.3. Molino de pasadores.

Este tipo de molinos cuenta con un impulsor de eje vertical equipado con pasadores. El cuerpo del molino está lleno de medios esféricos, típicamente acero o cerámica, en el rango de tamaño de 3 mm a 12 mm, también pueden ser utilizados los pebbles de medios autógenos. Estos molinos son capaces de operar en húmedo o en seco. El tamaño de alimentación normalmente es inferior a 300 micrómetros y se pueden obtener valores por debajo de 10 micrómetros (Lichter & Davey, 2006). Las velocidades de impulsor relativamente altas a menudo resultan en problemas de desgaste con estos molinos, y son más adecuados para alimentaciones no abrasivas (Figura 3).

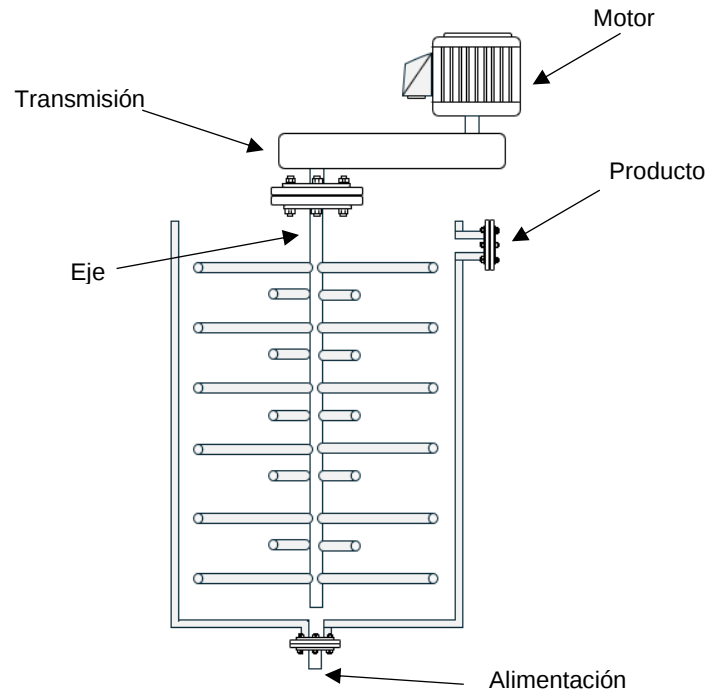


Figura 3. Esquema de un molino de pasadores.

1.3.4. IsaMill.

Este molino utiliza un agitador de medios de eje horizontal que generalmente está equipado con discos. Los medios utilizados varían desde medios de escoria fina preparados hasta medios de arena y medios cerámicos en el rango de tamaño de 1 a 3 mm (Lichter & Davey, 2006). En el caso de IsaMill, el molino está equipado con un retenedor centrífugo ajustado al impulsor para la retención de medios (Figura 4). La capacidad para molinos pequeños es de 10 a 30 t/h y para molinos de mayor tamaño es de alrededor de 125 t/h produciendo tamaños de partícula de 45 a 175 micrómetros, el tiempo de residencia promedio está entre 0.5 a 1 minuto (Gupta & Yan, 2016).

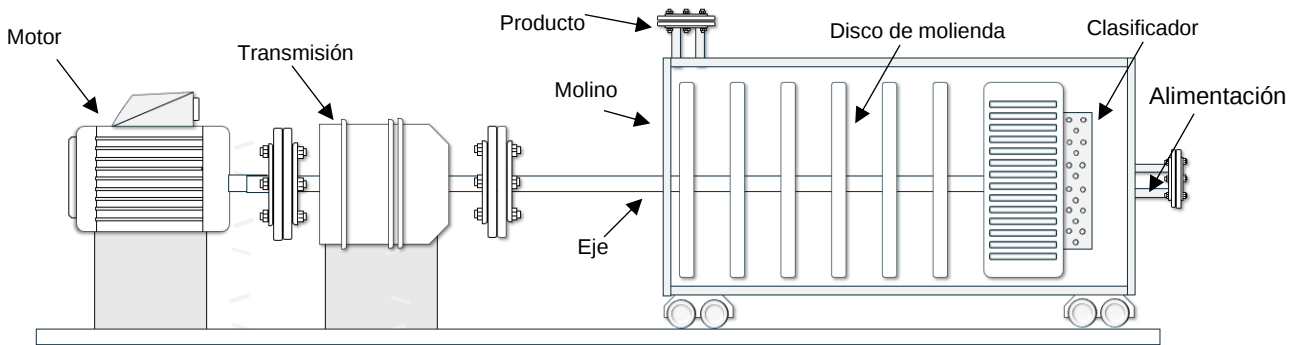


Figura 4. Molino IsaMill

1.3.5. Molino centrífugo.

Estos molinos generan una alta intensidad de energía dentro del molino moviendo el cuerpo del molino alrededor de un eje central a alta velocidad. Por lo tanto, es posible crear fuerzas superiores a 1 G disponible para los molinos de bolas. Estos molinos pueden funcionar con medios convencionales o de forma autógena, y funcionan en húmedo o en seco y aceptan tamaños de alimentación gruesa (limitados por el diámetro de la garganta) y son capaces de moler por debajo de 10 micrómetros. La retención de medios puede ser un problema cuando se requieren medios pequeños.

1.3.6. Molino de chorro.

Es un molino estacionario que utiliza la energía contenida en un fluido de movimiento rápido para producir una reducción del tamaño de partícula por impacto o abrasión de las partículas. Se utilizan dos tipos principales, ya sea el tipo paralelo donde se introduce el aire en una cámara de molienda circular o el chorro opuesto donde se impactan dos corrientes de fluido opuestas. El fluido utilizado para transportar los sólidos de alimentación es normalmente aire comprimido, un gas inerte o vapor. No se utilizan medios de molienda en los molinos de energía fluida, el material de alimentación y fluido que proporciona las fuerzas de fractura (Figura 5).

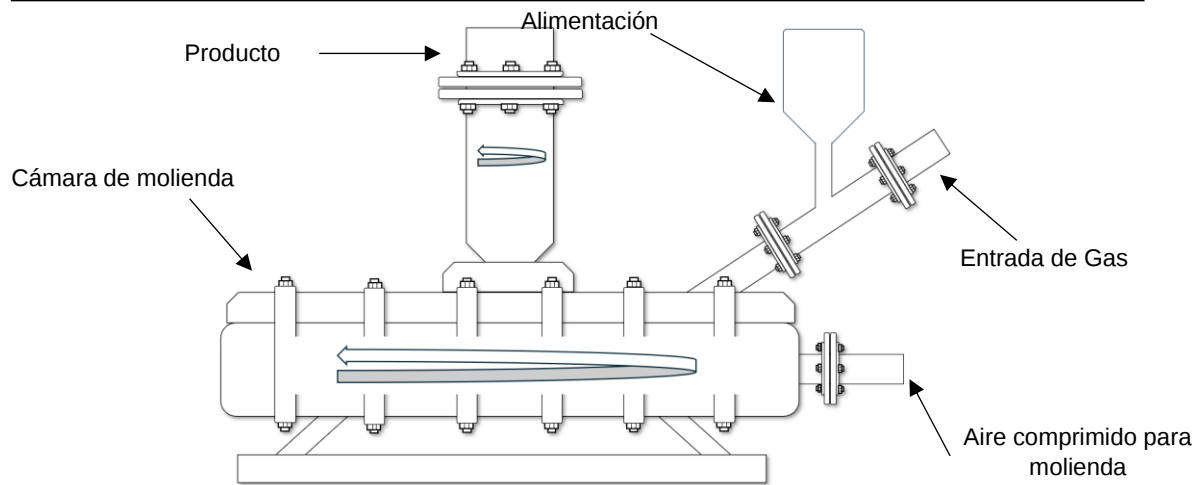


Figura 5. Esquema de funcionamiento del molino de chorro

1.4. Mecánica de molienda en molinos verticales.

Generalmente se acepta que la mecánica de trituración en molinos agitados verticales y horizontales se debe principalmente a la acción abrasiva. La acción de molienda es provocada por la velocidad tangencial producida por una espiral giratoria, pasadores o discos perforados. Las tensiones que actúan sobre las partículas se pueden describir como una función de variables tales como (Gupta & Yan, 2016):

- Velocidad tangencial, v_T (m/s)
- Densidad de pulpa, ρ_{SL} (kg/m³)
- Densidad del medio, ρ_m (kg/m³)
- Viscosidad de la pulpa, μ (Pa · s)
- Diámetro del molino, d_M (m)
- Diámetro del medio de molienda, d_m (m)

La acción de molienda en el molino vertical es principalmente por cizallamiento, esfuerzos de torsión y fuerzas de compresión producidas por el agitador que gira a altas velocidades. La función del agitador es producir energía cinética que se imparte al medio y produce tensión que es en última instancia el responsable del desgaste de las partículas. Esas tensiones dan como resultado la reducción del tamaño de partícula (incrementando el grado de liberación y el aumento de la

superficie de los productos). Sin embargo, la distribución de tensiones no es uniforme dentro del molino, sino que depende de los patrones de la pulpa y el medio de molienda, se ha demostrado que la tensión es máxima en el espacio entre la punta del agitador y la pared interior del molino. En varios estudios se ha determinado teóricamente la distribución de la tensión dentro de molinos con agitación vertical, al intentar estimar la distribución del estrés, se hicieron las siguientes suposiciones (Gupta & Yan, 2016):

- La energía cinética del medio desarrollada por la rotación del agitador se transfiere casi por completo a las partículas sólidas.
- La energía de tensión sobre las partículas es proporcional a la energía de tensión del medio de trituración.
- La velocidad tangencial de la pulpa en la punta de los pasadores (o espirales) es proporcional a la velocidad del medio de molienda.
- La acción abrasiva de los medios se debe a la energía generada por el agitador y es transmitida a las partículas minerales.
- Cada partícula debe someterse a tensión entre dos (o más) medios de molienda para reducir su tamaño.
- El grado de abrasión dependerá del número de impactos en la unidad de tiempo.

1.5. Variables operativas.

Velocidad de agitación. La velocidad del molino es una de las variables operativas más influyentes en la operación de molinos de medios agitados. En múltiples estudios realizados se ha concluido que, a determinada entrada de energía, el aumento de la velocidad de agitación reduce la eficiencia energética. Esta ineficiencia es causada por el decremento en el volumen efectivo de molienda debido a la creación de un vórtice en el centro del molino, también, mayor cantidad de energía es perdida como calor y fricción mecánica agitados (YUE, 2003).

Tamaño del medio de molienda. El tamaño del medio de molienda es una variable importante para la operación de un molino de medios agitados (YUE, 2003). Al igual

que la molienda en los molinos giratorios, se ha demostrado que el tamaño de los medios de molienda en los molinos de medios agitados afecta en gran medida la eficiencia de la molienda, con un tamaño pequeño del medio de molienda se tiende a dar una mayor reducción de tamaño de partículas finas y medios más grandes brindan una mayor eficiencia para triturar tamaños más gruesos (Gupta & Yan, 2016).

Porcentaje de Sólidos. La densidad de la pulpa o porcentaje de sólidos afecta el rendimiento de la molienda en molinos de medios agitados, se ha demostrado que altas densidades de pulpa benefician la eficiencia de molienda y permitirán un tamaño de producto más fino con el mismo consumo de energía específica (Huang, 2014).

Carga del medio de molienda. En nivel de llenado del medio de molienda es una variable operativa importante para el funcionamiento del molino de medios agitados. Rahal (2011) declaró que se pueden lograr fracturas adicionales aumentando la carga de medios de molienda. Este fenómeno tiene más influencia para un molino de agitación vertical, ya que un aumento de carga del medio de molienda aumentará el consumo de energía y el volumen de la zona de molienda activa, lo que da como resultado un mayor rompimiento de partículas (Hasan, 2016).

1.6. Modelación matemática en procesos de conminución.

Para evaluar y optimizar las operaciones de los molinos verticales, se han utilizado varios enfoques de modelado para representar el fenómeno dentro del molino. Estos modelos matemáticos se pueden clasificar en sus propósitos, incluida la estimación de potencia, la reducción de tamaño y la eficiencia (Huang, 2014).

1.6.1. Modelo de potencia de Tuzun.

Tuzun (1993) declaró que el consumo de energía de un molino agitado está relacionado con la energía necesaria para superar la fricción en las paredes y el fondo del molino. Se aplicó un enfoque de modelado empírico para relacionar el consumo de energía con los datos experimentales mediante análisis de regresión

(Huang, 2014). La ecuación de estimación de potencia se describe de la siguiente manera (ecuación 1):

$$P_{net} = 0105 \cdot N \cdot B^c \left(\rho_{eff} \cdot H \cdot D^2 \cdot \left(k' \cdot \left(\frac{D}{3} + H \right) + k'' \cdot V^2 \right) \right) \quad (1)$$

Donde:

N : Velocidad de rotación (rpm).

P_{net} : Potencia neta del molino (kW).

D : Diámetro del molino (m).

V : Velocidad de la punta del agitador (m/s).

H : Altura del medio de molienda (m).

B : Tamaño de bola (mm).

ρ_{eff} : Densidad efectiva de la carga (t/m³).

c, k', k'' : Constantes del modelo.

1.6.2. Modelo de potencia de Duffy.

Duffy (1995) introdujo una estructura de modelo de energía para molinos verticales que incluye el consumo de energía sin carga y el consumo de energía neta (Huang, 2014). La estructura del modelo es:

$$Potencia\ Total = Potencia\ sin\ carga + Potencia\ neta$$

La potencia sin carga está relacionada con el peso y la velocidad del agitador (ecuación 2):

$$Potencia\ sin\ carga\ (kW) = 0.000134 \cdot N_s \cdot W_s \cdot D_s^{0.57} \quad (2)$$

Donde:

N_s : Velocidad del agitador (rpm).

W_s : Peso del agitador (kg).

D_s : Diámetro del agitador (m).

La potencia neta está relacionada con la geometría del molino y las condiciones de operación (ecuación 3):

$$Potencia\ Neta\ (kW) = 0.0743 \cdot H_b \cdot N_s \cdot \rho_c \cdot D_b^{0.111} \cdot D_s^{3.057} \cdot T^{0.572} \quad (3)$$

Donde:

H_b : Altura de la carga de bola (m).

N_s : Velocidad del agitador (rpm).

ρ_c : Densidad de la carga (t/m³).

D_s : Diámetro del agitador (m).

D_b : Tamaño promedio de bola (mm).

T : Número de vueltas del tornillo helicoidal por arranque.

La potencia neta puede ser determinada fácilmente restando la potencia sin carga (ecuación 2) de la potencia total. La potencia neta consumida en el proceso de molienda representa la potencia que puede ser utilizada para la reducción de tamaño.

1.6.3. Modelo de potencia de Nitta.

Nitta et al. (2006) propuso un enfoque pragmático para calcular la potencia del motor del molino vertical mediante análisis de datos operativos mediante análisis dimensional (Huang, 2014). La ecuación de estimación de potencia del molino está definida de la siguiente manera (ecuación 4):

$$P = 312 \cdot H^{0.884} \cdot S^{2.232} \cdot D \cdot N^{1.232} \quad (4)$$

Donde:

P : Potencia eléctrica del motor (kg m²/s³).

H : Altura de la carga de bola (m).

S : Diámetro externo del molino (m).

D : Gap entre el tornillo y la pared del molino (m).

N : Velocidad del tornillo (rps).

1.6.4. Modelos de reducción de tamaño.

Los procesos de conminución han sido estudiados a través de los años; se han utilizado correlaciones estadísticas entre variables para desarrollar modelos matemáticos que describen unidades y operaciones integradas, y con la ayuda de

computadoras se pueden simular fácilmente y determinar las condiciones óptimas de funcionamiento y diseño de los circuitos con relativa facilidad y exactitud (Gupta & Yan, 2016)

En la modelación de sistemas de conminución, la idea básica es obtener una relación matemática entre el tamaño de la entrada y el tamaño de producto; es necesario considerar todas las variables involucradas en la operación incluyendo las características del equipo.

Se considera que el proceso de trituración está representado por dos procesos:

1. Se selecciona una partícula para su fractura,
2. La partícula fracturada produce una distribución determinada de tamaños

La distribución de tamaños producidos a partir de un solo paso de fractura se conoce como función de rompimiento o apariencia. Denota la distribución relativa de cada fracción de tamaño después de la fractura. La probabilidad de fractura de ciertos tamaños de partícula será mayor que otras a medida que pasan por la etapa de fractura. Así, la acción de fractura selectiva tiene lugar en una etapa particular de la molienda; la proporción resultante de partículas fracturadas de un intervalo de tamaño se conoce como función de selección o probabilidad de fractura.

En la Figura 6 se intenta ilustrar el mecanismo de fractura donde en la columna 3 se proporciona el análisis del tamaño de un único evento de fractura (esta es la función de fractura). Para partículas individuales presentes en cada fracción de tamaño 1, 2, 3, ..., N , la aplicación de fuerza se muestra con flechas continuas y las líneas de tensión conceptuales se indican con líneas de puntos. El movimiento de fragmentos al mismo tamaño o a tamaños inferiores se indica mediante flechas punteadas. La columna 1 también muestra la distribución del tamaño de alimentación, con las partículas de menor tamaño representadas en gris. La columna 4 muestra el producto fracturado después de n número de reducciones de tamaño. Las filas 1, 2, ..., N muestran las progenies de la fracción de tamaño único de tamaño 1. Se puede ver que la masa de tamaño 1, cuando se rompe, se distribuye en otras fracciones de tamaño.

Para identificar los productos en fracciones de diferentes tamaños, se han adoptado dos convenciones. Primero, la fracción de masa de partículas que quedan en tamaño 1, después de la fractura partículas de tamaño 1, se designa como $b_{1,1}$. De manera similar, para el material fracturado del tamaño 1 al tamaño 2, la fracción de masa es $b_{2,1}$ y así sucesivamente. Así, $b_{3,1}$, $b_{4,1}$, etc. a $b_{N,1}$ representan aquellas partículas presentes en los intervalos de tamaño de tamiz 3.º, 4.º, ..., N . obtenidos de la fractura de partículas de tamaño 1. De manera similar, la fractura del tamaño 2 de la alimentación será reconocido como $b_{2,2}$, $b_{3,2}$, ..., $b_{N,2}$ y así sucesivamente. En el caso general, cuando una partícula de tamaño j de la alimentación se fractura en la fracción de tamaño i del producto, se denomina $b_{i,j}$. La segunda convención es registrar la cantidad acumulada que pasa por cada tamiz en lugar de la retenida. Esto se representa como $B_{i,j}$ donde i y j tienen la misma convención (Gupta & Yan, 2016).

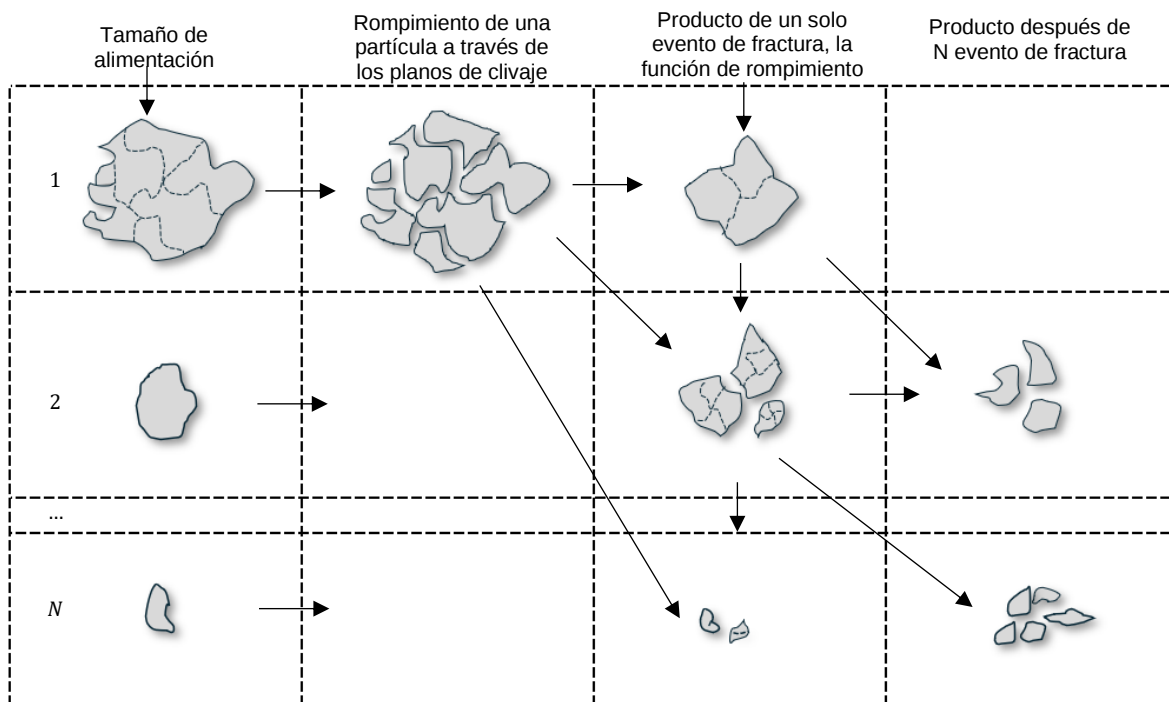


Figura 6. Representación de la distribución de partículas después del rompimiento.

1.6.5. Modelo de Charles.

De acuerdo con Mingwei Gao y Eric Forssberg (1995), la simulación del proceso de molienda ultrafina es una tarea formidable, a la que asisten muchos investigadores utilizando modelos de molinos de bolas convencionales. Se ha observado que la hipótesis la fractura de primer orden no es válida en molienda fina y que el mecanismo del proceso difiere sustancialmente de los molinos de bolas; por lo que se analiza la diferencia entre la molienda de bolas y un molino de medios agitados; y se propone un modelo de tamaño-energía para la simulación del molino de bolas con agitación. Los tamaños del producto de las distribuciones por debajo de 10 micrómetros de un molino de bolas agitado fueron simulados satisfactoriamente por el modelo; para realizar la simulación de los procesos se utilizó la ecuación de Charles (Gao & Forssberg, 1995) definida por (ecuación 5):

$$E = a(x_{m,p}^{-\alpha} - x_{m,f}^{-\alpha}) \quad (5)$$

Donde:

E : es la energía específica (kWh/t).

a y α : parámetro de la ecuación de Charles (Gao & Forssberg, 1995).

$x_{m,p}$: tamaño característico del producto (μm).

$x_{m,f}$: tamaño característico de la alimentación (μm).

Cuando los productos son mucho más finos que la alimentación a ecuación se puede aproximar a (ecuación 6):

$$E = ax_{m,p}^{-\alpha}, E > 0 \quad (6)$$

Donde x_m es igual a $x_{m,p}$. La ecuación anterior es útil para relacionar el consumo de energía para cierto tamaño de partícula, también puede expresarse de la siguiente manera (ecuación 7):

$$x_m = A_m E^{-R_m} \quad (7)$$

Donde A_m es el pseudo tamaño del producto a 1 kWh/t con un porcentaje pasante m y R_m es la tasa de reducción a un porcentaje de pasante m . La ecuación 7 puede ser utilizada para estimar el tamaño del producto correspondiente a un dado

porcentaje pasante m con una energía de entrada E . Si x_m , A_m y R_m se consideran en una forma matricial y relacionado con los tamaños característicos, como el 90% pasante, 80% pasante y así sucesivamente la ecuación anterior se transforma en (ecuación 8):

$$X = AE^{-R} \quad (8)$$

Comparado con el modelo de balance poblacional, el modelo de Charles (Gao & Forssberg, 1995) solo requiere dos parámetros, A y R ; y estos pueden ser determinados experimentalmente.

1.6.6. Modelado de balance poblacional.

Epstein (1947) dio la primera formulación de probabilidad continua del balance diferencial de tamaño-masa aplicado a los procesos de fractura; Sedlastscheck y Bass (1953) fueron los primeros en presentar la formulación que se utiliza en la actualidad, la formulación es un caso de modelado de balance poblacional que fue desarrollado originalmente para realizar seguimiento de las poblaciones de células en biología. Este concepto fue aplicado por primera vez en ingeniería química por Hulburt y Kats (1964), y se utiliza para describir procesos como aglomeración, floculación, cristalización, polimerización (Mazzinghy et al., 2015). El modelo del balance de masa-tamaño de partícula está dado por:

1. La velocidad de desaparición de partículas en el rango de tamaño j por rompimiento a cualquier rango de tamaño menor i (ecuación 9):

$$j = S_j m_i(t) M \quad (9)$$

2. La velocidad de aparición del tamaño i por el rompimiento de partículas del tamaño j (ecuación 10):

$$i = b_{i,j} S_j m_i(t) M \quad (10)$$

3. La velocidad de desaparición del tamaño i por rompimiento a cualquier rango de tamaño menor (ecuación 11):

$$i = S_i m_i(t) M \quad (11)$$

Para una masa constante M , el balance está dado por la (ecuación 12):

$$\frac{dm_i(t)}{dt} = -S_i m_i(t) + \sum_{j=i}^{i=1} b_{ij} S_j m_j(t) \quad (12)$$

Para $N \geq i \geq j \geq 1$

Donde $m_i(t)$ es la fracción de masa de partículas contenidas en el tamaño i después de un tiempo de molienda t ; b_{ij} representa el tamaño de distribución sobre el tamaño i producidas por un evento de ruptura que involucra partículas en la clase de tamaño j ; S_i representa función de selección o la tasa de específica de fractura de partículas en tamaño i .

Para el modelado de molinos continuos en estado estacionario, la ecuación de fractura se combina con la distribución del tiempo de residencia del material. Los dos extremos de las distribuciones del tiempo de residencia son flujo pistón y completamente mezclado. Para el flujo pistón, todos los materiales tienen el mismo tiempo de residencia y, por lo tanto, la ecuación de molienda por lotes es aplicable cuando se integra desde el tiempo cero al tiempo de residencia. La solución a esta integración fue propuesta originalmente por Reid y se conoce como solución de Reid (Gupta & Yan, 2016). Para un molino completamente mezclado en estado estacionario (ecuación 13):

$$P_i = F_i + \tau \sum_{j=1}^{i-1} b_{ij} S_j m_j - S_i m_i \tau \quad (13)$$

Para $N \geq i \geq j \geq 1$ donde τ es el tiempo de residencia.

1.6.7. Modelo de mezclado perfecto.

El modelo perfecto mezclado puede ser considerado un caso especial del modelo de balance poblacional (Mazzeinghy & Cabello Russo, 2014). Este modelo ha sido utilizado para optimizar y escalar diferentes tipos de circuitos de molienda alrededor del mundo. El modelo es descrito por la ecuación:

$$\text{Alimentación} + \frac{\text{material quebrado}}{\text{de partículas grandes}} = \frac{\text{material seleccionado}}{\text{para rompimiento en el molino}} + \frac{\text{material}}{\text{descargado}}$$

Estos parámetros se pueden evaluar de la siguiente manera:

1. Alimentación: denotada por la matriz F .
2. Tasa de fractura: $R \cdot s$ donde R es una matriz diagonal que da la tasa de fractura de cada componente del contenido del molino, s (para cualquier componente i , la tasa de fractura es $R_i \cdot s_i$). La matriz del contenido del molino, s , representa la masa del contenido del molino retenida en cada fracción de tamaño.
3. Tasa de aparición: denotada por $A \cdot R \cdot s$ donde A es la matriz de apariencia (es decir, es la misma que la matriz B y de manera similar se puede obtener experimentalmente, analíticamente o valores aproximados asumidos).
4. Tasa de descarga: denotada por $P = D \cdot s$, donde D es una matriz triangular que da las tasas fraccionarias a las que se descargan los componentes del molino. Para un molino perfectamente mezclado, el producto será el mismo que el contenido del molino. Sin embargo, puede ocurrir una clasificación dentro del molino, particularmente en el caso de los molinos con descarga de parrilla; por tanto, el producto del molino incluye D y s . Combinando estos factores se obtienen las ecuaciones 14 y 15 (Gupta & Yan, 2016):

$$\frac{\partial s}{\partial t} = A \cdot R \cdot s - R \cdot s + F - P \quad (14)$$

$$\frac{\partial s}{\partial t} = (A \cdot R - R - D)s + F \quad (15)$$

En estado estable la velocidad de cambio en el molino es cero, $\frac{\partial s}{\partial t} = 0$; entonces (ecuación 16):

$$(A \cdot R - R - D)s + F = 0 \quad (16)$$

Si $P = D \cdot s$ o $s = D^{-1} \cdot P$, sustituyendo s en la ecuación 16, la ecuación resulta (ecuación 17):

$$P = D \cdot R^{-1} \cdot (D \cdot R^{-1} + I - A)^{-1} \cdot F \quad (17)$$

Es posible evaluar la ecuación 17 siempre y cuando los parámetros A , R y D sean conocidos. Sin embargo, los parámetros R y D son interdependientes y sólo pueden determinarse si se dispone de datos sobre el contenido del molino. Esto no siempre

se sabe en los molinos industriales. Pueden agruparse los dos como un parámetro combinado $D \cdot R^{-1}$.

Para evaluar los parámetros del modelo, suponiendo una condición de estado estable se reacomoda la ecuación sustituyendo $s = D^{-1} \cdot P$ (ecuación 18):

$$\begin{aligned}(A \cdot R - R - D)s + F &= 0 \\ A \cdot R \cdot D^{-1} \cdot P - R \cdot D^{-1} \cdot P - P + F &= 0 \\ F - P &= (1 - A)R \cdot D^{-1} \cdot P \\ P &= D \cdot R^{-1} \cdot (1 - A)^{-1} \cdot (F - P)\end{aligned}\tag{18}$$

De la ecuación 14 se obtiene (ecuación 19):

$$R \cdot s = (1 - A)^{-1} \cdot (F - P)\tag{19}$$

Por tanto (ecuación 20):

$$P = D \cdot R^{-1} \cdot R \cdot s\tag{20}$$

Al despejar el parámetro $D \cdot R^{-1}$ se obtiene (ecuación):

$$D \cdot R^{-1} = \frac{P}{R \cdot s}\tag{21}$$

La ecuación 19 se puede resolver si $(1 - A)^{-1}$ es conocido, pero rara vez está disponible. Las ecuaciones anteriores son dos ecuaciones simultaneas en $R \cdot s$.

Ambas ecuaciones son ecuaciones matriciales triangulares y se pueden resolver utilizando la técnica de sustitución. Para utilizar esta técnica, las ecuaciones deben ordenarse en forma matricial:

$$\begin{bmatrix} (I - A_{11}) & 0 & 0 & \cdots & 0 \\ -A_{21} & (I - A_{22}) & 0 & \cdots & 0 \\ -A_{31} & -A_{32} & (I - A_{33}) & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & 0 \\ -A_{n1} & -A_{n2} & -A_{n3} & \cdots & (I - A_{nn}) \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} (R \cdot s)_1 \\ (R \cdot s)_2 \\ (R \cdot s)_3 \\ \vdots \\ (R \cdot s)_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} (F_1 - P_1) \\ (F_2 - P_2) \\ (F_3 - P_3) \\ \vdots \\ (F_n - P_n) \end{bmatrix}$$

Por lo tanto, la solución general se describe de la siguiente manera (ecuación 22):

$$(R \cdot s)_i = \frac{(F_i - P_i) + \sum_{j=1}^{i-1} A \cdot (R \cdot s)_j}{(1 - A_{ii})} \quad (22)$$

Al considerar el balance de masa en un sistema de fractura; Lynch, Whiten y posteriormente Gault (Gupta & Yan, 2016) relacionaron la tasa de descarga del molino con la tasa de alimentación volumétrica y las dimensiones (ecuación 23):

$$D = \left[\frac{4V}{D^2 L} \right] D^* \quad (23)$$

Donde:

D^* : Función de descarga estándar.

V : Tasa de alimentación volumétrica (m³/h).

D : Diámetro del molino (m).

L : Longitud del molino (m).

D^* es una matriz diagonal que es independiente del tamaño a menos que se produzca la clasificación en la descarga del molino. D^* tiene valores diagonales cercanos a la unidad. El parámetro combinado $D \cdot R^{-1}$ de acuerdo (ecuación 24):

$$D \cdot R^{-1} = f(D \cdot R^{-1})^* \quad (24)$$

Donde f es una función de la velocidad de alimentación al molino y $(D \cdot R^{-1})^*$ es constante, por tanto, el parámetro de rompimiento puede ser definido por (ecuación 25):

$$D \cdot R^{-1} = \frac{4V}{D^2 L} (D \cdot R^{-1})^* \quad (25)$$

1.6.8. Función de selección.

La distribución de tamaños para un solo paso de rompimiento se conoce como la función de rompimiento. La probabilidad de fractura de ciertos tamaños de partículas será mayor que otras a medida que pasan a través de la etapa de conminución, por lo tanto, tiene lugar una acción de fractura selectiva y la proporción resultante de partículas rotas de un intervalo de tamaño se conoce como función de selección o

probabilidad de fractura. Usando estos conceptos se han desarrollado relaciones matemáticas entre el tamaño de alimentación y el tamaño del producto, después un proceso de conminución (Gupta & Yan, 2016).

Cuando una muestra de mineral o roca es sometida a un sistema de conminución, este contiene varios tamaños de partícula; la probabilidad de quebrado en partículas grandes es considerablemente mayor comparado con los tamaños pequeños, es decir, cierta proporción de partículas con cierto rango de tamaño son preferencialmente reducidas de tamaño. La proporción de partículas para cada rango de tamaño de partícula que son fracturadas se representan con la letra S . Así $S_1, S_2, \dots S_n$ son la fracción de material para cada rango de tamaño que son sometidas a la reducción con las restantes que pasan sin ningún cambio, esto se conoce como la función de selección.

Herbst and Fuerstenau (1973) desarrollaron la ecuación de la función de selección relacionada con la energía específica consumido por el molino (ecuación 26). En ella se asume que la función de selección, $S_i \text{ (min}^{-1}\text{)}$ tiene una relación proporcional con el consumo de potencia del molino de acuerdo (Rocha et al., 2018):

$$S_i = S_i^E \left(\frac{P_{net}}{M} \right) \quad (26)$$

Donde:

S_i^E : Representa la función de selección específica (t/kWh).

M : masa total del material en el interior del molino (t).

P_{net} : consumo de potencia neta (kW).

La función de selección específica, S_i^E , es independiente de las dimensiones del molino y puede ser determinada directamente usando la ecuación 27 desarrollada por Rajamani y Herbst:

$$S_i^E = S_1^E \exp \left\{ \zeta_1 \ln \left(\frac{d_i}{d_1} \right) + \zeta_2 \ln \left(\frac{d_i}{d_1} \right)^2 \right\} \quad (27)$$

Donde $S1^E$, ζ_1 y ζ_2 son los parámetros específicos del material y las condiciones de molienda, y $\frac{d_i}{d_1}$ son los tamaños de partículas.

La función de selección también se puede determinar para un proceso de molienda de primer orden (ecuación 28), si en un proceso de molienda en lotes designamos la carga de mineral como M , la fracción de masa en el tamaño i es m_i y la velocidad específica de quebrado es S_i (Gupta & Yan, 2016):

$$-\frac{d[m_i(t)M]}{dt} = -S_i m_i(t)M \quad (28)$$

Donde S_i es constante y $m_i(t)$ es la fracción de masa en el tamaño i después de un tiempo de molienda t . Dado que la masa total contenida en el molino batch es constante y S_i es independiente del tiempo, integrando la ecuación anterior resulta (ecuación 29):

$$m_i(t) = m_i(0) \exp(-S_i t) \quad (29)$$

O también (ecuación 30):

$$\log m_i(t) = \log m_i(0) - \frac{S_i t}{2.303} \quad (30)$$

Graficando $\log m_i(t)$ en función del tiempo se obtendrá una línea recta (Figura 7).

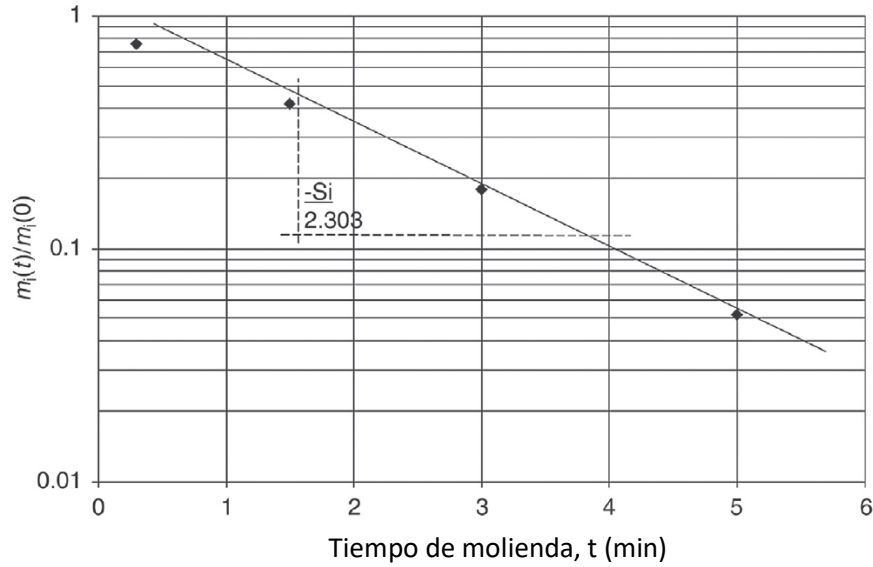


Figura 7. Grafica de primer orden para la determinación de la función de rompimiento. (Gupta & Yan, *Mineral Processing Desing and Operations An Introduction*, 2016)

La función de selección comúnmente usa el modelo de Austin (Lu, 2016), que representa la función de velocidad específica de quebrado en min^{-1} con el tamaño de partícula x , se representa de la siguiente manera (ecuación 31):

$$s_i = A^* \left(\frac{x_i}{1000} \right)^\alpha + \frac{1}{1 + \left(\frac{x_i}{\mu} \right)^\Lambda} \quad (31)$$

Donde A^* , α , μ y Λ son los parámetros del modelo, A tiene las unidades de min^{-1} , α y Λ son adimensionales, x_i es el tamaño de partícula expresado en micrómetros y μ es el tamaño máximo de partícula del sistema expresado en micrómetros (Hasan et al., 2018).

1.6.9. Función de rompimiento.

La distribución de tamaños para un solo paso de rompimiento se conoce como la función de rompimiento (Gupta & Yan, 2016). El modelo de función de rompimiento (ecuación 32) representa la fracción de peso acumulativo del material quebrado desde el tamaño j que pasa a tamaños menores (Rocha et al., 2018):

$$B_{i,j} = \phi \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\gamma + (1 - \phi) \left(\frac{d_{i-1}}{d_j} \right)^\beta, 0 < \phi < 1 \quad (32)$$

Donde ϕ es una constante que depende del material, representa la fracción de finos que son producidos en un solo evento de fractura, γ es también dependiente del material con valores entre 0.5 y 1.5, β tiene valores generalmente entre 2.5 y 5 para la mayoría de los minerales. La ecuación 32 representa cálculo empírico que relaciona la función de rompimiento con el tamaño de partícula.

La ecuación de Klimpel y Austin (Gupta & Yan, 2016) está definida de la siguiente manera (ecuación 33):

$$B(d_i) = 1 - \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_j} \right) \right]^{n_1} \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_j} \right)^2 \right]^{n_2} \left[1 - \left(\frac{d_i}{d_j} \right)^3 \right]^{n_3} \quad (33)$$

Donde:

d_j : Tamaño original antes del rompimiento

d_i : Tamaño de partícula en la fracción i

$n_1 - n_3$: Parámetros del modelo

$B(d_i)$: Fracción de masa acumulada más fina que d_i donde $d_j > d_i > 0$

1.6.10. Modelo matricial.

Lynch (1977) expresó la relación entre la función de selección S y la alimentación utilizando un modelo matricial que representa las distribuciones del tamaño de partícula en la alimentación y producto como N rangos de tamaño. La matriz se desarrolló asumiendo que S_i es la proporción de partículas dentro de una fracción de tamaño, i , que se romperán preferencialmente. La distribución del tamaño de partícula en la alimentación es representada por la matriz F , así la fracción que se rompería selectivamente será $S \cdot F$, de esta manera $F_1, F_2, F_3, \dots, F_N$ es la masa del material en cada fracción de tamaño en la alimentación y $S_1, S_2, S_3, \dots, S_N$ es la proporción de partículas que tienen la probabilidad de romperse en los intervalos de tamaño correspondientes, entonces el proceso de fractura se puede escribir en forma matricial de la siguiente manera (ecuación 34):

$$\begin{array}{ccccc}
 \text{Tamaño} & \text{Alimentación} & \text{Función de selección} & \text{Masa de partículas fracturadas} & \\
 1 & F_1 & S_1 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\
 2 & F_2 & 0 & S_2 & 0 & 0 & \cdots & 0 \\
 3 & F_3 & 0 & 0 & S_3 & 0 & \cdots & 0 \\
 4 & F_4 & 0 & 0 & 0 & S_4 & \cdots & 0 \\
 \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\
 N & F_N & 0 & 0 & 0 & 0 & \cdots & S_N
 \end{array} = \begin{array}{c} F_1 S_1 \\ F_2 S_2 \\ F_3 S_3 \\ F_4 S_4 \\ \vdots \\ F_N S_N \end{array} \quad (34)$$

De este modo, la masa del producto partículas seleccionadas será (ecuación 35):

$$P = S * F \quad (35)$$

Y la masa de las partículas que pasan sin ningún cambio será $(I - S * F)$, donde I representa la matriz identidad.

El producto total de del proceso de fractura será la suma de las partículas quebradas y no quebradas. Las partículas quebradas tendrán una distribución, B , que corresponda a la función de rompimiento y es para todas las partículas realmente quebradas, por lo tanto, los fragmentos del producto debido a la fractura pueden ser representado por $B * S * F$. Toda la operación de fractura es la suma de las partículas quebradas y no quebradas y se puede expresar mediante (ecuación 36):

$$P = B * S * F + (I - S) * F \quad (36)$$

2. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL PARA EL DESARROLLO DEL MODELO MATEMÁTICO DEL MOLINO HIGMILL® DE MINERA SAUCITO

Los datos experimentales se obtuvieron a partir de un diseño experimentos y el muestreo realizado en circuito de molienda, se correlacionó la curva granulométrica a la descarga del molino con las principales variables de operación del molino: velocidad del agitador y porcentaje de sólidos de alimentación, manteniendo constante el nivel de bola dentro del molino, para esto se utilizaron tres diferentes modelos matemáticos.

2.1. Diseño de experimentos.

Para generación de las combinaciones a las diferentes condiciones operativas y la validación del modelo se utilizó un diseño factorial 2^k donde $k = 2$ factores (velocidad del agitador y porcentaje de sólidos de alimentación). La experimentación fue realizada en el molino A HIGMill® instalado en la planta de lixiviación de piritas utilizando los valores máximos y mínimos para cada factor indicados en la Tabla 1, los niveles fueron definidos de acuerdo con los valores históricos operativos del molino vertical. Durante el muestreo se mantuvo constante el set point de alimentación de flujo volumétrico al molino en $34 \text{ m}^3/\text{h}$ y el nivel de bola fue fijado en 7 toneladas; para asegurar el nivel de bola, el molino fue drenado y lavado completamente antes de la prueba, y posteriormente se realizó la recarga de la bola.

Tabla 1. Niveles de factores para el diseño experimentos.

Factores	Niveles
Velocidad del rotor, m/s	7 – 8.8
Porcentaje sólidos, %	34 – 40

En la Tabla 2 se definen las 4 combinaciones posibles para el diseño experimental y la secuencia en las que fueron realizadas.

Tabla 2. Diseño de experimentos

Prueba	Velocidad Agitador, m/s	% Sólido Alimentación
1	7.00	34
2	8.80	34
3	7.00	40
4	8.80	40

En la Tabla 3 se muestran las condiciones de flujo volumétrico y tonelaje seco de alimentación al molino en las cuales se llevó a cabo el muestreo de las corridas experimentales.

Tabla 3. Condiciones de operación del molino HIGMILL®

Variable	Corrida 1 y 2	Corrida 3 y 4
Sólidos, %	34	40
Gravedad específica mineral	3.6	3.6
Densidad Pulpa, t/m^3	1.33	1.41
Flujo volumétrico pulpa, m^3/h	34	34
Flujo másico pulpa, t/h	45.07	47.81
Mineral, t/h	15.32	19.13

2.2. Muestreo de molinos.

La planta de lixiviación de piritas cuenta con dos molinos verticales a circuito abierto, cada molino cuenta con su propio lazo de control de velocidad y flujo. Los molinos son alimentados de concentrado de piritas proveniente del espesador de cabeza, y previamente almacenado en un tanque de balance. La experimentación fue realizada en el molino A, las muestras se tomaron en la alimentación y descarga del molino vertical (Figura 8).

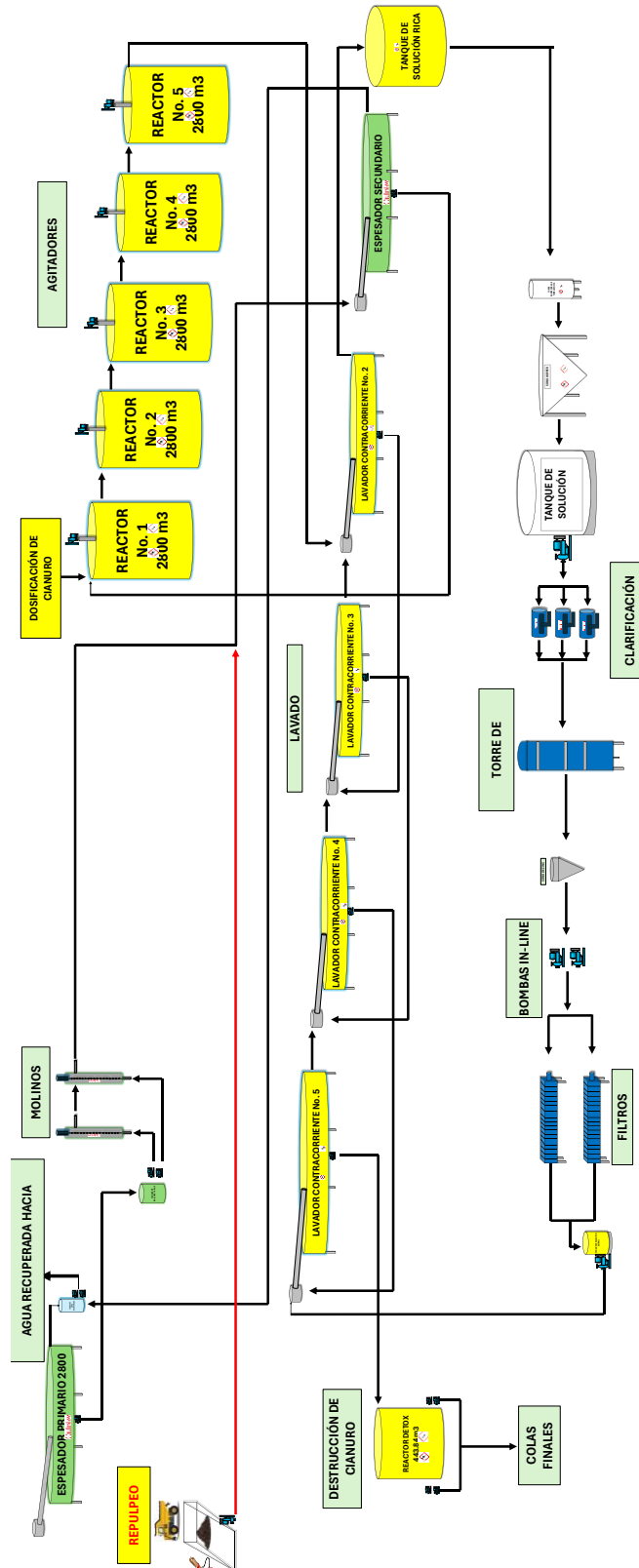


Figura 8. Diagrama de flujo de planta de lixiviación de piritas de Minera Saucito.

En cada prueba experimental se ajustaron controladamente las variables operativas de acuerdo con los valores definidos en la Tabla 2, y para cada prueba experimental se tomaron 4 muestras puntuales la cuales fueron analizadas individualmente utilizando el equipo de difracción laser Helos® para determinar la granulometría, Tabla 4.

Tabla 4. Identificación de muestras.

Tiempo (min)	Muestra	Velocidad Agitador, m/s	% Solido Alimentación, %	Nivel de bola, toneladas
0	1.1	7.00	34	7
15	1.2	7.00	34	7
30	1.3	7.00	34	7
45	1.4	7.00	34	7
0	2.1	8.80	34	7
15	2.2	8.80	34	7
30	2.3	8.80	34	7
45	2.4	8.80	34	7
0	3.1	7.00	40	7
15	3.2	7.00	40	7
30	3.3	7.00	40	7
45	3.4	7.00	40	7
0	4.1	8.80	40	7
15	4.2	8.80	40	7
30	4.2	8.80	40	7
45	4.2	8.80	40	7

2.3. Equipo de difracción de rayos láser Helos®.

El equipo Helos® (Figura 9) fue utilizado para determinar la curva de distribución granulométrica de cada una de las muestras obtenidas de la siguiente manera:



Figura 9. Equipo de difracción laser Helos ®.

- Ajuste del lente. El equipo automáticamente realiza una calibración y enfoque del lente a utilizar para la medición, a fin de asegurar la confiabilidad de los resultados. Para determinar la curva granulométrica a la alimentación del molino se utilizó el lente R3 el cual tiene rango de medición de 0.5 a 175 micrómetros y para el producto del molino se utilizó el lente R2 con un rango de medición de 0.25 a 87.5 micrómetros.
- Medición del background. Se adiciona 1L de agua destilada y la velocidad de la bomba en 600 rpm. En esta etapa se realiza la medición de agua destilada como referencia, se deberá tener una medición inferior a 5 unidades en el primer anillo detector (Figura 10), lo que indica que la recamara se encuentran libre de partículas y no hay interferencia en la medición de la muestra.



Figura 10. Medición del background.

- Medición de la muestra. El equipo enciende el ultrasónico para evitar la aglomeración de partículas y se comienza a adicionar la muestra hacia la recamara, es necesario adicionar la muestra con una pipeta Pasteur. Conforme se va adicionando la muestra, en la pantalla se observa la concentración óptica, la cual deberá andar entre 15 – 20% (Figura 11); una vez alcanzada la concentración el equipo realiza dos mediciones de la

muestra determinando el porcentaje retenido en cada rango de tamaño de partícula y el porcentaje acumulado pasante.

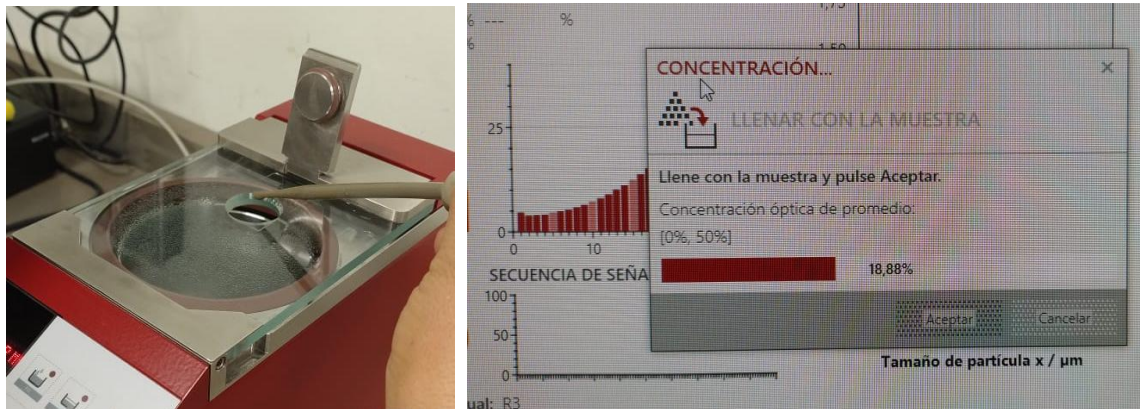


Figura 11. Adición de muestra y medición de la concentración óptica.

- Limpieza de recámara. Una vez realizada la muestra se drena la recámara y se realizan dos ciclos de lavado adicionando 300 ml de agua destilada con una velocidad de la bomba de 2000 rpm (Figura 12).



Figura 12. Limpieza de recámara del equipo.

2.4. Recolección de datos de proceso.

Los datos de las variables de operación del molino tales como potencia, velocidad del rotor, flujo volumétrico y % de sólidos fueron extraídos mediante el software PI

System de Osisoft para cada corrida experimental, la configuración utilizada es a través de datos promedio en intervalos de 5 minutos. Este software es el historizador de las variables operativas de planta y nos da la facilidad de conocer el comportamiento de las variables a lo largo del tiempo pasado y extraerlas en una base de datos en Excel; esto nos permitió determinar los niveles para cada uno de los factores usando datos históricos y también extraer la información de dichas variables durante los muestreos, a fin de confirmar si estuvieron en control en todo momento.

2.5. Ajuste de parámetros de modelos matemáticos.

Una vez obtenidas las curvas granulométricas de alimentación y descarga para cada corrida experimental, se realizó el ajuste en los parámetros de los modelos matemáticos de la siguiente manera:

Modelo de mezclado perfecto (ecuación 22): para realizar el ajuste del modelo de mezclado perfecto se utilizó la ecuación 17, la en la cual se buscó determinar los valores de los parámetros A , R y D ; a su vez el parámetro $D \cdot R^{-1}$ se determinó a partir de la ecuación 21 y el valor del parámetro $R \cdot s$ con la ecuación 22, las ecuaciones fueron configuradas de manera matricial en una hoja de Excel y la función objetivo fue minimizar el error entre los datos experimentales y datos ajustados.

Modelo matricial (ecuación 36): se configuró de manera matricial en una hoja de cálculo de Excel y la función objetivo fue minimizar el error entre los datos experimentales y los datos ajustados a través de un proceso iterativo utilizando la herramienta Solver, se determinaron los parámetros A, α y Λ de la función de selección (ecuación 31) y los parámetros $\emptyset, \gamma$ y β de la función de rompimiento (ecuación 32).

Modelo de potencia: la potencia fue determinada a partir de la geometría y las condiciones operativas indicadas en la Tabla 5 y 6 utilizando los modelos de Nitta (2006) y Duffy (1995) (ecuación 4 y 5).

Tabla 5. Constantes para el cálculo de potencia del molino modelo de Duffy (1995).

VARIABLE	VALOR
N_s : Velocidad del agitador (rpm)	120 y 146 rpm
W_s : Peso del tornillo (kg)	7000 kg
D_s : Diámetro del agitador (m)	0.89 m
H_b : Altura de la carga de bola (m)	2.90 m
ρ_c : Densidad de la carga (t/m ³)	1.33 y 1.41 t/m ³
D_s : Diámetro del agitador (m)	0.89 m
D_b : Tamaño promedio de bola (mm)	3 mm
T : Número de vueltas del tornillo helicoidal por arranque	120 y 146 rpm

Tabla 6. Constantes para el cálculo de potencia del molino modelo el modelo de Nitta (2006).

VARIABLE	VALOR
H : Altura de la carga de bola (m)	2.90 m
S : Diámetro externo del molino (m)	1.14 m
D : Gap entre el tornillo y la pared del molino (m)	0.12 m.
N : Velocidad del tornillo (rps)	2.0 y 2.4 rps

Modelo de Charles (Gao & Forssberg, 1995): la potencia fue determinada a partir de la ecuación 5 y el modelo de Charles (ecuación 8), se determinó de manera iterativa los valores de los parámetros A y R a partir de la configuración en una hoja de Excel y con el uso de la herramienta Solver, la función objetivo fue minimizar el error entre los datos experimentales y ajustados.

En la Figura 13 se muestra de manera esquemática el diagrama de flujo que se realizó para el ajuste de los modelos matemáticos de mezclado perfecto (ecuación 22), modelo de matricial (ecuación 36), cálculo de potencia (ecuación 4 y 5) y el modelo de Charles (ecuación 8).

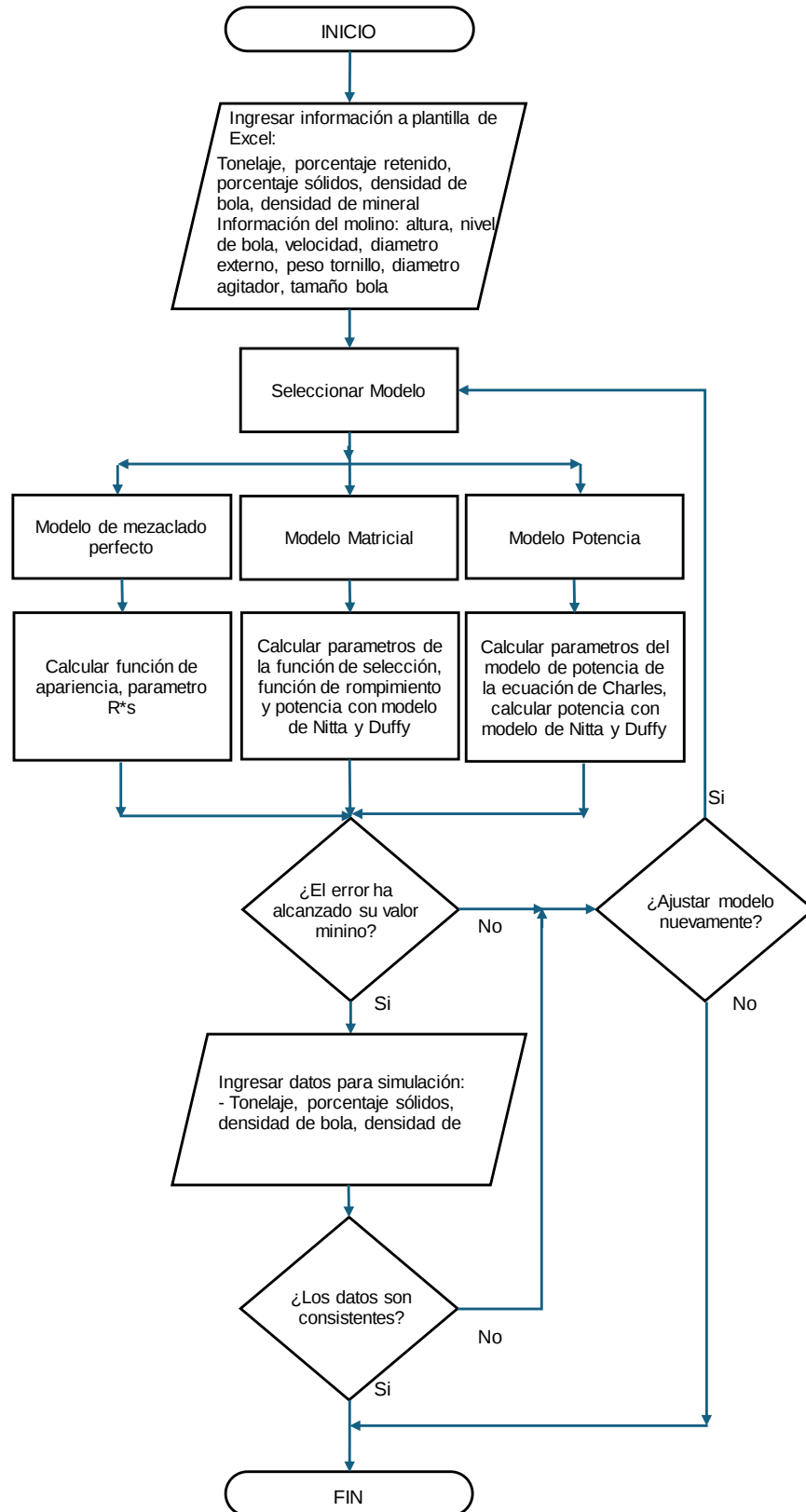


Figura 13. Diagrama de flujo de ajuste de parámetros de modelos y simulación.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN DE LA GENERACIÓN DEL MODELO MATEMÁTICO PARA EL MOLINO HIGMILL® DE MINERA SAUCITO

Las distribuciones granulométricas a la descarga del molino para cada prueba experimental se muestran en la Figura 14 a la 17; en cada una de ellas se gráfica las muestras que fueron tomadas para su análisis, se puede observar que las muestras de cada una de las pruebas tienen una distribución similar entre ellas, pero, el caso de la prueba 4 la muestra 4.1 presenta una ligera variación respecto a las demás, esto puede implicar que el modelo no pueda minimizar el error entre los datos experimentales y ajustados, provocando predicciones erróneas en los datos simulados.

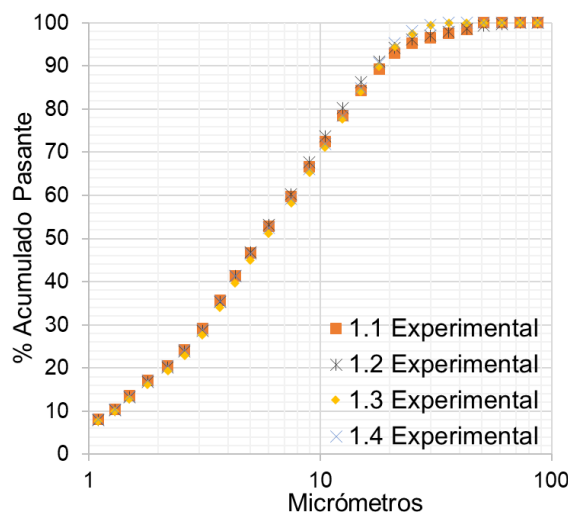


Figura 14. Curva granulométrica a la descarga molino, corrida 1.

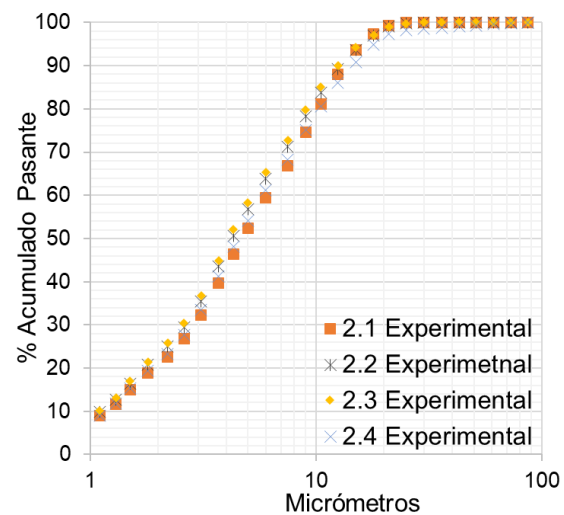


Figura 15. Curva granulométrica a la descarga molino, corrida 2.

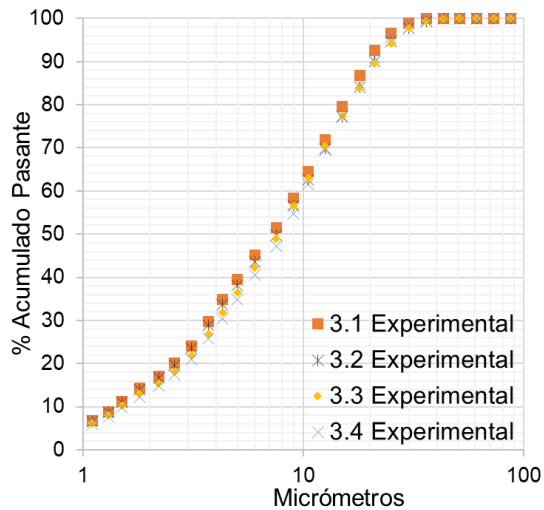


Figura 16. Curva granulométrica a la descarga molino, corrida 3.

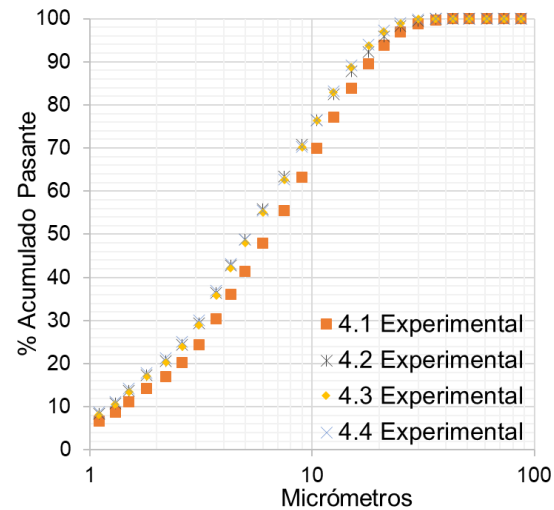


Figura 17. Curva granulométrica a la descarga molino, corrida 4.

3.1. Calibración del modelo de potencia.

Para el cálculo de la potencia se utilizan los modelos de propuesto por Duffy (1995) indicados en la ecuación 3 y 4; y el modelo de Nitta (2006) (ecuación 5), las condiciones operativas y geometría del molino se indican en las tablas 5 y 6. En la Tabla 7 se resume los cálculos de potencia con ambos modelos matemáticos, los cuales tienen valores similares entre ellos, pero una diferencia significativa contra el valor experimental, para ambos modelos se observa que la potencia calculada es casi el 50% del valor determinado experimentalmente.

Tabla 7. Cálculo de la potencia del molino.

Prueba	Modelo Duffy, kW	Modelo Duffy, % error relativo	Modelo Nitta, kW	Modelo Nitta, % error relativo	Valor experimental, kW
1	337.60	-48.66	339.02	-48.45	657.7
2	439.70	-44.01	427.37	-41.69	733.0
3	352.01	-50.69	339.02	-52.51	714.0
4	459.12	-41.52	427.37	-45.56	785.1

3.2. Calibración del modelo de mezclado perfecto.

Para realizar el ajuste del modelo de mezclado perfecto se utilizó la ecuación 17, la en la cual se buscó determinar los valores de los parámetros A , R y D ; a su vez el

parámetro $D \cdot R^{-1}$ se determinó a partir de la ecuación 21 y el valor del parámetro $R \cdot s$ con la ecuación 22. En la Tabla 8 se resumen los valores obtenidos para cada una de las pruebas, a través de un proceso iterativo. Los valores determinados de A y $R \cdot s$ son utilizados para las cuatro muestras de cada una de las pruebas.

Tabla 8. Valores función apariencia y $R \cdot s$ de las corridas experimentales

PRUEBA 1		PRUEBA 2		PRUEBA 3		PRUEBA 4	
A	$R \cdot s$	A	$R \cdot s$	A	$R \cdot s$	A	$R \cdot s$
0.62	0.21	0.62	0.84	0.64	0.19	0.43	0.09
0.00	0.24	0.00	0.22	0.00	0.07	0.00	0.08
0.00	1.33	0.00	1.05	0.00	0.51	0.00	0.57
0.00	2.36	0.00	1.55	0.00	0.97	0.00	1.21
0.00	2.39	0.00	1.94	0.00	1.41	0.00	1.91
0.00	3.52	0.00	2.47	0.00	1.91	0.06	2.80
0.01	3.91	0.01	2.99	0.00	1.98	0.01	2.98
0.01	3.73	0.01	3.26	0.00	1.72	0.01	2.82
0.01	2.66	0.01	2.94	0.02	1.13	0.01	2.31
0.01	1.13	0.01	2.02	0.04	0.15	0.01	1.30
0.05	0.75	0.04	1.68	0.04	0.00	0.03	1.27
0.05	0.06	0.05	0.59	0.03	-0.27	0.03	0.60
0.03	-0.30	0.03	-0.19	0.02	-0.25	0.02	0.13
0.00	-0.21	0.00	-0.37	0.02	-0.05	0.00	-0.06
0.01	-0.43	0.01	-0.56	0.03	0.01	0.01	-0.51
0.04	-0.03	0.04	-0.03	0.03	0.48	0.02	-0.04
0.05	-0.20	0.05	-0.40	0.02	0.17	0.02	-0.50
0.01	0.08	0.01	-0.26	0.02	0.10	0.01	-0.43
0.00	-0.31	0.47	0.75	0.02	-0.27	0.00	-0.84
0.03	-0.86	0.03	-0.70	0.01	-0.51	0.02	-1.18
0.02	-0.32	0.02	1.09	0.00	-0.11	0.02	-0.43
0.00	0.15	0.00	2.13	0.00	0.10	0.00	-0.16
0.00	0.38	0.00	2.82	0.00	0.19	0.00	0.03
0.03	-0.02	0.03	3.24	0.00	-0.07	0.03	-0.35
0.00	-0.20	0.00	3.59	0.00	-0.15	0.09	-0.48
0.00	0.04	0.00	4.27	0.00	-0.05	0.00	-0.06
0.25	0.22	0.25	5.91	0.69	0.81	0.24	0.22

En las Figuras de la 18 a la 21 se observa la correlación entre el porcentaje acumulado pasante experimental y el porcentaje acumulado pasante calculado utilizando los parámetros del modelo de mezclado perfecto, en donde se puede

observar que hay un buen ajuste entre los datos calculados y los datos experimentales, para las 4 pruebas la curva granulométrica ajustada se centra muy bien entre la curva granulométrica experimental.

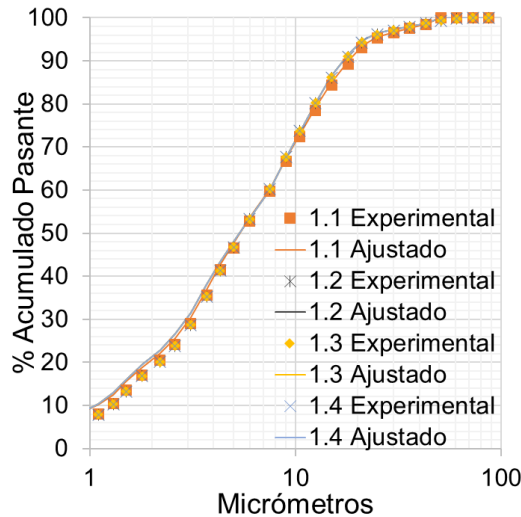


Figura 18. Ajuste de la curva granulométrica calculada y experimental, prueba 1.

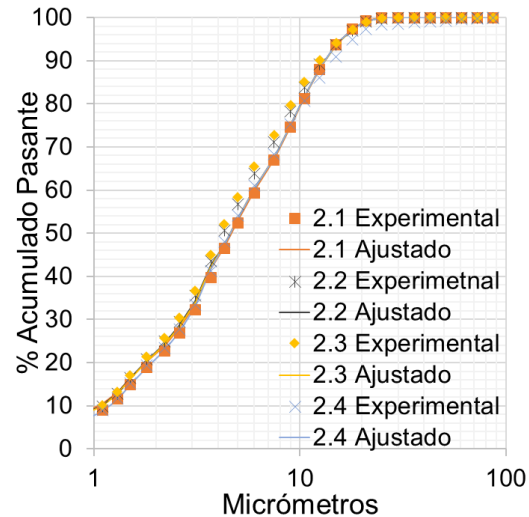


Figura 19. Ajuste de la curva granulométrica calculada y experimental, prueba 2.

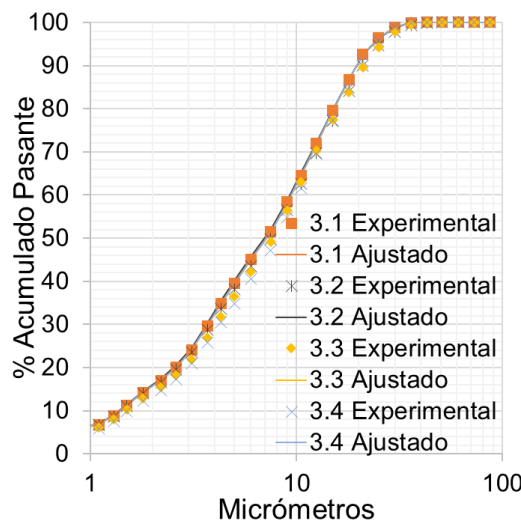


Figura 20. Ajuste de la curva granulométrica calculada y experimental, prueba 3.

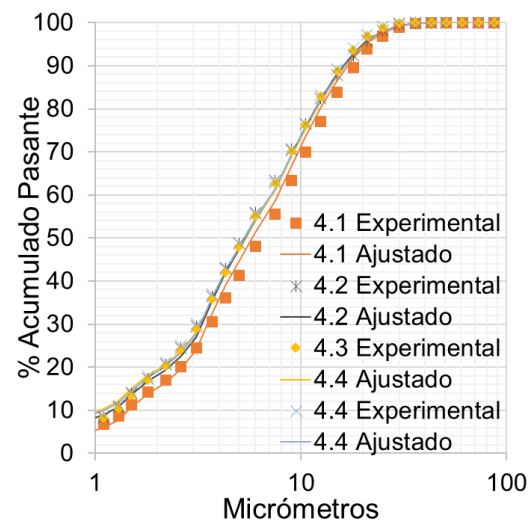


Figura 21. Ajuste de la curva granulométrica calculada y experimental, prueba 4.

En la Tabla 9 se resumen los valores ajustados del P_{80} determinados a partir del modelo de mezclado perfecto. El modelo que presenta una menor diferencia entre

el valor ajustado y experimental es en la prueba 4, el cual tiene un error relativo del 3.03% mientras que el modelo con mayor diferencia corresponde a la prueba 2, con un error relativo del 10.81%, en el caso del modelo de la prueba 1 y 3 presentan un error relativo del 3.94% y 4.79 % respectivamente. En el caso del P_{80} ajustado en la muestra 2.1 se observa que el % de error relativo se incrementa, pero también esta muestra es la que presenta el mayor valor del P_{80} experimental respecto a las demás muestras de la prueba 2, esto se puede atribuir a que la configuración del modelo en Excel está configurada de tal manera que los parámetros A y $R \cdot s$ de una misma prueba satisfacen a las 4 muestras tomadas.

Tabla 9. P_{80} experimental contra el ajustado, modelo mezclado perfecto.

Muestra	P_{80} experimental, micrómetros	P_{80} ajustado, micrómetros	% Error relativo
1.1	13.13	12.85	-2.18%
1.2	12.42	12.50	0.57%
1.3	13.40	12.41	-7.40%
1.4	13.11	12.38	-5.63%
2.1	13.13	10.17	-22.60%
2.2	9.46	10.11	6.87%
2.3	9.07	10.12	11.57%
2.4	10.33	10.11	-2.21%
3.1	15.14	15.11	-0.24%
3.2	16.23	15.06	-7.26%
3.3	16.17	15.22	-5.88%
3.4	16.05	15.13	-5.78%
4.1	13.57	12.73	-6.21%
4.2	11.67	11.76	0.75%
4.3	11.62	11.93	2.61%
4.4	11.53	11.83	2.55%

Los valores ajustados del P_{25} determinados a partir del modelo de mezclado perfecto se muestran en la Tabla 10, el modelo obtenido para la prueba 3 es el que presenta el mejor ajuste al tener el menor error relativo de 5.89%, la prueba 4 es la que tiene mayor diferencia en el ajuste con un error relativo del 10.28%, para el modelo correspondiente a la prueba 1 el error relativo es del 6.75% y para la prueba 2 es de 7.40%. En el caso de las muestras 1.3, 2.1 y 3.4 son las que mayor

porcentaje de error relativo presentan dentro de sus grupos de pruebas, pero son también son las que mayor variación tienen en el P_{25} respecto a sus grupos. Para el caso de la muestra 4.1 no se cumple esta condición, ya que es la que tiene el valor del P_{25} con mayor variación respecto a su grupo de pruebas, pero presenta menor porcentaje de error relativo, esto se puede atribuir a la convergencia del método iterativo, ya que este busca minimizar el error entre las 4 muestras.

Tabla 10. P_{25} experimental contra el ajustado, modelo mezclado perfecto.

Muestra	P_{25} experimental, micrómetros	P_{25} ajustado, micrómetros	% Error relativo
1.1	2.58	2.53	-2.16%
1.2	2.62	2.42	-7.53%
1.3	2.72	2.42	-10.94%
1.4	2.59	2.42	-6.37%
2.1	2.58	2.31	-10.34%
2.2	2.15	2.26	4.84%
2.3	2.10	2.28	8.82%
2.4	2.28	2.41	5.63%
3.1	3.12	3.19	2.27%
3.2	3.21	3.15	-2.04%
3.3	3.46	3.20	-7.54%
3.4	3.62	3.20	-11.72%
4.1	3.07	3.17	3.35%
4.2	2.56	2.96	15.59%
4.3	2.60	2.87	10.55%
4.4	2.50	2.79	11.65%

3.3. Calibración del modelo matricial.

Utilizando el modelo matricial propuesto por Lynch (1977) y descrito en la ecuación 36, se realizó el ajuste de la curva granulométrica a la descarga del molino utilizando la función de rompimiento, dada por la ecuación 32; la función de selección utilizando el modelo de Austin, descrito en la ecuación 31; y la forma de correlacionar el consumo de energía con la ecuación 26. Los parámetros de la se muestran en la Tabla 11. La potencia fue determinada utilizando el modelo de Duffy, ecuación 3 y 4. Las 4 muestras de cada una de las pruebas poseen el mismo valor

de los parámetros de los modelos de la función de rompimiento y función de selección.

Tabla 11. Parámetros de función de rompimiento y selección.

Prueba	Función de rompimiento			Función de selección		
	ϕ	γ	β	A^*	α	Λ
1	0.03	0.24	1.77	1.00	1.18	2.50
2	0.05	0.05	1.56	1.00	1.36	2.50
3	0.01	0.49	2.23	0.92	1.50	2.50
4	0.08	0.00	0.86	0.23	1.50	2.50

En las Figuras de la 22 a la 25 se observa la correlación entre el % acumulado pasante experimental y el porcentaje acumulado pasante ajustado a partir del modelo matricial, función de selección y función de rompimiento. En la Figura 22 se puede observar que los parámetros del modelo de la prueba 1 se ajustan perfectamente a los datos de cada muestra, mostrando una ligera variación en la muestra 1.1, de igual manera en la muestra 2.1 de la prueba 2 se muestra la misma variación en las gráficas (Figura 23).

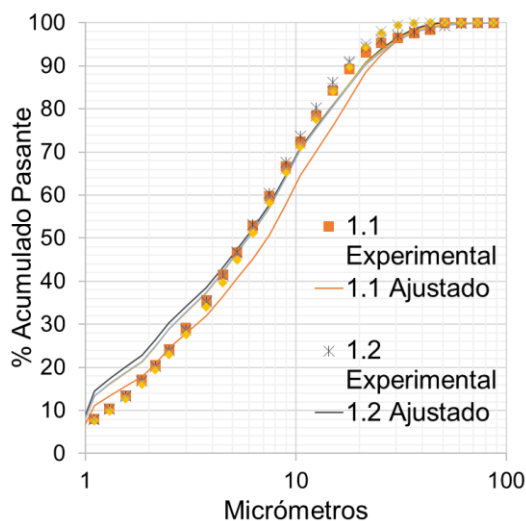


Figura 22. Ajuste de la curva granulométrica calculada y experimental, corrida 1.

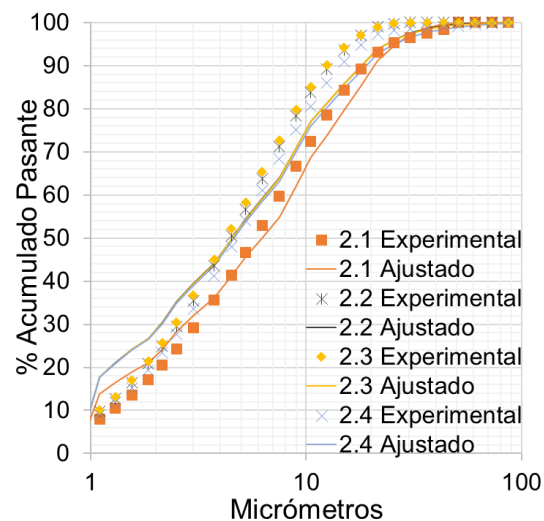


Figura 23. Ajuste de la curva granulométrica calculada y experimental, corrida 2.

El ajuste para del modelo para las pruebas 3 y 4 se muestran en las Figuras 24 y 25, puede observar que los datos experimentales y ajustados se encuentran alineados en las dos pruebas.

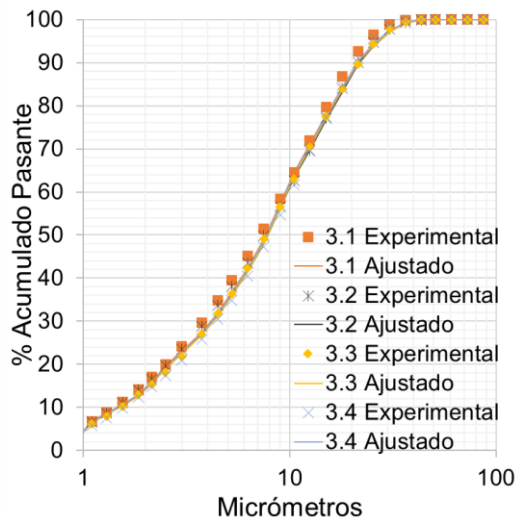


Figura 24. Ajuste de la curva granulométrica calculada y experimental, 3.

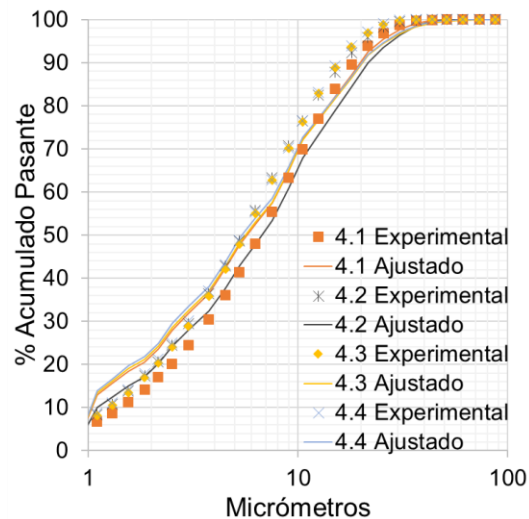


Figura 25. Ajuste de la curva granulométrica calculada y experimental, corrida 4.

En la Tabla 12 se resumen los valores determinados del P_{80} , los cuales fueron determinados a partir del ajuste de los parámetros del modelo matemático; el modelo que tiene el menor error corresponde al modelo de la prueba 3 con un error relativo del 4.01%, los modelos de las pruebas 2 y 4 presentan un error relativo del 9.89% y 10.19%, y el modelo de la prueba 1 presenta el mayor error relativo con 13.12%. El porcentaje error relativo de la muestra 2.1 es el valor más alto, pero de la misma manera el P_{80} experimental dentro de la prueba 2 es el que mayor diferencia presenta; y para el caso de las muestras 1.1 y 4.2 el error se puede atribuir a la convergencia del proceso iterativo para minimizar el error entre los datos experimentales y ajustados.

Tabla 12. P_{80} experimental contra el ajustado, modelo matricial.

Muestra	P_{80} experimental, micrómetros	P_{80} ajustado, micrómetros	% Error relativo
1.1	13.14	16.37	24.58%
1.2	12.43	14.07	13.20%
1.3	13.40	14.18	5.82%
1.4	13.12	14.28	8.91%
2.1	13.14	16.45	25.19%
2.2	9.46	9.28	-1.92%
2.3	9.07	9.26	2.14%
2.4	10.34	9.27	-10.33%
3.1	15.14	17.30	14.27%
3.2	16.24	16.22	-0.12%
3.3	16.17	16.35	1.09%
3.4	16.05	16.15	0.57%
4.1	13.57	15.01	10.57%
4.2	11.67	13.91	19.20%
4.3	11.63	11.03	-5.14%
4.4	11.54	10.86	-5.87%

En el ajuste entre los datos experimentales y ajustados para el P_{25} se muestra en la Tabla 13; el error relativo para el modelo de las pruebas 1 es de 14.93%, prueba 2 con 21.34%, prueba 3 de 4.51% y la prueba 4 con 14.09% de error relativo. El modelo que presenta el mejor ajuste es el correspondiente a la prueba 3, al presentar el menor valor de error relativo en el ajuste del P_{80} y P_{25} .

Tabla 13. P_{25} experimental contra el ajustado, modelo matricial.

Muestra	P_{25} experimental, micrómetros	P_{25} ajustado, micrómetros	%Error Relativo
1.1	2.58	2.56	-0.90%
1.2	2.62	2.04	-22.18%
1.3	2.72	2.17	-20.21%
1.4	2.59	2.16	-16.47%
2.1	2.58	2.22	-13.96%
2.2	2.15	1.65	-23.48%
2.3	2.10	1.66	-21.10%
2.4	2.28	1.67	-26.85%
3.1	3.12	3.26	4.50%
3.2	3.21	3.43	6.74%
3.3	3.46	3.45	-0.45%
3.4	3.62	3.39	-6.35%
4.1	3.07	2.26	-26.19%
4.2	2.56	2.60	1.75%
4.3	2.60	2.21	-14.74%
4.4	2.50	2.16	-13.70%

3.4. Calibración del modelo de Charles.

A partir del modelo de Charles (Gao & Forssberg, 1995) que se muestra en la ecuación 8 se realiza la predicción de la curva granulométrica a la descarga del molino. Para determinar los parámetros del A y R del modelo, se realiza la correlación del tamaño de partícula para cada porcentaje acumulado pasante en función de la energía específica consumida, los valores se registran en la Tabla 14. Se utilizan los siguientes valores del porcentaje acumulado pasante: 10%, 16%, 50%, 84%, 90% ya que son los registrados por el analizador de tamaño de partícula en Minera Saucito.

Tabla 14. Tamaño característico de partículas para diferentes porcentajes de masa y consumo de energía específica.

% Acumulado Pasante	Prueba 3 18.41 kW/t	Prueba 1 22.03 kW/t	Prueba 4 24.00 kW/t	Prueba 2 28.7 kW/t
10	1.49	1.28	1.28	1.14
16	2.17	1.79	1.81	1.56
50	7.63	5.86	5.75	4.60
84	17.63	14.65	13.53	10.96
90	21.05	17.95	16.50	13.34

En la Figura 26 se observa que el tamaño de partícula a los diferentes valores del porcentaje acumulado pasante se reduce al incrementar el consumo de energía específico, los valores de potencia fueron determinados con la ecuación de Duffy mostrados en la Tabla 7.

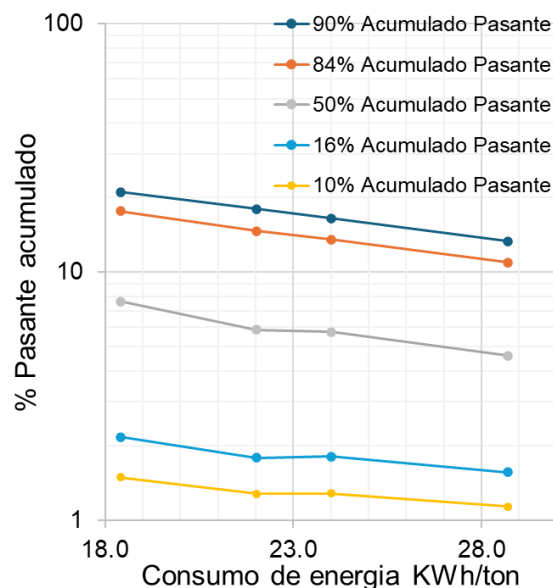


Figura 26. Tamaño característico de partículas para diferentes porcentajes de masa y consumo de energía.

En las Figuras 27 a la 30 se muestra el ajuste de la curva granulométrica a partir de los parámetros A y R obtenidos para cada porcentaje acumulado pasante, Tabla 15, para las cuatro corridas experimentales se observa un buen ajuste

entre los datos experimentales y los ajustados, con valores muy similares entre los datos.

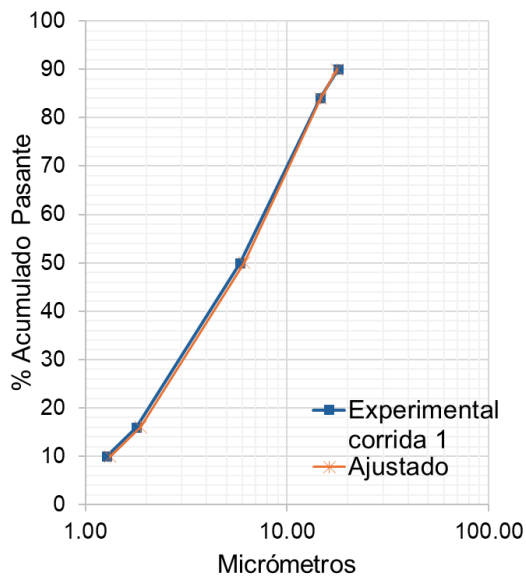


Figura 27. Ajuste de la curva granulométrica calculada vs la experimental, corrida experimental 1

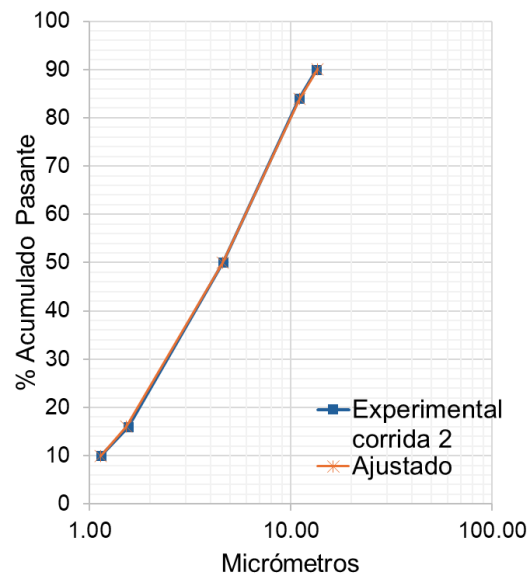


Figura 28. Ajuste de la curva granulométrica calculada vs la experimental, corrida experimental 2

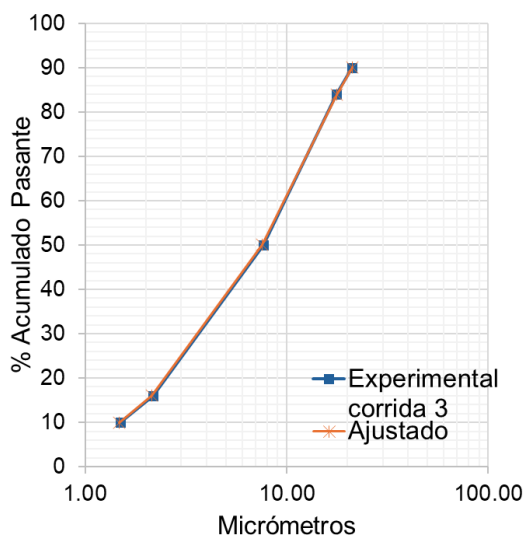


Figura 29. Ajuste de la curva granulométrica calculada vs la experimental, corrida experimental 3

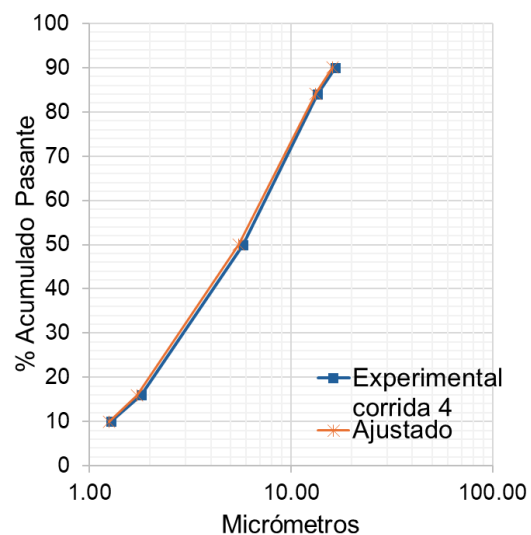


Figura 30. Ajuste de la curva granulométrica calculada vs la experimental, corrida experimental 4

Tabla 15. Valores de parámetros A y R .

Parámetro	10% Acumulado Pasante	16% Acumulado Pasante	50% Acumulado Pasante	84% Acumulado Pasante	90% Acumulado Pasante
A	8.33	17.48	201.59	380.86	391.46
R	0.59	0.72	1.13	1.05	1.00

En la Tabla 16 y 17 se resume la predicción del P_{80} y P_{25} respectivamente, en ambos casos se observa un buen ajuste entre los valores experimentales y los valores determinados con el modelo de potencia, para el P_{80} ajustado, la prueba que tiene el mayor error relativo corresponde a la prueba 1, con un error relativo del 4.72%, mientras que la prueba 4 es la que presenta el menor error relativo, 1.42%.

Tabla 16. Valores de P_{80} ajustado.

Muestra	P_{80} experimental, micrómetros	P_{80} ajustado modelo potencia, micrómetros	% Error Relativo
Prueba 1	13.0	13.6	4.72%
Prueba 2	10.5	10.3	-2.23%
Prueba 3	15.9	16.5	3.68%
Prueba 4	12.1	12.3	1.42%

En la determinación del P_{25} se observa el mismo comportamiento para la prueba 1 y 4, siendo la prueba 4 la que presenta el menor error relativo, 1.79%; mientras que la prueba 1 tiene el mayor error relativo, 14.36%.

Tabla 17. Valores de P_{25} ajustado.

Muestra	P_{25} experimental, micrómetros	P_{25} ajustado modelo potencia, micrómetros	% Error Relativo
Prueba 1	2.6	3.0	14.36%
Prueba 2	2.3	2.3	2.01%
Prueba 3	3.4	3.6	6.18%
Prueba 4	2.7	2.7	1.79%

El modelo de Charles permite realizar una buena aproximación de los valores del P_{80} y P_{25} , siendo casi en su totalidad una predicción arriba del valor experimental con un error de +0.6 micrómetros, y el modelo que da el mejor ajuste a los datos experimentales corresponde a la prueba 4.

3.5. Simulación de la curva granulométrica a la descarga del molino utilizando el modelo de mezclado perfecto a diferentes condiciones de muestreo.

A fin de validar el modelo matemático y con los datos obtenidos de la función de apariencia y los parámetros $R \cdot s$ se realiza una predicción de la curva granulométrica entre las corridas experimentales 1 y 3 así como también de la 2 y 4, ya que entre ellas la velocidad y nivel de bola estuvo en las mismas condiciones operativas y solo se hizo la variación del porcentaje de sólidos (Figuras 31 a 34).

En la Figura 31 se observa que la curva granulométrica experimental de la prueba 3 y la simulación a partir del modelo matemático obtenido en la prueba 1 se ajusta de manera correcta en los extremos superior e inferior de la gráfica, pero tiende a alejarse en la parte central de la gráfica, realizando una predicción menor a los datos experimentales; en la Figura 32 se muestra la curva granulométrica de la prueba 1 y la simulación obtenida a partir del modelo de la prueba 3, la curva granulométrica obtenida por este modelo está ligeramente sesgada a la derecha, lo que resulta en una predicción de valores de P_{80} ligeramente mayores.

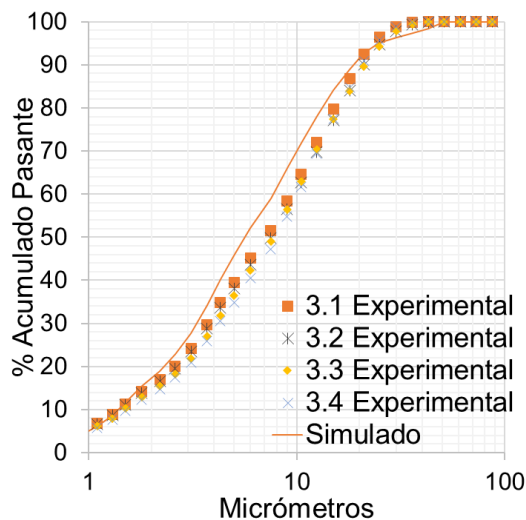


Figura 31. Simulación con modelo experimental 1, ajustado a condiciones de la corrida experimental 3

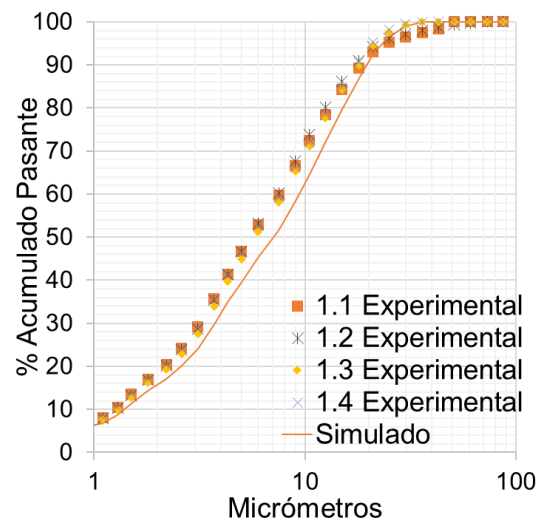


Figura 32. Simulación con modelo experimental 3, ajustado a condiciones de la corrida experimental 1.

En la Figura 33, la simulación realizada de la curva granulométrica de la prueba 4 a partir del modelo obtenido en la prueba 2 se observó que se encuentra ligeramente sesgada a la derecha por lo que los valores de simulación tenderán a ser mayores que los datos experimentales. La Figura 34 muestra la curva granulométrica experimental de la prueba 2 y la simulación de la curva granulométrica a partir del modelo obtenido en la prueba 4, en este caso la simulación predice valores ligeramente menores en el tamaño de partícula al estar sesgada a la izquierda.

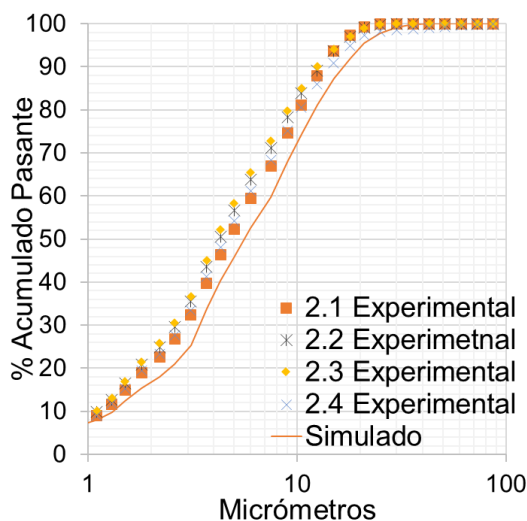


Figura 33. Simulación con modelo experimental 4, ajustado a condiciones de la corrida experimental 2.

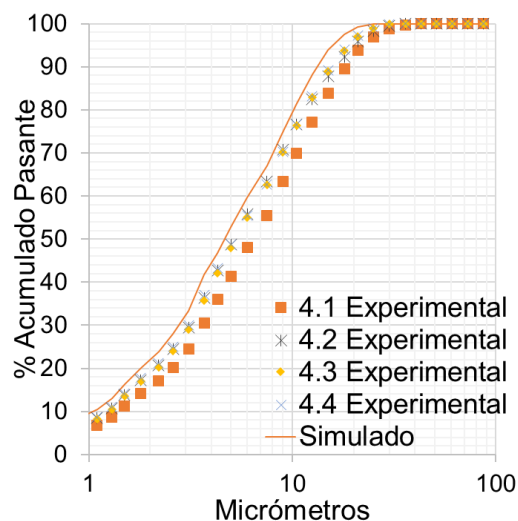


Figura 34 Simulación con modelo experimental 2, ajustado a condiciones de la corrida experimental 4.

En la Tabla 18 y 19 se muestran los valores del P_{80} y P_{25} obtenidos experimentalmente y se comparan con las predicciones obtenidos con los modelos matemáticos, el error del P_{80} entre los datos experimentales tiene un rango de 2.61 y -2.1 micrómetros, 16% de error relativo; en el caso del P_{25} el error oscila entre el rango de 0.7 a -0.5 micrómetros, equivalente al 20% de error relativo.

Tabla 18. Predicción del P_{80} utilizando los diferentes parámetros $R \cdot s$ y función de apariencia.

Muestra	Modelo corrida experimental 1		Modelo corrida experimental 2		Modelo corrida experimental 3		Modelo corrida experimental 4	
	P_{80} experimental, micrómetros	P_{80} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)	P_{80} experimental, micrómetros	P_{80} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)	P_{80} experimental, micrómetros	P_{80} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)	P_{80} experimental, micrómetros	P_{80} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)
Corrida 1	13.0		13.0		13.0	15.1/(16%)	13.0	
Corrida 2	10.5		10.5		10.5		10.5	12.16/(16%)
Corrida 3	15.9	13.29/(-16%)	15.9		15.9		15.9	
Corrida 4	12.1		12.1	10.17/(-16%)	12.1		12.1	

Tabla 19. Predicción del P_{25} utilizando los diferentes parámetros $R \cdot s$ y función de apariencia.

Muestra	Modelo corrida experimental 1		Modelo corrida experimental 2		Modelo corrida experimental 3		Modelo corrida experimental 4	
	P_{25} experimental, micrómetros	P_{25} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)	P_{25} experimental, micrómetros	P_{25} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)	P_{25} experimental, micrómetros	P_{25} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)	P_{25} experimental, micrómetros	P_{25} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)
Corrida 1	2.6		2.6		2.6	3.1/(18%)	2.6	
Corrida 2	2.3		2.3		2.3		2.3	2.9/(30%)
Corrida 3	3.4	2.7/(-18%)	3.4		3.4		3.4	
Corrida 4	2.7		2.7	2.3/(-16%)	2.7		2.7	

A pesar de obtener buen ajuste en cada una de las corridas experimentales, solo es posible predecir la curva granulométrica a la descarga del molino realizando incrementos o decrementos en el tonelaje, pero manteniendo las mismas condiciones de velocidad y nivel de bola, ya que el modelo actual no incorpora estas variables.

3.6. Simulación de la curva granulométrica a la descarga del molino utilizando el modelo matricial a diferentes condiciones de muestreo.

Utilizando los parámetros de los modelos calculados para la función de selección y rompimiento de cada corrida experimental, que se muestra en la Tabla 10, se realizó la predicción de la curva granulométrica a la descarga del molino a las diferentes condiciones del muestreo. En la Figura 35 se observa la curva granulométrica simulada a partir del modelo obtenido en la prueba experimental 1 el cual fue ajustado a las condiciones experimentales de las pruebas experimentales 2, 3, 4.

Se observó que la simulación tiene un buen ajuste con los datos experimentales, mostrando una ligera variación en valores en el extremo superior de la gráfica lo que producirá estimación de valores de P_{80} moderadamente mayores a los valores experimentales.

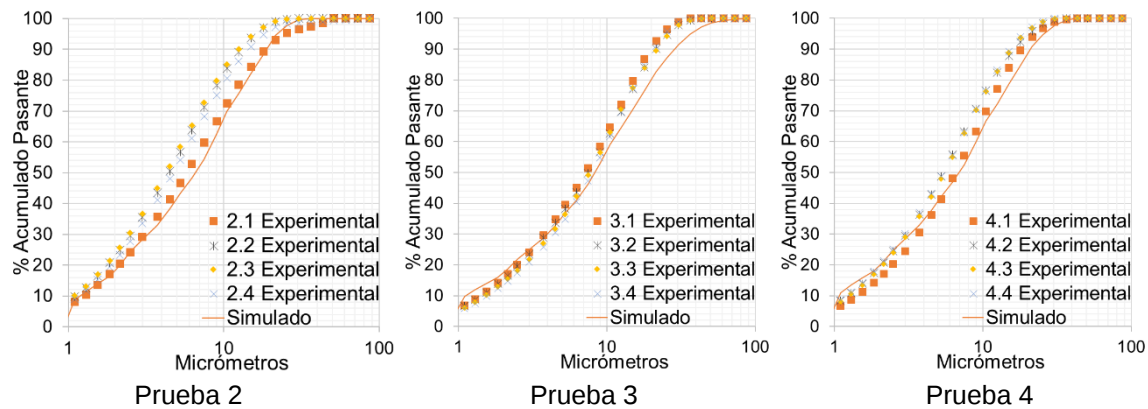


Figura 35. Simulación con modelo experimental 1, ajustado a condiciones de las pruebas experimentales 2, 3 y 4.

En la Figura 36 se muestra la curva granulométrica experimental y simulada a la descarga el molino en las pruebas 1, 3 y 4 utilizando el modelo matemático generado en la corrida experimental 2; este modelo presentó gráficamente más variación en la estimación del P_{80} y P_{25} al sobreestimar los valores del P_{80} y realizar una predicción de valores menores del P_{25} .

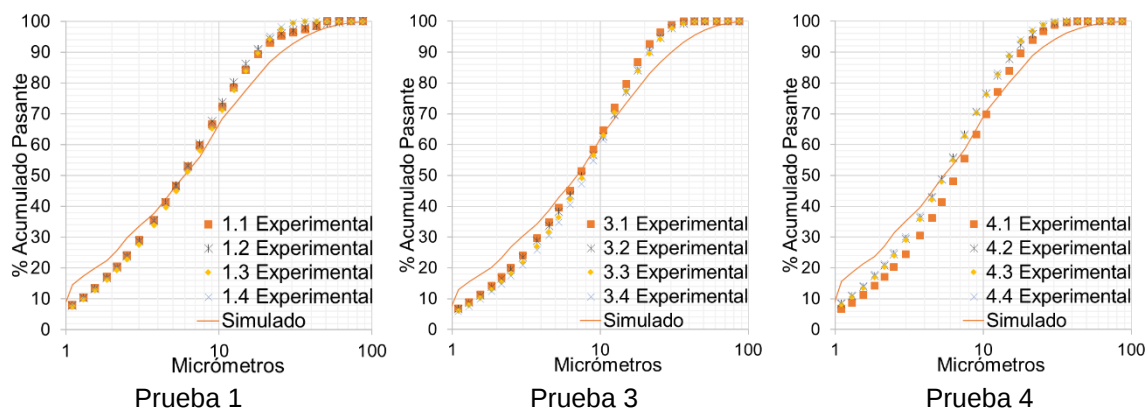


Figura 36. Simulación con modelo experimental 2, ajustado a condiciones de la corrida experimental 1, 3 y 4.

La Figura 37 corresponde a la curva granulométrica experimental y simulada a la descarga el molino de las pruebas 1, 2 y 4 a partir del modelo matemático obtenido en la prueba 3, se observó que este modelo está ligeramente sesgado a la derecha

por lo que la predicción de los datos pudiera estimar valores ligeramente mayores a los experimentales, principalmente en la parte baja de la curva granulométrica.

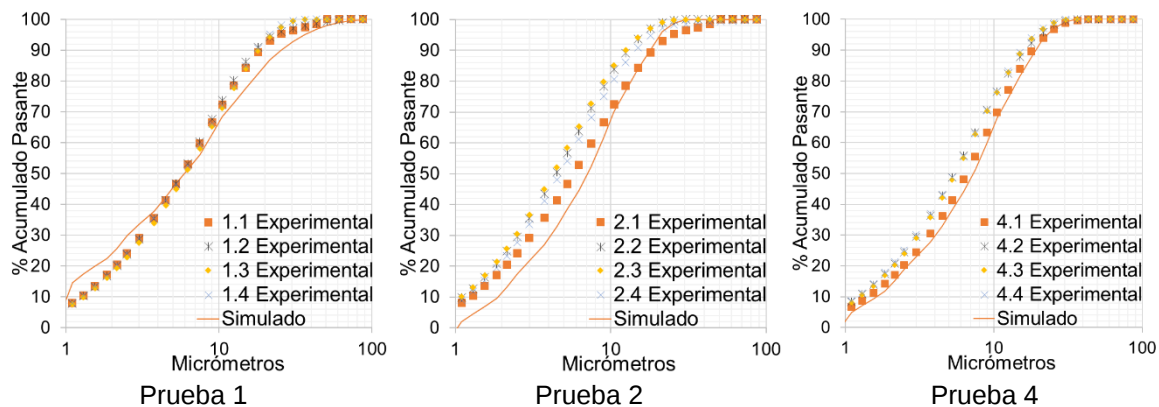


Figura 37. Simulación con modelo experimental 3, ajustado a condiciones de la corrida experimental 1, 2 y 4.

La simulación a partir del modelo obtenido en la prueba 4 se muestra en la Figura 38, donde se puede apreciar que la curva granulométrica experimental y simulada a la descarga el molino de las pruebas 1, 2 y 4 son muy similares unas de otras.

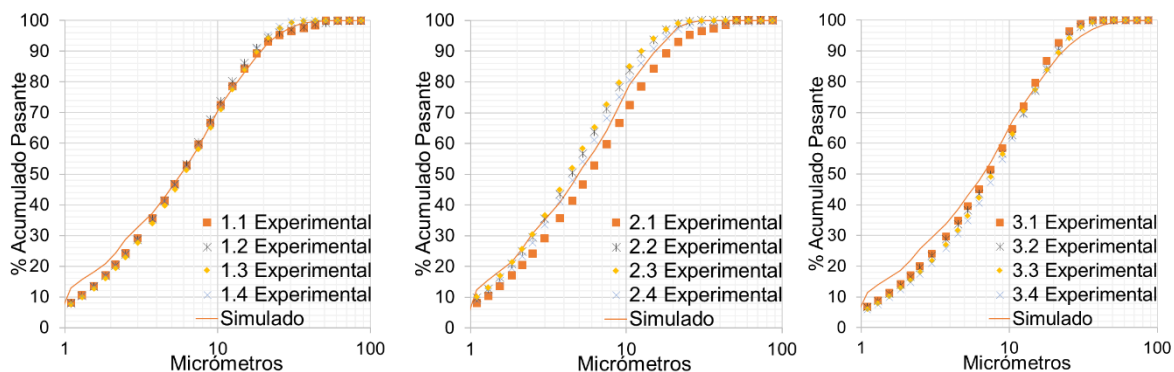


Figura 38. Simulación con modelo experimental 4, ajustado a condiciones de la corrida experimental 1, 2 y 3.

En la Tabla 20 se muestran los valores experimentales simulados y experimentales del P_{80} , se observó que para todos los casos los modelos matemáticos obtenidos sobreestiman el valor del P_{80} , el modelo experimental obtenido en la prueba 4 es el que mejor ajuste presenta entre los datos experimentales y simulados, al tener un error absoluto de 0.48 micrómetros y un error relativo del 2.33%, mientras que el modelo que mayor error presenta es el obtenido en la prueba experimental 1 con un error relativo del 27.33% con diferencias de hasta 4.1 micrómetros.

Tabla 20. Predicción del P_{80} utilizando los diferentes parámetros de los modelos de la función de selección y rompimiento.

Muestra	Modelo corrida experimental 1		Modelo corrida experimental 2		Modelo corrida experimental 3		Modelo corrida experimental 4	
	P_{80} experimental, micrómetros	P_{80} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)	P_{80} experimental, micrómetros	P_{80} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)	P_{80} experimental, micrómetros	P_{80} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)	P_{80} experimental, micrómetros	P_{80} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)
Corrida 1	13.0		13.0	16.4/(25%)	13.0	14.86/(14%)	13.0	13.48/(4%)
Corrida 2	10.5	13.6/(29%)	10.5		10.5	13.11/(24%)	10.5	10.8/(3%)
Corrida 3	15.9	20.0/(25%)	15.9	19.3/(21%)	15.9		15.9	16.01/(0%)
Corrida 4	12.1	15.6/(28%)	12.1	14.9/(23%)	12.1	14.47/(20%)	12.1	

En la Tabla 21 se muestran los valores experimentales simulados del P_{25} . Se observó que los modelos obtenidos en las pruebas 1, 2 y 3 tienen la tendencia a simular valores del P_{25} menores a los valores experimentales, mientras que el modelo correspondiente a la prueba 3 sobreestima el valor del P_{25} ; siendo el modelo 1 el que menor error tiene con un error relativo del 10.66% y el modelo 3 con un porcentaje de error relativo del 33.33%, para el modelo 2 y 4 el error es del 25% y 17% respectivamente.

Tabla 21. Predicción del P_{25} utilizando los diferentes parámetros de los modelos de la función de selección y rompimiento.

Muestra	Modelo corrida experimental 1		Modelo corrida experimental 2		Modelo corrida experimental 3		Modelo corrida experimental 4	
	P_{25} experimental, micrómetros	P_{25} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)	P_{25} experimental, micrómetros	P_{25} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)	P_{25} experimental, micrómetros	P_{25} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)	P_{25} experimental, micrómetros	P_{25} ajustado, micrómetros / (%Error Relativo)
Corrida 1	2.6		2.6	2.1/(-20%)	2.6	3.3/(25%)	2.6	2.2/(-16%)
Corrida 2	2.3	2.6/(14%)	2.3		2.3	3.5/(53%)	2.3	2.1/(-7%)
Corrida 3	3.4	3.0/(-11%)	3.4	2.3/(-31%)	3.4		3.4	2.4/(-28%)
Corrida 4	2.7	2.5/(-7%)	2.7	2.0/(-25%)	2.7	3.3/(23%)	2.7	

3.7. Modelo integrado de molino HIGMILL®.

Con los resultados obtenidos de los diferentes modelos se determinó una combinación de diferentes modelos para simular el molino vertical HIGMILL® instalado en la unidad Minera Saucito. La primera opción es el modelo de Charles, y como segunda opción es aplicar el modelo matricial correspondiente a la prueba 4, para ambos modelos la potencia será calculada con el modelo de Duffy, el flujo de la simulación se muestra en la Figura 39.

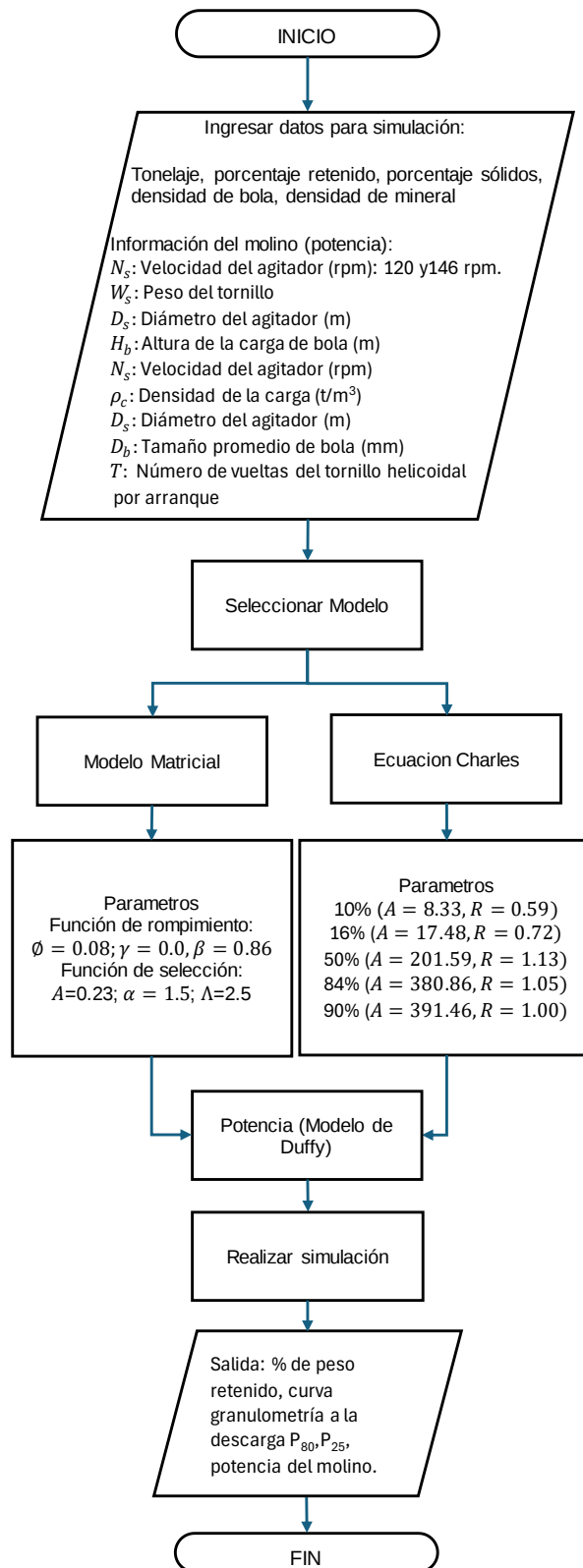


Figura 39. Diagrama de flujo de simulación.

La evaluación de para ambos modelos se realizaron simulaciones en condiciones operativas diferentes a las que fueron calibrados los modelos, las condiciones a simular se resumen en la Tabla 22.

Tabla 22. Condiciones de operativas para la simulación.

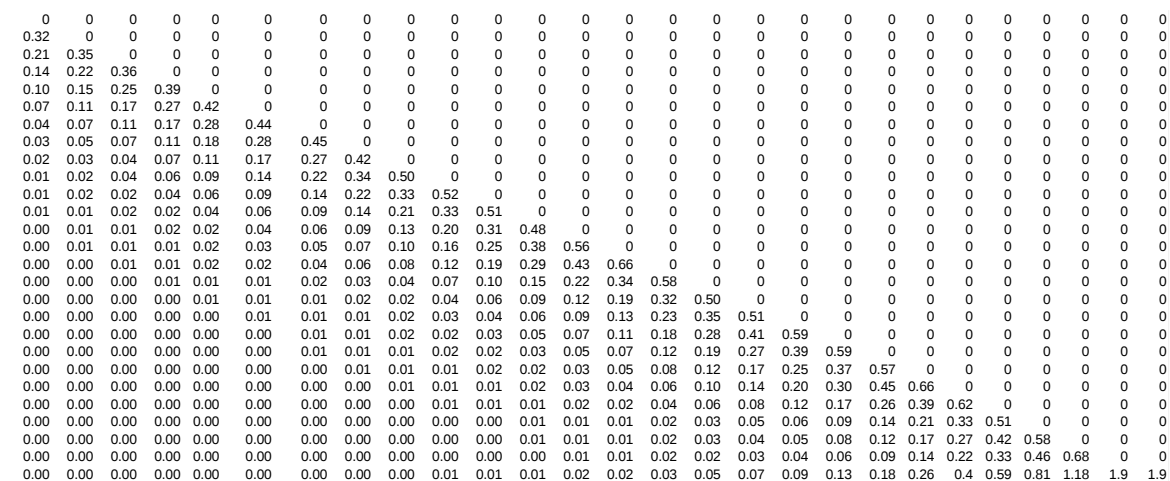
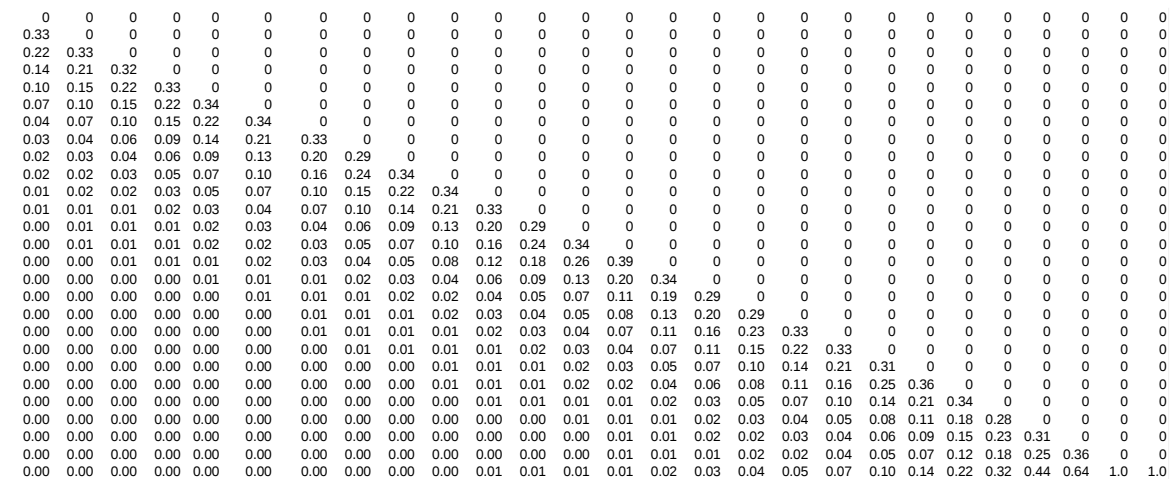
Variable	Valor
Sólidos, %	38
Gravedad específica mineral	3.6
Densidad Pulpa, t/m^3	1.38
Flujo volumétrico pulpa, m^3/h	34
Flujo másico pulpa, t/h	46.86
Mineral, t/h	17.81
Velocidad molino, m/s	8.2

En la Figura 44 se muestra la plantilla realizada en Excel para realizar la simulación de la curva granulométrica a la descarga del molino, la secuencia de pasos para realizar a cabo la simulación con el modelo matricial son:

- Paso 1. Ingresar el peso retenido a la alimentación del molino.
- Paso 2. Ingresar los datos obtenidos para la función de selección y la función de rompimiento de la prueba 4, indicados en la Tabla 11.
- Paso 3. Ingresar los datos de las condiciones operativas, Tabla 22.

Para realizar la simulación del modelo de matrices, descrito en la ecuación 36; la plantilla que se realizó en Excel realiza 4 etapas principales para la resolución del modelo matemático:

- Etapa 1. Calcular la potencia del molino, ecuación 4.
- Etapa 2. Calcular la función de selección específica utilizando la ecuación 26 (Figura 40).
- Etapa 3. Calcular la matriz de la función de rompimiento (Figura 41).
- Etapa 4. Resolver la ecuación del modelo matricial, ecuación 36; en la Figura 42 y 43 se muestra el cálculo de los términos $B * S$ y $I - S$ respectivamente, y ambos forman parte de la resolución de la ecuación anterior.

[illegible]

[illegible]

En la Figura 44 se muestran los resultados que se obtuvieron de la simulación a las condiciones operativas indicadas en la Tabla 22 para el modelo de matricial, los valores simulados corresponden al porcentaje de peso acumulado retenido y el porcentaje retenido para cada una de las mallas, en la parte inferior se muestra el consumo de energía y el cálculo del valor del P_{80} y P_{25} .

Figura 44. Simulación aplicando el modelo matricial (Lynch,1977).

La simulación realizada a partir del modelo de potencia fue necesario ingresar de manera secuencial siguiente información:

- Paso 1. Ingresar los valores obtenidos de los parámetros A y R , indicados en la Tabla 13.
- Paso 2. Ingresar los datos de las condiciones operativas, Tabla 20.

Posteriormente se realizó la resolución del modelo matemático de Charles, descrito en la ecuación 8, para este caso se realiza el cálculo del porcentaje acumulado pasante del 10%, 16%, 50%, 84% y 90% (Figura 45); de manera similar de muestra en la parte inferior de la plantilla el cálculo de potencia, P_{80} y P_{25} :

	10% Acumulado Pasante	16% Acumulado Pasante	50% Acumulado Pasante	84% Acumulado Pasante	90% Acumulado Pasante
A	8.33	17.48	201.59	380.86	391.46
R	0.59	0.72	1.13	1.05	1.00

Simulado Modelo Charles					
Acumulado Pasante	10	16	50	84	90
Tamaño, micrometros	1.27706579	1.79396724	5.74157577	13.7248895	16.6871467

% sólidos	38	%
G. E.	3.6	t/m ³
Densidad Pulpa	1.38	t/m ³

Flujo volumetrico pulpa	34	m ³ /h
Flujo másico pulpa	46.86	t/m ³
Mineral	17.81	t/m ³
Velocidad	8.2	

Energía	416.91684	kW
Energía específica	23.413	kW/t

Xa (%)	Xb (%)	Ya (micras)	Yb (micras)	X (%)	Y (mm)
50.00	84.00	6	14	80.00	12.7857

Xa (%)	Xb (%)	Ya (micras)	Yb (micras)	X (%)	Y (mm)
16.00	50.00	2	6	25.00	2.8389

Figura 45. Simulación aplicando el modelo Charles (Gao & Forssberg, 1995).

En la Figura 46 se compara la curva granulométrica a la descarga del molino de los dos modelos matemáticos, en el caso del modelo de Charles solo se puede realizar la predicción del 10% al 90% acumulado pasante.

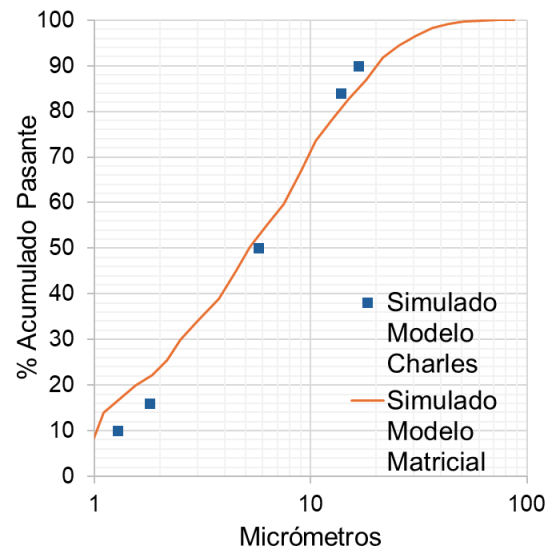


Figura 46. Comparativa curva granulométrica, Modelo de Charles y Modelo Matricial.

Finalmente, en la Tabla 23 se resume el valor del P_{80} y P_{25} determinado por cada modelo, los cuales son muy aproximados entre sí.

Tabla 23. Predicción de P_{80} y P_{25}

Modelo matemático	P_{80} , micrómetros	P_{25} , micrómetros
Modelo Matricial	13.58	2.11
Ecuación de Charles	12.78	2.83

A partir de los resultados obtenidos se observó que ambos modelos matemáticos son robustos en el sentido de que incorporan dentro de sus estructuras las variables operativas clave, de fácil control y manipulación en la operación molino vertical, y los resultados de la simulación utilizando las condiciones de la Tabla 22, los valores obtenidos son cercanos para ambos modelos: la ecuación de Charles (Gao & Forssberg, 1995) predice un valores del P_{80} de 0.8 micrómetros por debajo del modelo matricial (Lynch, 1977) mientras que en los valores de P_{25} tiende a predecir 0.72 micrómetros arriba.

Cabe mencionar que los errores relativos obtenidos para durante la calibración del modelo Charles (Gao & Forssberg, 1995) estuvieron en el rango de 1.4% a 4.7% en el ajuste del P_{80} y de 1.7 a 14.3% para el P_{25} , mientras los errores relativos durante el ajuste del modelo matricial (Lynch, 1977) presentó un error relativo del 10.19% en el ajuste del P_{80} y de 14.09% al ajustarse al P_{25} ; pero al realizar la simulación de

la operación del molino y compararlo contra datos reales se observó determinó un error relativo del 2.33% en la predicción del P_{80} y un error relativo del 17.0% en la predicción del P_{25} .

Una de las principales desventajas de la ecuación de Charles radica en que una vez obtenido y ajustado el modelo matemático, no es posible realizar simulaciones con nuevas curvas granulométricas de alimentación al molino; queda definido por la curva granulométrica en la que fue realizado el modelo; caso contrario para el modelo matricial si es posible realizar simulación si existe un cambio en la curva granulométrica de alimentación al molino; otra desventaja del modelo radica en la forma de mostrar la información, ya que solo puede mostrar los valores del tamaño de partícula a los valores del % acumulado pasante al que fue realizado, en este caso fue a los valores de 10%, 16%, 50%, 84% y 90% y no toda la curva granulométrica como el modelo matricial (Lynch, 1977); de esta manera se opta por definir como modelo matemático para el molino vertical HIGMILL® el modelo de matrices.

CONCLUSIONES

El modelo matricial propuesto por Lynch (1977) en conjunto con los modelos de función de selección y rompimiento, pueden ser utilizados para realizar la predicción de la curva granulométrica a la descarga de un molino vertical HIGMILL® a nivel industrial, con un error absoluto de 0.61 a 1.7 micrómetros en el ajuste del P_{80} y del 0.15 a 0.48 micrómetros al ajustar el P_{25} , siendo este el modelo seleccionado para el molino vertical HIGMILL®.

El modelo de Charles (Gao & Forssberg, 1995) puede ser utilizado para realizar la predicción de la curva granulométrica a la descarga del molino vertical a nivel industrial, con un error absoluto de 0.2 a 0.6 micrómetros en el ajuste del P_{80} y del 0.0 a 0.4 micrómetros al ajustar el P_{25} , una de las desventajas de este modelo es que no se pueden realizar simulaciones modificando la granulometría de alimentación al molino.

El modelo matemático de mezclado perfecto puede ser utilizado para realizar la predicción de la curva granulométrica a la descarga de un molino vertical HIGMILL® a nivel industrial, con un error absoluto de 0.38 a 1.2 micrómetros en el ajuste del P_{80} y del 0.17 a 0.27 micrómetros al ajustar el P_{25} . La principal desventaja de este modelo es que no se pueden realizar simulaciones en el cambio de nivel de bola y velocidad del molino, ya que no se incorporan dentro de este.

Se logró validar que los modelos matemáticos de mezclado perfecto, modelo matricial (Lynch, 1977) y la ecuación de potencia de Charles (Gao & Forssberg, 1995) pueden ser utilizados para realizar predicciones en la curva granulométrica a la descarga del molino vertical ajustando cualquiera de las variables operativas. En ambos casos rango de aplicación de los modelos matemáticos queda delimitado por los valores máximos y mínimos en que fueron desarrollados: velocidad del rotor de 7.0 y 8.8 m/s y porcentaje de sólidos de 30% y 40%.

Las mejores condiciones operativas, de acuerdo con el modelo de Charles (Gao & Forssberg, 1995) son maximizar el consumo de energía específica E (kWh/t), maximizando velocidad (8.8 m/s) y nivel de bola (7 t).

Fue posible determinar la potencia del molino a partir de los modelos de potencia propuesto por Duffy (1995) y Nitta (2006), siendo el más confiable el modelo de Duffy (1995) ya que incorpora dentro de las variables independientes la densidad de la carga, la cual está dada por el % de sólidos de alimentación al molino, mientras que el modelo de Nitta (1995) dentro de sus variables independientes solo incluye las dimensiones del molino, para ambos casos la predicción de potencia ronda el 50% de valor medido durante las pruebas.

Se generó una plantilla en Excel con los modelos matemáticos de mezclado perfecto y modelo matricial exclusivamente para el molino vertical de Minera Saucito, el modelo permitirá predecir escenarios posibles de simulación en el tamaño del producto de descarga del molino ajustando las variables operativas.

REFERENCIAS

- Bond, F. (1952). The third theory of comminution. Transactions of AIME. Mining Engineering.
- Coulson, J., Richardson, J., & Backhurst, J. (2020). Ingeniería química. Operaciones básicas Tomo II Vol.2. Reverte.
- Duffy, M. (1995). Investigation into the performance characteristics of tower mills.
- Epstein, B. (1947). The mathematical description of certain breakage mechanisms leading to the logarithmico-normal distribution. Journal of the Franklin Institute.
- Gao, M., & Forssberg, E. (1995). Prediction of product size distributions for a stirred ball mill. Powder Technology. doi:[https://doi.org/10.1016/0032-5910\(95\)02990-J](https://doi.org/10.1016/0032-5910(95)02990-J).
- Giyani, B., Klein, B., & Rahal, D. (n.d.). Analysis of variables governing the operation of a vertical stirred mill.
- Gupta, A., & Yan, D. (Eds.). (2016). Mineral Processing Design and Operations An Introduction (Segunda Edición ed.). Elsevier. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63589-1.00011-3>.
- Gupta, A., & Yan, D. (2016). Stirred Mills – Ultrafine Grinding. Mineral Processing Design and Operations, 287-316. doi:<https://doi.org/10.1016/B978-0-444-63589-1.00010-1>.
- Hasan, M. (2016). Process Modelling of Gravity Induced Stirred Mills. Tesis doctoral, University of Queensland.
- Hasan, M., Palaniandy, S., Marko, H., & Powell, M. (2018). Simulating product size distribution of an industrial scale VertiMill® using a time-based population balance model. pp. Pages 312-317.
- Heath, A., Keikkala, V., Paz, A., & Lehto, H. (2017). A power model for fine grinding HIGmills with castellated rotors. Minerals Engineering.
- Herbst, J., & Fuerstenau, D. (1973). Mathematical simulation of dry ball milling using specific power information.
- Huang, M. (2014). Development of a tower mill model using hardgrove mill test. Master of Applied Science, The University of British Columbia.
- Hulburt, H., & Katz, S. (1964). Some problems in particle technology: A statistical mechanical formulation. Chemical Engineering Scienc.

- Jankovic, A. (2003). Variables affecting the fine grinding of minerals using stirred mills. *Minerals Engineering*, 16, 337-345. doi:[https://doi.org/10.1016/S0892-6875\(03\)00007-4](https://doi.org/10.1016/S0892-6875(03)00007-4).
- Jiménez, I. (2019). Analisis Modal Composito. Centro de Investigación y Desarrollo Tecnológico, Caracterización de Minerales.
- Joffré Encinas, J. E. (2012). La Metalurgia del futuro. *Revista Metalúrgica*(32), paginas 28 - 38.
- Kick, F. (1885). Das Gezetzt der proportionalen Winderstande und seine Anwendung. Arthur Felix, Leipzig.
- King, R. P. (2012). Modeling and simulation of mineral processing systems. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration, Inc.
- Lichter, J., & Davey, G. (2006). Selection and Sizing of Ultrafine and Stirred Grinding Mills.
- Lu, S. (2016). Acceleration of kinetic Monte Carlo simulation of particle breakage process during grinding with controlled accuracy. *Powder Technology*, 186-196.
- Lynch, A., & Bush, P. (1977). Mineral crushing and grinding circuits, their simulation, optimisation, design and control. Elsevier Scientific Publishing Company.
- Lynch, A., & Rowland, C. (2005). The History of Grinding. Society for Mining, Metallurgy, and Exploration.
- Mazzeinghy, D. B., Schneider, C., Alves, V., & Galéry, R. (2015). Vertical mill simulation applied to iron ores. *Journal of Materials Research and Technology*, 4, 186-190. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.10.011>.
- Mazzeinghy, D., & Cabello Russo, J. (2014). Vertimill™ pilot scale tests simulated by perfect mixing model. *Journal of Materials Research and Technology*, 3, 217-221. doi:<https://doi.org/10.1016/j.jmrt.2014.04.002>
- Mazzeinghy, D., Schneider, C., Alves, V., & Galéry, R. (2015). Vertical Agitated Media Mill scale-up and simulation. *Minerals Engineering*, 73, 69-76. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.003>.
- Morrell, S., Sterns, U., & Weller, K. (1993). The Application of Population Balance Models to Very Fine Grinding in Tower Mills.
- Nitta, S., Furuyama, T., Bissombolo, A., & Mori, S. (2006). Estimation of the motor power of the tower mill through dimensional analysis. *Proceedings of 23rd International Mineral Processing Congress*.

- Oliveira, A., Rodríguez, V., de Carvalho, R., Powell, M., & Tavares, L. (2020). Mechanistic modeling and simulation of a batch vertical stirred mill. *Minerals Engineering*, 156. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2020.106487>.
- Palaniandy, S., Powell, M., Hilden, M., Allen, J., Kermanshahi, K., Oats, B., & Lollback, M. (2015). VertiMill® – Preparing the feed within floatable regime at lower specific energy. *Minerals Engineering*, 73, 44-52. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2014.11.014>.
- Rittinger, P. (1867). *Lehrbuch der Aufbereitungskunde*. Berlin.
- Rocha, D., Spiller, E., Taylor, P., & Miller, H. (2018). Predicting the product particle size distribution from a laboratory vertical stirred mill. *Minerals Engineering*, 129, 85-92. doi:<https://doi.org/10.1016/j.mineng.2018.09.016>.
- Sedlastcheck, K., & Bass, L. (1953). Contribution to the theory of milling processes. *Powder Metall. Bull*, 148-153.
- Tuzun, M. (1993). A study of comminution in a vertical stirred ball mill. Thesis Doctoral.
- YUE, J. (2003). Rheological effects on ultra-fine grinding in stirred mills. Master of Applied Science, University of British Columbia.
- Zavala Puente, R. (2024). Modelado matemático para la optimización de equipos HIGmill a escala industrial mediante el balance poblacional (MBP). Tesis de Maestría, Universidad Autonoma de San Luis Potosí.

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

ANEXO

Tabla 24. Granulometrías de corrida experimental 1.1, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 1.1			Descarga 1.1 Experimental			Modelo ajuste Descarga 1.1		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.02	0.16	99.84	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.19	1.24	98.60	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.40	2.63	95.97	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.72	4.69	91.28	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.97	6.31	84.97	0.24	1.57	98.43	0.23	1.49	98.51
36.00	1.21	7.91	77.06	0.14	0.92	97.51	0.13	0.87	97.64
30.00	1.34	8.74	68.32	0.16	1.05	96.46	0.15	0.98	96.66
25.00	1.30	8.48	59.84	0.18	1.18	95.28	0.17	1.10	95.56
21.00	1.13	7.35	52.49	0.34	2.22	93.06	0.32	2.10	93.46
18.00	0.89	5.78	46.71	0.58	3.76	89.30	0.56	3.65	89.81
15.00	0.92	6.02	40.69	0.76	4.99	84.31	0.74	4.83	84.98
12.50	0.81	5.28	35.41	0.89	5.79	78.52	0.89	5.79	79.18
10.50	0.69	4.50	30.91	0.94	6.13	72.39	0.95	6.20	72.98
9.00	0.55	3.62	27.29	0.88	5.74	66.65	0.88	5.71	67.27
7.50	0.60	3.91	23.38	1.07	6.96	59.69	1.05	6.86	60.41
6.00	0.65	4.21	19.17	1.05	6.84	52.85	1.02	6.67	53.74
5.00	0.45	2.94	16.23	0.95	6.23	46.62	0.94	6.12	47.62
4.30	0.32	2.09	14.14	0.80	5.20	41.42	0.78	5.06	42.55
3.70	0.28	1.80	12.34	0.89	5.79	35.63	0.86	5.61	36.95
3.10	0.28	1.83	10.51	1.00	6.54	29.09	0.99	6.47	30.48
2.60	0.24	1.57	8.94	0.75	4.89	24.20	0.74	4.82	25.66
2.20	0.20	1.31	7.63	0.57	3.73	20.47	0.55	3.59	22.07
1.80	0.22	1.42	6.21	0.52	3.40	17.07	0.49	3.20	18.87
1.50	0.18	1.17	5.04	0.55	3.57	13.50	0.52	3.38	15.49
1.30	0.13	0.84	4.20	0.47	3.04	10.46	0.46	3.01	12.48
1.10	0.14	0.92	3.28	0.37	2.42	8.04	0.35	2.31	10.17
0.90	0.15	1.00	2.28	0.36	2.35	5.69	0.30	1.96	8.21

Tabla 25. Granulometrías de corrida experimental 1.2, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 1.2			Descarga 1.2 Experimental			Modelo ajuste Descarga 1.2		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.02	0.10	99.90	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.03	0.18	99.72	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.37	2.42	97.30	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.62	4.05	93.25	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.82	5.36	87.89	0.20	1.30	98.70	0.19	1.27	98.73
36.00	0.97	6.35	81.54	0.11	0.75	97.95	0.11	0.70	98.04
30.00	1.03	6.69	74.85	0.13	0.87	97.08	0.12	0.75	97.29
25.00	1.00	6.51	68.34	0.15	0.98	96.10	0.13	0.84	96.44
21.00	0.93	6.08	62.26	0.28	1.81	94.29	0.26	1.73	94.71
18.00	0.81	5.29	56.97	0.50	3.29	91.00	0.51	3.32	91.39
15.00	0.94	6.14	50.83	0.74	4.82	86.18	0.75	4.87	86.53
12.50	0.91	5.93	44.90	0.91	5.95	80.23	0.95	6.22	80.30
10.50	0.82	5.33	39.57	0.99	6.47	73.76	1.04	6.80	73.50
9.00	0.66	4.32	35.25	0.93	6.10	67.66	0.93	6.09	67.41
7.50	0.70	4.54	30.71	1.12	7.33	60.33	1.10	7.16	60.25
6.00	0.72	4.67	26.04	1.09	7.10	53.23	1.02	6.63	53.61
5.00	0.49	3.19	22.85	0.99	6.49	46.74	0.87	5.68	47.93
4.30	0.36	2.34	20.51	0.83	5.44	41.30	0.70	4.58	43.35
3.70	0.33	2.14	18.37	0.92	5.98	35.32	0.81	5.28	38.07
3.10	0.36	2.35	16.02	1.02	6.63	28.69	0.99	6.49	31.59
2.60	0.34	2.21	13.81	0.75	4.88	23.81	0.76	4.96	26.62
2.20	0.30	1.98	11.83	0.57	3.69	20.12	0.57	3.70	22.93
1.80	0.34	2.22	9.61	0.51	3.35	16.77	0.52	3.38	19.54
1.50	0.28	1.86	7.75	0.54	3.50	13.27	0.55	3.57	15.98
1.30	0.20	1.33	6.42	0.46	2.98	10.29	0.47	3.06	12.92
1.10	0.22	1.44	4.98	0.36	2.38	7.91	0.39	2.52	10.39
0.90	0.24	1.54	3.44	0.35	2.30	5.61	0.33	2.13	8.26

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 26. Granulometrías de corrida experimental 1.3, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 1.3			Descarga 1.3 Experimental			Modelo ajuste Descarga 1.3		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.02	0.10	99.90	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.03	0.18	99.72	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.37	2.42	97.30	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.62	4.05	93.25	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.82	5.36	87.89	0.00	0.00	100.00	0.39	1.11	98.89
36.00	0.97	6.35	81.54	0.03	0.08	99.92	0.22	0.63	98.26
30.00	1.03	6.69	74.85	0.19	0.54	99.38	0.26	0.74	97.52
25.00	1.00	6.51	68.34	0.63	1.81	97.57	0.31	0.90	96.63
21.00	0.93	6.08	62.26	1.11	3.16	94.41	0.66	1.89	94.74
18.00	0.81	5.29	56.97	1.60	4.57	89.84	1.25	3.58	91.15
15.00	0.94	6.14	50.83	2.01	5.73	84.11	1.78	5.10	86.05
12.50	0.91	5.93	44.90	2.25	6.43	77.68	2.24	6.40	79.66
10.50	0.82	5.33	39.57	2.28	6.51	71.17	2.41	6.90	72.76
9.00	0.66	4.32	35.25	2.08	5.93	65.24	2.14	6.12	66.63
7.50	0.70	4.54	30.71	2.48	7.08	58.16	2.52	7.19	59.45
6.00	0.72	4.67	26.04	2.42	6.92	51.24	2.41	6.89	52.56
5.00	0.49	3.19	22.85	2.21	6.30	44.94	2.13	6.09	46.47
4.30	0.36	2.34	20.51	1.83	5.24	39.70	1.72	4.90	41.57
3.70	0.33	2.14	18.37	2.01	5.74	33.96	1.92	5.48	36.08
3.10	0.36	2.35	16.02	2.23	6.36	27.60	2.28	6.51	29.57
2.60	0.34	2.21	13.81	1.64	4.68	22.92	1.69	4.82	24.75
2.20	0.30	1.98	11.83	1.24	3.54	19.38	1.22	3.50	21.25
1.80	0.34	2.22	9.61	1.13	3.23	16.15	1.10	3.14	18.12
1.50	0.28	1.86	7.75	1.18	3.38	12.77	1.17	3.34	14.78
1.30	0.20	1.33	6.42	1.01	2.88	9.89	1.02	2.93	11.85
1.10	0.22	1.44	4.98	0.80	2.29	7.60	0.81	2.30	9.55
0.90	0.24	1.54	3.44	0.78	2.24	5.36	0.74	2.12	7.43

Tabla 27. Granulometrías de corrida experimental 1.4, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 1.4			Descarga 1.4 Experimental			Modelo ajuste Descarga 1.4		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.02	0.10	99.90	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.03	0.18	99.72	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.37	2.42	97.30	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.62	4.05	93.25	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.82	5.36	87.89	0.20	1.30	98.70	0.19	1.27	98.73
36.00	0.97	6.35	81.54	0.11	0.75	97.95	0.11	0.70	98.04
30.00	1.03	6.69	74.85	0.13	0.87	97.08	0.12	0.75	97.29
25.00	1.00	6.51	68.34	0.15	0.98	96.10	0.13	0.84	96.44
21.00	0.93	6.08	62.26	0.28	1.81	94.29	0.26	1.73	94.71
18.00	0.81	5.29	56.97	0.50	3.29	91.00	0.51	3.32	91.39
15.00	0.94	6.14	50.83	0.74	4.82	86.18	0.75	4.87	86.53
12.50	0.91	5.93	44.90	0.91	5.95	80.23	0.95	6.22	80.30
10.50	0.82	5.33	39.57	0.99	6.47	73.76	1.04	6.80	73.50
9.00	0.66	4.32	35.25	0.93	6.10	67.66	0.93	6.09	67.41
7.50	0.70	4.54	30.71	1.12	7.33	60.33	1.10	7.16	60.25
6.00	0.72	4.67	26.04	1.09	7.10	53.23	1.02	6.63	53.61
5.00	0.49	3.19	22.85	0.99	6.49	46.74	0.87	5.68	47.93
4.30	0.36	2.34	20.51	0.83	5.44	41.30	0.70	4.58	43.35
3.70	0.33	2.14	18.37	0.92	5.98	35.32	0.81	5.28	38.07
3.10	0.36	2.35	16.02	1.02	6.63	28.69	0.99	6.49	31.59
2.60	0.34	2.21	13.81	0.75	4.88	23.81	0.76	4.96	26.62
2.20	0.30	1.98	11.83	0.57	3.69	20.12	0.57	3.70	22.93
1.80	0.34	2.22	9.61	0.51	3.35	16.77	0.52	3.38	19.54
1.50	0.28	1.86	7.75	0.54	3.50	13.27	0.55	3.57	15.98
1.30	0.20	1.33	6.42	0.46	2.98	10.29	0.47	3.06	12.92
1.10	0.22	1.44	4.98	0.36	2.38	7.91	0.39	2.52	10.39
0.90	0.24	1.54	3.44	0.35	2.30	5.61	0.33	2.13	8.26

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 28. Granulometrías de corrida experimental 2.1, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 2.1			Descarga 2.1 Experimental			Modelo ajuste Descarga 2.1		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.12	0.64	99.36	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.22	1.16	98.20	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.40	2.08	96.12	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.59	3.07	93.05	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.74	3.85	89.20	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
36.00	0.94	4.91	84.29	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
30.00	1.12	5.86	78.43	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
25.00	1.23	6.41	72.02	0.01	0.06	99.94	0.01	0.06	99.94
21.00	1.22	6.38	65.64	0.14	0.72	99.22	0.13	0.71	99.24
18.00	1.07	5.62	60.02	0.35	1.82	97.40	0.34	1.79	97.44
15.00	1.24	6.50	53.52	0.71	3.72	93.68	0.68	3.58	93.86
12.50	1.18	6.19	47.33	1.09	5.69	87.99	1.07	5.59	88.27
10.50	1.07	5.58	41.75	1.30	6.82	81.17	1.31	6.84	81.43
9.00	0.88	4.61	37.14	1.25	6.52	74.65	1.26	6.57	74.86
7.50	0.96	5.01	32.13	1.48	7.74	66.91	1.47	7.71	67.15
6.00	1.04	5.42	26.71	1.44	7.55	59.36	1.42	7.43	59.72
5.00	0.73	3.83	22.88	1.34	7.01	52.35	1.33	6.96	52.76
4.30	0.53	2.79	20.09	1.14	5.96	46.39	1.15	5.99	46.77
3.70	0.47	2.46	17.63	1.27	6.65	39.74	0.96	5.00	41.77
3.10	0.49	2.58	15.05	1.42	7.44	32.30	1.61	8.43	33.34
2.60	0.43	2.27	12.78	1.05	5.50	26.80	1.03	5.41	27.93
2.20	0.37	1.94	10.84	0.79	4.15	22.65	0.79	4.11	23.82
1.80	0.40	2.09	8.75	0.72	3.78	18.87	0.71	3.72	20.10
1.50	0.33	1.71	7.04	0.75	3.94	14.93	0.72	3.76	16.34
1.30	0.23	1.21	5.83	0.64	3.35	11.58	0.63	3.29	13.04
1.10	0.25	1.31	4.52	0.51	2.67	8.91	0.50	2.60	10.45
0.90	0.27	1.40	3.12	0.50	2.59	6.32	0.36	1.88	8.57

Tabla 29. Granulometrías de corrida experimental 2.2, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 2.2			Descarga 2.2 Experimental			Modelo ajuste Descarga 2.2		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.07	0.37	99.63	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.20	1.06	98.57	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.42	2.17	96.40	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.64	3.36	93.04	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.82	4.30	88.74	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
36.00	1.05	5.50	83.24	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
30.00	1.23	6.42	76.82	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
25.00	1.30	6.82	70.00	0.04	0.19	99.81	0.01	0.06	99.94
21.00	1.26	6.59	63.41	0.15	0.76	99.05	0.14	0.73	99.21
18.00	1.09	5.72	57.69	0.39	2.02	97.03	0.35	1.82	97.39
15.00	1.24	6.47	51.22	0.64	3.36	93.67	0.68	3.56	93.83
12.50	1.16	6.08	45.14	0.86	4.49	89.18	1.05	5.49	88.33
10.50	1.03	5.41	39.73	1.03	5.36	83.82	1.28	6.68	81.65
9.00	0.85	4.44	35.29	1.05	5.51	78.31	1.24	6.48	75.17
7.50	0.92	4.81	30.48	1.37	7.15	71.16	1.46	7.63	67.54
6.00	0.99	5.18	25.30	1.42	7.40	63.76	1.40	7.33	60.21
5.00	0.70	3.65	21.65	1.35	7.07	56.69	1.32	6.91	53.30
4.30	0.51	2.65	19.00	1.17	6.14	50.55	1.15	6.02	47.28
3.70	0.45	2.35	16.65	1.34	7.00	43.55	0.91	4.77	42.51
3.10	0.47	2.45	14.20	1.54	8.03	35.52	1.59	8.31	34.20
2.60	0.41	2.15	12.05	1.15	6.00	29.52	1.05	5.51	28.69
2.20	0.35	1.84	10.21	0.87	4.57	24.95	0.83	4.32	24.37
1.80	0.38	1.97	8.24	0.80	4.16	20.79	0.76	3.96	20.41
1.50	0.31	1.61	6.63	0.83	4.35	16.44	0.77	4.04	16.37
1.30	0.22	1.15	5.48	0.71	3.70	12.74	0.67	3.52	12.84
1.10	0.24	1.23	4.25	0.56	2.94	9.80	0.52	2.72	10.13
0.90	0.25	1.31	2.94	0.55	2.86	6.94	0.36	1.89	8.24

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 30. Granulometrías de corrida experimental 2.3, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 2.3			Descarga 2.3 Experimental			Modelo ajuste Descarga 2.3		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.11	0.56	99.44	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.22	1.13	98.31	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.41	2.14	96.17	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.63	3.29	92.88	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.81	4.23	88.65	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
36.00	1.04	5.43	83.22	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
30.00	1.23	6.41	76.81	0.00	0.01	99.99	0.00	0.00	100.00
25.00	1.31	6.86	69.95	0.04	0.21	99.78	0.01	0.06	99.94
21.00	1.27	6.63	63.32	0.15	0.76	99.02	0.14	0.73	99.21
18.00	1.09	5.71	57.61	0.36	1.87	97.15	0.35	1.82	97.38
15.00	1.23	6.45	51.16	0.57	2.99	94.16	0.68	3.56	93.82
12.50	1.16	6.06	45.10	0.78	4.06	90.10	1.05	5.50	88.33
10.50	1.03	5.41	39.69	0.96	5.04	85.06	1.28	6.70	81.63
9.00	0.85	4.45	35.24	1.02	5.31	79.75	1.24	6.48	75.15
7.50	0.92	4.81	30.43	1.34	7.01	72.74	1.46	7.61	67.54
6.00	0.99	5.19	25.24	1.40	7.34	65.40	1.41	7.35	60.19
5.00	0.70	3.66	21.58	1.35	7.06	58.34	1.33	6.95	53.24
4.30	0.51	2.65	18.93	1.19	6.21	52.13	1.15	6.03	47.22
3.70	0.45	2.35	16.58	1.37	7.17	44.96	0.95	4.96	42.25
3.10	0.46	2.43	14.15	1.58	8.27	36.69	1.60	8.39	33.86
2.60	0.41	2.15	12.00	1.19	6.22	30.47	1.05	5.48	28.38
2.20	0.35	1.82	10.18	0.90	4.72	25.75	0.82	4.26	24.12
1.80	0.38	1.97	8.21	0.82	4.30	21.45	0.75	3.93	20.19
1.50	0.31	1.60	6.61	0.86	4.48	16.97	0.77	4.02	16.18
1.30	0.22	1.14	5.47	0.73	3.81	13.16	0.67	3.52	12.66
1.10	0.23	1.22	4.25	0.58	3.02	10.14	0.52	2.73	9.93
0.90	0.25	1.32	2.93	0.56	2.93	7.21	0.37	1.92	8.01

Tabla 31. Granulometrías de corrida experimental 2.4, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 2.4			Descarga 2.4 Experimental			Modelo ajuste Descarga 2.4		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.21	1.12	98.88	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.28	1.45	97.43	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.46	2.40	95.03	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.66	3.43	91.60	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.81	4.23	87.37	0.18	0.95	99.05	0.00	0.00	100.00
36.00	1.02	5.33	82.04	0.05	0.25	98.80	0.00	0.00	100.00
30.00	1.20	6.25	75.79	0.05	0.26	98.54	0.00	0.00	100.00
25.00	1.28	6.70	69.09	0.05	0.26	98.28	0.01	0.06	99.94
21.00	1.24	6.48	62.61	0.19	0.97	97.31	0.14	0.72	99.22
18.00	1.07	5.59	57.02	0.48	2.49	94.82	0.34	1.80	97.42
15.00	1.21	6.34	50.68	0.75	3.94	90.88	0.68	3.54	93.88
12.50	1.14	5.96	44.72	0.93	4.86	86.02	1.05	5.51	88.37
10.50	1.02	5.33	39.39	1.04	5.44	80.58	1.29	6.73	81.64
9.00	0.84	4.39	35.00	1.03	5.38	75.20	1.24	6.49	75.16
7.50	0.91	4.74	30.26	1.32	6.88	68.32	1.45	7.58	67.58
6.00	0.98	5.13	25.13	1.38	7.21	61.11	1.41	7.35	60.24
5.00	0.69	3.62	21.51	1.33	6.98	54.13	1.34	7.00	53.24
4.30	0.50	2.63	18.88	1.16	6.06	48.07	1.16	6.06	47.18
3.70	0.44	2.32	16.56	1.31	6.84	41.23	1.05	5.51	41.67
3.10	0.46	2.42	14.14	1.48	7.74	33.49	1.70	8.91	32.76
2.60	0.41	2.13	12.01	1.11	5.78	27.71	1.09	5.71	27.05
2.20	0.35	1.82	10.19	0.84	4.37	23.34	0.83	4.35	22.70
1.80	0.37	1.96	8.23	0.76	3.96	19.38	0.75	3.92	18.79
1.50	0.31	1.60	6.63	0.79	4.11	15.27	0.76	3.98	14.81
1.30	0.22	1.15	5.48	0.67	3.48	11.79	0.66	3.46	11.35
1.10	0.23	1.22	4.26	0.53	2.75	9.04	0.51	2.68	8.66
0.90	0.25	1.32	2.94	0.50	2.64	6.40	0.37	1.96	6.70

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 32. Granulometrías de corrida experimental 3.1, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 3.1			Descarga 3.1 Experimental			Modelo ajuste Descarga 3.1		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.03	0.18	99.82	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.08	0.55	99.27	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.21	1.35	97.92	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.39	2.55	95.37	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.57	3.72	91.65	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
36.00	0.78	5.11	86.54	0.01	0.08	99.92	0.01	0.08	99.92
30.00	0.96	6.24	80.30	0.16	1.04	98.88	0.16	1.04	98.88
25.00	1.05	6.87	73.43	0.36	2.37	96.51	0.36	2.36	96.52
21.00	1.04	6.82	66.61	0.61	3.96	92.55	0.60	3.91	92.61
18.00	0.93	6.04	60.57	0.88	5.75	86.80	0.88	5.72	86.89
15.00	1.07	6.97	53.60	1.09	7.14	79.66	1.09	7.14	79.75
12.50	1.02	6.64	46.96	1.18	7.72	71.94	1.19	7.76	71.99
10.50	0.91	5.97	40.99	1.13	7.35	64.59	1.13	7.37	64.61
9.00	0.75	4.89	36.10	0.95	6.21	58.38	0.95	6.21	58.41
7.50	0.81	5.27	30.83	1.06	6.90	51.48	1.06	6.89	51.51
6.00	0.86	5.62	25.21	0.98	6.40	45.08	0.98	6.37	45.14
5.00	0.59	3.88	21.33	0.87	5.65	39.43	0.86	5.64	39.50
4.30	0.43	2.78	18.55	0.71	4.65	34.78	0.71	4.64	34.86
3.70	0.37	2.42	16.13	0.78	5.09	29.69	0.78	5.10	29.76
3.10	0.38	2.48	13.65	0.85	5.58	24.11	0.86	5.60	24.16
2.60	0.33	2.15	11.50	0.62	4.06	20.05	0.62	4.06	20.10
2.20	0.28	1.80	9.70	0.47	3.06	16.99	0.47	3.05	17.04
1.80	0.29	1.91	7.79	0.43	2.78	14.21	0.43	2.77	14.27
1.50	0.24	1.54	6.25	0.45	2.93	11.28	0.45	2.92	11.34
1.30	0.17	1.10	5.15	0.38	2.51	8.77	0.38	2.50	8.84
1.10	0.18	1.16	3.99	0.31	2.01	6.76	0.31	2.01	6.83
0.90	0.19	1.24	2.75	0.30	1.98	4.78	0.15	0.99	5.84

Tabla 33. Granulometrías de corrida experimental 3.2, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 3.2			Descarga 3.2 Experimental			Modelo ajuste Descarga 3.2		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.03	0.18	99.82	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.09	0.57	99.25	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.21	1.40	97.85	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.42	2.72	95.13	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.62	4.04	91.09	0.01	0.05	99.95	0.00	0.00	100.00
36.00	0.85	5.52	85.57	0.09	0.57	99.38	0.01	0.09	99.91
30.00	1.01	6.62	78.95	0.23	1.53	97.85	0.17	1.10	98.81
25.00	1.08	7.08	71.87	0.49	3.19	94.66	0.37	2.43	96.38
21.00	1.05	6.84	65.03	0.70	4.58	90.08	0.60	3.92	92.46
18.00	0.91	5.94	59.09	0.92	5.99	84.09	0.86	5.63	86.83
15.00	1.04	6.79	52.30	1.07	6.97	77.12	1.07	6.97	79.86
12.50	0.99	6.44	45.86	1.13	7.37	69.75	1.16	7.56	72.30
10.50	0.89	5.79	40.07	1.09	7.09	62.66	1.11	7.23	65.07
9.00	0.73	4.75	35.32	0.93	6.08	56.58	0.94	6.15	58.92
7.50	0.79	5.13	30.19	1.04	6.80	49.78	1.05	6.87	52.05
6.00	0.84	5.47	24.72	0.96	6.24	43.54	0.97	6.35	45.71
5.00	0.58	3.80	20.92	0.84	5.45	38.09	0.87	5.67	40.04
4.30	0.42	2.71	18.21	0.68	4.43	33.66	0.72	4.67	35.37
3.70	0.36	2.37	15.84	0.74	4.84	28.82	0.79	5.16	30.21
3.10	0.37	2.43	13.41	0.82	5.34	23.48	0.87	5.66	24.55
2.60	0.32	2.11	11.30	0.60	3.91	19.57	0.63	4.12	20.42
2.20	0.27	1.77	9.53	0.45	2.95	16.62	0.48	3.11	17.31
1.80	0.29	1.88	7.65	0.41	2.70	13.92	0.43	2.81	14.50
1.50	0.23	1.52	6.13	0.44	2.85	11.07	0.45	2.96	11.53
1.30	0.16	1.07	5.06	0.38	2.45	8.62	0.39	2.51	9.02
1.10	0.17	1.14	3.92	0.30	1.97	6.65	0.31	2.01	7.01
0.90	0.19	1.22	2.70	0.29	1.92	4.73	0.15	0.99	6.02

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 34. Granulometrías de corrida experimental 3.3, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 3.3			Descarga 3.3 Experimental			Modelo ajuste Descarga 3.3		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.02	0.14	99.86	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.09	0.61	99.25	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.23	1.49	97.76	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.42	2.71	95.05	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.59	3.84	91.21	0.00	0.03	99.97	0.00	0.00	100.00
36.00	0.80	5.20	86.01	0.08	0.50	99.47	0.01	0.08	99.92
30.00	0.98	6.38	79.63	0.25	1.63	97.84	0.16	1.06	98.86
25.00	1.08	7.02	72.61	0.54	3.54	94.30	0.37	2.41	96.44
21.00	1.07	6.97	65.64	0.72	4.71	89.59	0.61	4.00	92.45
18.00	0.94	6.12	59.52	0.87	5.66	83.93	0.89	5.80	86.65
15.00	1.07	7.00	52.52	0.99	6.45	77.48	1.10	7.18	79.47
12.50	1.01	6.59	45.93	1.09	7.13	70.35	1.19	7.73	71.74
10.50	0.90	5.90	40.03	1.12	7.32	63.03	1.13	7.34	64.39
9.00	0.74	4.82	35.21	1.00	6.54	56.49	0.95	6.19	58.21
7.50	0.79	5.18	30.03	1.14	7.42	49.07	1.05	6.85	51.35
6.00	0.85	5.52	24.51	1.04	6.80	42.27	0.97	6.33	45.02
5.00	0.59	3.82	20.69	0.89	5.84	36.43	0.86	5.64	39.38
4.30	0.42	2.72	17.97	0.71	4.63	31.80	0.71	4.65	34.73
3.70	0.36	2.36	15.61	0.74	4.84	26.96	0.78	5.10	29.63
3.10	0.37	2.41	13.20	0.78	5.12	21.84	0.85	5.58	24.05
2.60	0.32	2.08	11.12	0.56	3.65	18.19	0.62	4.04	20.01
2.20	0.27	1.73	9.39	0.42	2.75	15.44	0.46	3.03	16.98
1.80	0.28	1.85	7.54	0.38	2.51	12.93	0.42	2.75	14.23
1.50	0.23	1.49	6.05	0.41	2.67	10.26	0.44	2.90	11.33
1.30	0.16	1.05	5.00	0.35	2.29	7.97	0.38	2.47	8.86
1.10	0.17	1.12	3.88	0.28	1.85	6.12	0.30	1.98	6.89
0.90	0.19	1.21	2.67	0.28	1.81	4.31	0.14	0.94	5.95

Tabla 35. Granulometrías de corrida experimental 3.4, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 3.4			Descarga 3.4 Experimental			Modelo ajuste Descarga 3.4		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.03	0.17	99.83	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.08	0.53	99.30	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.20	1.33	97.97	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.39	2.56	95.41	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.58	3.78	91.63	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
36.00	0.80	5.21	86.42	0.03	0.17	99.83	0.01	0.08	99.92
30.00	0.98	6.39	80.03	0.16	1.02	98.81	0.16	1.06	98.86
25.00	1.07	6.98	73.05	0.47	3.06	95.75	0.37	2.40	96.46
21.00	1.05	6.87	66.18	0.73	4.76	90.99	0.60	3.94	92.52
18.00	0.92	6.03	60.15	0.96	6.25	84.74	0.87	5.71	86.81
15.00	1.06	6.94	53.21	1.12	7.31	77.43	1.09	7.11	79.70
12.50	1.02	6.63	46.58	1.22	7.93	69.50	1.19	7.74	71.96
10.50	0.91	5.96	40.62	1.21	7.90	61.60	1.13	7.36	64.59
9.00	0.75	4.90	35.72	1.05	6.85	54.75	0.95	6.23	58.36
7.50	0.81	5.27	30.45	1.15	7.52	47.23	1.06	6.92	51.44
6.00	0.86	5.61	24.84	1.02	6.68	40.55	0.98	6.39	45.06
5.00	0.59	3.88	20.96	0.87	5.65	34.90	0.87	5.67	39.39
4.30	0.42	2.76	18.20	0.68	4.44	30.46	0.71	4.65	34.75
3.70	0.37	2.39	15.81	0.71	4.64	25.82	0.78	5.10	29.65
3.10	0.37	2.44	13.37	0.75	4.91	20.91	0.85	5.58	24.07
2.60	0.32	2.09	11.28	0.54	3.53	17.38	0.62	4.02	20.05
2.20	0.27	1.76	9.52	0.41	2.65	14.73	0.47	3.04	17.01
1.80	0.28	1.86	7.66	0.37	2.42	12.31	0.42	2.75	14.26
1.50	0.23	1.51	6.15	0.39	2.54	9.77	0.45	2.91	11.34
1.30	0.16	1.06	5.09	0.34	2.19	7.58	0.38	2.47	8.87
1.10	0.17	1.14	3.95	0.27	1.75	5.83	0.31	1.99	6.87
0.90	0.19	1.23	2.72	0.26	1.70	4.13	0.15	0.98	5.90

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 36. Granulometrías de corrida experimental 4.1, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 4.1			Descarga 4.1 Experimental			Modelo ajuste Descarga 4.1		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.02	0.10	99.90	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.08	0.42	99.48	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.22	1.14	98.34	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.46	2.40	95.94	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.73	3.80	92.14	0.00	0.02	99.98	0.00	0.01	99.99
36.00	1.04	5.45	86.69	0.05	0.26	99.72	0.03	0.17	99.81
30.00	1.29	6.73	79.96	0.17	0.88	98.84	0.12	0.65	99.17
25.00	1.40	7.30	72.66	0.37	1.96	96.88	0.27	1.48	97.68
21.00	1.36	7.09	65.57	0.57	2.98	93.90	0.43	2.35	95.33
18.00	1.18	6.17	59.40	0.82	4.31	89.59	0.67	3.68	91.65
15.00	1.35	7.04	52.36	1.09	5.71	83.88	0.89	4.91	86.74
12.50	1.27	6.65	45.71	1.30	6.80	77.08	1.15	6.30	80.44
10.50	1.14	5.94	39.77	1.37	7.18	69.90	1.27	6.97	73.47
9.00	0.93	4.87	34.90	1.26	6.61	63.29	1.19	6.51	66.96
7.50	1.00	5.21	29.69	1.50	7.83	55.46	1.51	8.30	58.67
6.00	1.06	5.52	24.17	1.43	7.47	47.99	1.33	7.31	51.36
5.00	0.73	3.80	20.37	1.26	6.61	41.38	1.26	6.93	44.43
4.30	0.52	2.70	17.67	1.01	5.30	36.08	1.00	5.49	38.94
3.70	0.45	2.33	15.34	1.08	5.63	30.45	1.21	6.63	32.31
3.10	0.46	2.38	12.96	1.15	6.00	24.45	1.51	8.30	24.01
2.60	0.39	2.04	10.92	0.82	4.27	20.18	0.83	4.58	19.43
2.20	0.33	1.71	9.21	0.61	3.17	17.01	0.56	3.08	16.36
1.80	0.35	1.81	7.40	0.55	2.85	14.16	0.47	2.61	13.75
1.50	0.28	1.46	5.94	0.56	2.95	11.21	0.57	3.10	10.65
1.30	0.20	1.04	4.90	0.48	2.50	8.71	0.52	2.88	7.77
1.10	0.21	1.10	3.80	0.38	1.99	6.72	0.33	1.80	5.97
0.90	0.23	1.18	2.62	0.37	1.94	4.78	0.26	1.42	4.55

Tabla 37. Granulometrías de corrida experimental 4.2, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 4.2			Descarga 4.2 Experimental			Modelo ajuste Descarga 4.2		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.03	0.17	99.83	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.11	0.58	99.25	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.27	1.42	97.83	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.50	2.59	95.24	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.69	3.62	91.62	0.00	0.00	100.00	0.00	0.01	99.99
36.00	0.93	4.88	86.74	0.00	0.02	99.98	0.03	0.15	99.84
30.00	1.13	5.89	80.85	0.08	0.43	99.55	0.10	0.54	99.30
25.00	1.23	6.44	74.41	0.24	1.28	98.27	0.24	1.26	98.04
21.00	1.23	6.42	67.99	0.46	2.43	95.84	0.39	2.04	96.00
18.00	1.09	5.72	62.27	0.67	3.51	92.33	0.62	3.27	92.73
15.00	1.29	6.72	55.55	0.86	4.51	87.82	0.85	4.46	88.28
12.50	1.25	6.53	49.02	1.03	5.37	82.45	1.12	5.85	82.43
10.50	1.15	6.00	43.02	1.13	5.92	76.53	1.27	6.63	75.80
9.00	0.96	5.02	38.00	1.11	5.82	70.71	1.20	6.29	69.50
7.50	1.05	5.48	32.52	1.41	7.36	63.35	1.56	8.16	61.34
6.00	1.13	5.89	26.63	1.45	7.56	55.79	1.39	7.25	54.09
5.00	0.79	4.11	22.52	1.35	7.08	48.71	1.31	6.87	47.23
4.30	0.56	2.93	19.59	1.13	5.92	42.79	1.03	5.40	41.83
3.70	0.49	2.56	17.03	1.23	6.42	36.37	1.26	6.58	35.24
3.10	0.50	2.61	14.42	1.33	6.96	29.41	1.58	8.28	26.96
2.60	0.43	2.25	12.17	0.96	5.00	24.41	0.87	4.57	22.39
2.20	0.36	1.90	10.27	0.71	3.73	20.68	0.59	3.07	19.32
1.80	0.38	2.01	8.26	0.64	3.36	17.32	0.50	2.62	16.70
1.50	0.31	1.63	6.63	0.67	3.52	13.80	0.59	3.11	13.59
1.30	0.22	1.15	5.48	0.57	3.00	10.80	0.54	2.82	10.77
1.10	0.24	1.23	4.25	0.46	2.40	8.40	0.35	1.81	8.97
0.90	0.25	1.32	2.93	0.45	2.35	6.05	0.28	1.46	7.51

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 38. Granulometrías de corrida experimental 4.3, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 4.3			Descarga 4.3 Experimental			Modelo ajuste Descarga 4.3		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.06	0.30	99.70	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.13	0.68	99.02	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.29	1.50	97.52	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.51	2.65	94.87	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.72	3.79	91.08	0.00	0.00	100.00	0.00	0.01	99.99
36.00	1.00	5.23	85.85	0.00	0.00	100.00	0.03	0.16	99.83
30.00	1.24	6.46	79.39	0.02	0.12	99.88	0.11	0.59	99.23
25.00	1.35	7.05	72.34	0.20	1.04	98.84	0.26	1.37	97.86
21.00	1.31	6.86	65.48	0.36	1.88	96.96	0.42	2.18	95.68
18.00	1.14	5.96	59.52	0.63	3.27	93.69	0.65	3.41	92.27
15.00	1.30	6.82	52.70	0.93	4.85	88.84	0.87	4.55	87.72
12.50	1.24	6.47	46.23	1.15	6.01	82.83	1.12	5.86	81.86
10.50	1.12	5.84	40.39	1.24	6.48	76.35	1.26	6.56	75.30
9.00	0.92	4.82	35.57	1.17	6.12	70.23	1.18	6.16	69.13
7.50	0.99	5.19	30.38	1.44	7.55	62.68	1.51	7.88	61.25
6.00	1.06	5.53	24.85	1.46	7.65	55.03	1.33	6.96	54.29
5.00	0.73	3.83	21.02	1.35	7.07	47.96	1.27	6.62	47.68
4.30	0.52	2.73	18.29	1.12	5.85	42.11	1.00	5.25	42.42
3.70	0.45	2.37	15.92	1.20	6.30	35.81	1.22	6.38	36.04
3.10	0.46	2.42	13.50	1.31	6.84	28.97	1.53	7.99	28.05
2.60	0.40	2.10	11.40	0.94	4.93	24.04	0.85	4.44	23.61
2.20	0.34	1.76	9.64	0.71	3.70	20.34	0.57	2.98	20.62
1.80	0.36	1.89	7.75	0.64	3.34	17.00	0.49	2.56	18.07
1.50	0.29	1.52	6.23	0.67	3.49	13.51	0.58	3.05	15.02
1.30	0.21	1.08	5.15	0.57	2.98	10.53	0.55	2.88	12.14
1.10	0.22	1.15	4.00	0.46	2.38	8.15	0.34	1.80	10.34
0.90	0.24	1.24	2.76	0.44	2.32	5.83	0.29	1.50	8.84

Tabla 39. Granulometrías de corrida experimental 4.4, ajuste modelo mezclado perfecto.

Micrómetros	Alimentación 4.4			Descarga 4.4 Experimental			Modelo ajuste Descarga 4.4		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.03	0.16	99.84	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.10	0.54	99.30	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.27	1.41	97.89	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
51.00	0.51	2.67	95.22	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
43.00	0.75	3.90	91.32	0.00	0.00	100.00	0.00	0.01	99.99
36.00	1.01	5.28	86.04	0.00	0.00	100.00	0.03	0.16	99.83
30.00	1.21	6.34	79.70	0.02	0.08	99.92	0.11	0.58	99.24
25.00	1.30	6.82	72.88	0.17	0.89	99.03	0.25	1.33	97.92
21.00	1.27	6.66	66.22	0.34	1.80	97.23	0.41	2.12	95.80
18.00	1.11	5.83	60.39	0.62	3.23	94.00	0.64	3.34	92.46
15.00	1.28	6.71	53.68	0.91	4.77	89.23	0.86	4.48	87.98
12.50	1.23	6.43	47.25	1.15	6.02	83.21	1.11	5.81	82.17
10.50	1.11	5.83	41.42	1.27	6.66	76.55	1.25	6.52	75.65
9.00	0.92	4.83	36.59	1.20	6.28	70.27	1.18	6.15	69.51
7.50	1.00	5.25	31.34	1.44	7.51	62.76	1.52	7.94	61.56
6.00	1.08	5.65	25.69	1.40	7.30	55.46	1.35	7.07	54.50
5.00	0.75	3.93	21.76	1.27	6.66	48.80	1.28	6.71	47.78
4.30	0.54	2.81	18.95	1.07	5.61	43.19	1.02	5.32	42.47
3.70	0.47	2.45	16.50	1.19	6.22	36.97	1.24	6.47	35.99
3.10	0.48	2.52	13.98	1.32	6.90	30.07	1.56	8.18	27.81
2.60	0.42	2.17	11.81	0.96	5.04	25.03	0.86	4.51	23.30
2.20	0.35	1.83	9.98	0.72	3.78	21.25	0.58	3.04	20.26
1.80	0.37	1.96	8.02	0.66	3.43	17.82	0.50	2.61	17.65
1.50	0.30	1.58	6.44	0.69	3.60	14.22	0.59	3.10	14.55
1.30	0.21	1.12	5.32	0.59	3.08	11.14	0.55	2.86	11.70
1.10	0.23	1.19	4.13	0.47	2.47	8.67	0.34	1.80	9.90
0.90	0.24	1.28	2.85	0.46	2.43	6.24	0.28	1.45	8.44

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 40. Granulometrías de corrida experimental 1.1, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 1.1			Descarga 1.1 Experimental			Modelo ajuste Descarga 1.1		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.02	0.16	99.84	0.00	0.00	100.00	0.00	0.01	99.99
73.00	0.19	1.24	98.60	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	99.99
61.00	0.40	2.63	95.97	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	99.98
51.00	0.72	4.69	91.28	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	99.98
43.00	0.97	6.31	84.97	0.24	1.57	98.43	0.07	0.44	99.55
36.00	1.21	7.91	77.06	0.14	0.92	97.51	0.18	1.16	98.39
30.00	1.34	8.74	68.32	0.16	1.05	96.46	0.35	2.28	96.11
25.00	1.30	8.48	59.84	0.18	1.18	95.28	0.53	3.47	92.64
21.00	1.13	7.35	52.49	0.34	2.22	93.06	0.63	4.14	88.51
18.00	0.89	5.78	46.71	0.58	3.76	89.30	0.93	6.09	82.42
15.00	0.92	6.02	40.69	0.76	4.99	84.31	0.95	6.17	76.25
12.50	0.81	5.28	35.41	0.89	5.79	78.52	0.94	6.16	70.09
10.50	0.69	4.50	30.91	0.94	6.13	72.39	0.85	5.55	64.54
9.00	0.55	3.62	27.29	0.88	5.74	66.65	0.99	6.47	58.08
7.50	0.60	3.91	23.38	1.07	6.96	59.69	1.11	7.22	50.86
6.00	0.65	4.21	19.17	1.05	6.84	52.85	0.86	5.59	45.27
5.00	0.45	2.94	16.23	0.95	6.23	46.62	0.70	4.57	40.70
4.30	0.32	2.09	14.14	0.80	5.20	41.42	0.65	4.27	36.43
3.70	0.28	1.80	12.34	0.89	5.79	35.63	0.69	4.51	31.91
3.10	0.28	1.83	10.51	1.00	6.54	29.09	0.62	4.04	27.87
2.60	0.24	1.57	8.94	0.75	4.89	24.20	0.53	3.48	24.40
2.20	0.20	1.31	7.63	0.57	3.73	20.47	0.55	3.61	20.79
1.80	0.22	1.42	6.21	0.52	3.40	17.07	0.45	2.97	17.82
1.50	0.18	1.17	5.04	0.55	3.57	13.50	0.34	2.19	15.63
1.30	0.13	0.84	4.20	0.47	3.04	10.46	0.34	2.19	13.44
1.10	0.14	0.92	3.28	0.37	2.42	8.04	0.35	2.30	11.14
0.90	0.15	1.00	2.28	0.36	2.35	5.69	1.36	8.86	2.28

Tabla 41. Granulometrías de corrida experimental 1.2, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 1.2			Descarga 1.2 Experimental			Modelo ajuste Descarga 1.2		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.02	0.10	99.90	0.00	0.00	100.00	0.00	0.01	99.99
73.00	0.03	0.18	99.72	0.00	0.00	100.00	0.00	0.01	99.98
61.00	0.37	2.42	97.30	0.04	0.24	99.76	-0.03	0.00	99.98
51.00	0.62	4.05	93.25	0.07	0.44	99.32	-0.02	0.00	99.98
43.00	0.82	5.36	87.89	0.09	0.62	98.70	0.05	0.30	99.68
36.00	0.97	6.35	81.54	0.11	0.75	97.95	0.15	1.01	98.67
30.00	1.03	6.69	74.85	0.13	0.87	97.08	0.30	1.96	96.71
25.00	1.00	6.51	68.34	0.15	0.98	96.10	0.43	2.82	93.90
21.00	0.93	6.08	62.26	0.28	1.81	94.29	0.49	3.21	90.69
18.00	0.81	5.29	56.97	0.50	3.29	91.00	0.73	4.75	85.94
15.00	0.94	6.14	50.83	0.74	4.82	86.18	0.75	4.91	81.03
12.50	0.91	5.93	44.90	0.91	5.95	80.23	0.79	5.15	75.88
10.50	0.82	5.33	39.57	0.99	6.47	73.76	0.76	4.93	70.94
9.00	0.66	4.32	35.25	0.93	6.10	67.66	0.93	6.07	64.87
7.50	0.70	4.54	30.71	1.12	7.33	60.33	1.08	7.03	57.84
6.00	0.72	4.67	26.04	1.09	7.10	53.23	0.86	5.61	52.24
5.00	0.49	3.19	22.85	0.99	6.49	46.74	0.71	4.66	47.58
4.30	0.36	2.34	20.51	0.83	5.44	41.30	0.67	4.40	43.18
3.70	0.33	2.14	18.37	0.92	5.98	35.32	0.72	4.70	38.48
3.10	0.36	2.35	16.02	1.02	6.63	28.69	0.66	4.30	34.18
2.60	0.34	2.21	13.81	0.75	4.88	23.81	0.59	3.82	30.36
2.20	0.30	1.98	11.83	0.57	3.69	20.12	0.62	4.08	26.28
1.80	0.34	2.22	9.61	0.51	3.35	16.77	0.54	3.51	22.77
1.50	0.28	1.86	7.75	0.54	3.50	13.27	0.41	2.70	20.07
1.30	0.20	1.33	6.42	0.46	2.98	10.29	0.42	2.73	17.34
1.10	0.22	1.44	4.98	0.36	2.38	7.91	0.45	2.91	14.43
0.90	0.24	1.54	3.44	0.35	2.30	5.61	1.73	11.29	3.14

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 42. Granulometrías de corrida experimental 1.3, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 1.3			Descarga 1.3 Experimental			Modelo ajuste Descarga 1.3		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.07	0.48	99.52	0.00	0.00	100.00	0.01	0.03	99.97
73.00	0.19	1.21	98.31	0.00	0.00	100.00	0.01	0.06	99.91
61.00	0.38	2.47	95.84	0.00	0.00	100.00	0.01	0.06	99.85
51.00	0.58	3.79	92.05	0.00	0.00	100.00	0.02	0.14	99.71
43.00	0.72	4.69	87.36	0.00	0.00	100.00	0.08	0.55	99.16
36.00	0.88	5.76	81.60	0.01	0.08	99.92	0.17	1.08	98.08
30.00	1.01	6.56	75.04	0.08	0.54	99.38	0.28	1.80	96.28
25.00	1.06	6.89	68.15	0.28	1.81	97.57	0.39	2.57	93.71
21.00	1.01	6.60	61.55	0.48	3.16	94.41	0.47	3.06	90.65
18.00	0.87	5.68	55.87	0.70	4.57	89.84	0.73	4.76	85.89
15.00	0.98	6.39	49.48	0.88	5.73	84.11	0.77	5.02	80.87
12.50	0.91	5.97	43.51	0.99	6.43	77.68	0.81	5.31	75.55
10.50	0.81	5.29	38.22	1.00	6.51	71.17	0.78	5.06	70.49
9.00	0.66	4.32	33.90	0.91	5.93	65.24	0.95	6.19	64.30
7.50	0.71	4.64	29.26	1.08	7.08	58.16	1.09	7.14	57.16
6.00	0.76	4.98	24.28	1.06	6.92	51.24	0.88	5.72	51.44
5.00	0.54	3.51	20.77	0.97	6.30	44.94	0.74	4.80	46.64
4.30	0.39	2.54	18.23	0.80	5.24	39.70	0.70	4.56	42.08
3.70	0.34	2.24	15.99	0.88	5.74	33.96	0.75	4.88	37.20
3.10	0.36	2.34	13.65	0.97	6.36	27.60	0.68	4.45	32.75
2.60	0.32	2.06	11.59	0.72	4.68	22.92	0.60	3.90	28.85
2.20	0.27	1.76	9.83	0.54	3.54	19.38	0.63	4.11	24.74
1.80	0.29	1.89	7.94	0.49	3.23	16.15	0.53	3.45	21.30
1.50	0.24	1.55	6.39	0.52	3.38	12.77	0.40	2.58	18.71
1.30	0.17	1.10	5.29	0.44	2.88	9.89	0.40	2.60	16.12
1.10	0.18	1.18	4.11	0.35	2.29	7.60	0.42	2.73	13.39
0.90	0.19	1.27	2.84	0.34	2.24	5.36	1.62	10.55	2.84

Tabla 43. Granulometrías de corrida experimental 1.4, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 1.4			Descarga 1.4 Experimental			Modelo ajuste Descarga 1.4		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.14	0.90	99.10	0.00	0.00	100.00	0.01	0.06	99.94
73.00	0.21	1.36	97.74	0.00	0.00	100.00	0.02	0.13	99.81
61.00	0.38	2.46	95.28	0.00	0.00	100.00	0.02	0.15	99.66
51.00	0.56	3.68	91.60	0.00	0.00	100.00	0.03	0.22	99.43
43.00	0.71	4.62	86.98	0.00	0.00	100.00	0.09	0.60	98.84
36.00	0.88	5.74	81.24	0.00	0.02	99.98	0.17	1.09	97.74
30.00	1.00	6.50	74.74	0.06	0.42	99.56	0.28	1.82	95.93
25.00	1.03	6.74	68.00	0.22	1.45	98.11	0.40	2.59	93.34
21.00	0.98	6.42	61.58	0.44	2.90	95.21	0.47	3.06	90.28
18.00	0.85	5.53	56.05	0.69	4.52	90.69	0.72	4.71	85.57
15.00	0.96	6.27	49.78	0.89	5.83	84.86	0.76	4.94	80.63
12.50	0.91	5.91	43.87	0.99	6.45	78.41	0.80	5.22	75.41
10.50	0.81	5.29	38.58	0.99	6.45	71.96	0.76	4.98	70.43
9.00	0.66	4.34	34.24	0.89	5.82	66.14	0.94	6.11	64.33
7.50	0.72	4.68	29.56	1.06	6.90	59.24	1.08	7.07	57.26
6.00	0.77	5.05	24.51	1.03	6.71	52.53	0.87	5.68	51.57
5.00	0.54	3.55	20.96	0.94	6.11	46.42	0.73	4.79	46.78
4.30	0.39	2.57	18.39	0.79	5.16	41.26	0.70	4.56	42.22
3.70	0.35	2.27	16.12	0.88	5.75	35.51	0.75	4.88	37.34
3.10	0.36	2.37	13.75	1.00	6.51	29.00	0.68	4.46	32.89
2.60	0.32	2.08	11.67	0.75	4.87	24.13	0.60	3.91	28.97
2.20	0.27	1.78	9.89	0.57	3.71	20.42	0.63	4.12	24.85
1.80	0.29	1.91	7.98	0.52	3.39	17.03	0.53	3.46	21.39
1.50	0.24	1.56	6.42	0.55	3.56	13.47	0.40	2.59	18.80
1.30	0.17	1.11	5.31	0.46	3.02	10.45	0.40	2.61	16.19
1.10	0.18	1.19	4.12	0.37	2.41	8.04	0.42	2.74	13.44
0.90	0.19	1.27	2.85	0.36	2.34	5.70	1.62	10.59	2.85

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 44. Granulometrías de corrida experimental 2.1, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 2.1			Descarga 2.1 Experimental			Modelo ajuste Descarga 2.1		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.02	0.16	99.84	0.00	0.00	100.00	0.00	0.02	99.98
73.00	0.19	1.24	98.60	0.00	0.00	100.00	0.01	0.05	99.93
61.00	0.40	2.63	95.97	0.00	0.00	100.00	0.01	0.07	99.85
51.00	0.72	4.69	91.28	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	99.85
43.00	0.97	6.31	84.97	0.24	1.57	98.43	0.04	0.28	99.57
36.00	1.21	7.91	77.06	0.14	0.92	97.51	0.11	0.75	98.83
30.00	1.34	8.74	68.32	0.16	1.05	96.46	0.25	1.61	97.22
25.00	1.30	8.48	59.84	0.18	1.18	95.28	0.41	2.67	94.55
21.00	1.13	7.35	52.49	0.34	2.22	93.06	0.52	3.38	91.17
18.00	0.89	5.78	46.71	0.58	3.76	89.30	0.90	5.88	85.29
15.00	0.92	6.02	40.69	0.76	4.99	84.31	0.87	5.67	79.63
12.50	0.81	5.28	35.41	0.89	5.79	78.52	0.88	5.71	73.91
10.50	0.69	4.50	30.91	0.94	6.13	72.39	0.79	5.13	68.78
9.00	0.55	3.62	27.29	0.88	5.74	66.65	1.01	6.58	62.20
7.50	0.60	3.91	23.38	1.07	6.96	59.69	1.11	7.28	54.92
6.00	0.65	4.21	19.17	1.05	6.84	52.85	0.76	4.95	49.97
5.00	0.45	2.94	16.23	0.95	6.23	46.62	0.67	4.35	45.62
4.30	0.32	2.09	14.14	0.80	5.20	41.42	0.69	4.48	41.14
3.70	0.28	1.80	12.34	0.89	5.79	35.63	0.76	4.97	36.17
3.10	0.28	1.83	10.51	1.00	6.54	29.09	0.65	4.27	31.90
2.60	0.24	1.57	8.94	0.75	4.89	24.20	0.56	3.67	28.23
2.20	0.20	1.31	7.63	0.57	3.73	20.47	0.62	4.06	24.17
1.80	0.22	1.42	6.21	0.52	3.40	17.07	0.47	3.05	21.12
1.50	0.18	1.17	5.04	0.55	3.57	13.50	0.33	2.17	18.95
1.30	0.13	0.84	4.20	0.47	3.04	10.46	0.38	2.50	16.45
1.10	0.14	0.92	3.28	0.37	2.42	8.04	0.39	2.58	13.87
0.90	0.15	1.00	2.28	0.36	2.35	5.69	1.78	11.59	2.28

Tabla 45. Granulometrías de corrida experimental 2.2, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 2.2			Descarga 2.2 Experimental			Modelo ajuste Descarga 2.2		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.06	0.37	99.63	0.00	0.00	100.00	0.01	0.05	99.95
73.00	0.16	1.06	98.57	0.00	0.00	100.00	0.01	0.09	99.86
61.00	0.33	2.17	96.40	0.00	0.00	100.00	0.02	0.10	99.76
51.00	0.51	3.36	93.04	0.00	0.00	100.00	0.02	0.12	99.64
43.00	0.66	4.30	88.74	0.00	0.00	100.00	0.05	0.35	99.29
36.00	0.84	5.50	83.24	0.00	0.00	100.00	0.09	0.61	98.68
30.00	0.98	6.42	76.82	0.00	0.00	100.00	0.16	1.06	97.62
25.00	1.04	6.82	70.00	0.03	0.19	99.81	0.25	1.64	95.99
21.00	1.01	6.59	63.41	0.12	0.76	99.05	0.32	2.06	93.93
18.00	0.88	5.72	57.69	0.31	2.02	97.03	0.63	4.11	89.82
15.00	0.99	6.47	51.22	0.51	3.36	93.67	0.62	4.04	85.78
12.50	0.93	6.08	45.14	0.69	4.49	89.18	0.68	4.41	81.37
10.50	0.83	5.41	39.73	0.82	5.36	83.82	0.65	4.27	77.10
9.00	0.68	4.44	35.29	0.84	5.51	78.31	0.93	6.08	71.02
7.50	0.74	4.81	30.48	1.10	7.15	71.16	1.08	7.06	63.95
6.00	0.79	5.18	25.30	1.13	7.40	63.76	0.75	4.92	59.04
5.00	0.56	3.65	21.65	1.08	7.07	56.69	0.70	4.57	54.47
4.30	0.41	2.65	19.00	0.94	6.14	50.55	0.74	4.86	49.61
3.70	0.36	2.35	16.65	1.07	7.00	43.55	0.84	5.49	44.11
3.10	0.38	2.45	14.20	1.23	8.03	35.52	0.73	4.77	39.34
2.60	0.33	2.15	12.05	0.92	6.00	29.52	0.64	4.19	35.16
2.20	0.28	1.84	10.21	0.70	4.57	24.95	0.73	4.75	30.41
1.80	0.30	1.97	8.24	0.64	4.16	20.79	0.56	3.63	26.78
1.50	0.25	1.61	6.63	0.67	4.35	16.44	0.40	2.64	24.14
1.30	0.18	1.15	5.48	0.57	3.70	12.74	0.48	3.11	21.02
1.10	0.19	1.23	4.25	0.45	2.94	9.80	0.50	3.25	17.78
0.90	0.20	1.31	2.94	0.44	2.86	6.94	2.27	14.84	2.94

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 46. Granulometrías de corrida experimental 2.3, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 2.3			Descarga 2.3 Experimental			Modelo ajuste Descarga 2.3		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.09	0.56	99.44	0.00	0.00	100.00	0.01	0.07	99.93
73.00	0.17	1.13	98.31	0.00	0.00	100.00	0.02	0.13	99.80
61.00	0.33	2.14	96.17	0.00	0.00	100.00	0.02	0.15	99.65
51.00	0.50	3.29	92.88	0.00	0.00	100.00	0.02	0.16	99.50
43.00	0.65	4.23	88.65	0.00	0.00	100.00	0.06	0.37	99.12
36.00	0.83	5.43	83.22	0.00	0.00	100.00	0.09	0.61	98.51
30.00	0.98	6.41	76.81	0.00	0.01	99.99	0.16	1.03	97.48
25.00	1.05	6.86	69.95	0.03	0.21	99.78	0.24	1.59	95.89
21.00	1.02	6.63	63.32	0.12	0.76	99.02	0.31	2.03	93.86
18.00	0.87	5.71	57.61	0.29	1.87	97.15	0.63	4.12	89.74
15.00	0.99	6.45	51.16	0.46	2.99	94.16	0.62	4.05	85.69
12.50	0.93	6.06	45.10	0.62	4.06	90.10	0.68	4.41	81.27
10.50	0.83	5.41	39.69	0.77	5.04	85.06	0.65	4.26	77.02
9.00	0.68	4.45	35.24	0.81	5.31	79.75	0.93	6.07	70.95
7.50	0.74	4.81	30.43	1.07	7.01	72.74	1.08	7.06	63.89
6.00	0.80	5.19	25.24	1.12	7.34	65.40	0.75	4.91	58.98
5.00	0.56	3.66	21.58	1.08	7.06	58.34	0.70	4.57	54.41
4.30	0.41	2.65	18.93	0.95	6.21	52.13	0.75	4.86	49.55
3.70	0.36	2.35	16.58	1.10	7.17	44.96	0.84	5.50	44.05
3.10	0.37	2.43	14.15	1.27	8.27	36.69	0.73	4.78	39.27
2.60	0.33	2.15	12.00	0.95	6.22	30.47	0.64	4.18	35.09
2.20	0.28	1.82	10.18	0.72	4.72	25.75	0.73	4.75	30.34
1.80	0.30	1.97	8.21	0.66	4.30	21.45	0.56	3.62	26.71
1.50	0.25	1.60	6.61	0.69	4.48	16.97	0.40	2.64	24.08
1.30	0.17	1.14	5.47	0.58	3.81	13.16	0.48	3.11	20.97
1.10	0.19	1.22	4.25	0.46	3.02	10.14	0.50	3.24	17.73
0.90	0.20	1.32	2.93	0.45	2.93	7.21	2.27	14.80	2.93

Tabla 47. Granulometrías de corrida experimental 2.4, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 2.4			Descarga 2.4 Experimental			Modelo ajuste Descarga 2.4		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.17	1.12	98.88	0.00	0.00	100.00	0.02	0.14	99.86
73.00	0.22	1.45	97.43	0.04	0.23	99.77	0.04	0.24	99.62
61.00	0.37	2.40	95.03	0.04	0.23	99.54	0.04	0.28	99.34
51.00	0.53	3.43	91.60	0.04	0.24	99.30	0.05	0.30	99.04
43.00	0.65	4.23	87.37	0.04	0.25	99.05	0.08	0.55	98.49
36.00	0.82	5.33	82.04	0.04	0.25	98.80	0.12	0.79	97.70
30.00	0.96	6.25	75.79	0.04	0.26	98.54	0.18	1.17	96.53
25.00	1.03	6.70	69.09	0.04	0.26	98.28	0.26	1.67	94.86
21.00	0.99	6.48	62.61	0.15	0.97	97.31	0.32	2.07	92.80
18.00	0.86	5.59	57.02	0.38	2.49	94.82	0.63	4.10	88.70
15.00	0.97	6.34	50.68	0.60	3.94	90.88	0.61	4.00	84.70
12.50	0.91	5.96	44.72	0.74	4.86	86.02	0.67	4.35	80.34
10.50	0.82	5.33	39.39	0.83	5.44	80.58	0.64	4.19	76.15
9.00	0.67	4.39	35.00	0.82	5.38	75.20	0.92	5.97	70.18
7.50	0.73	4.74	30.26	1.05	6.88	68.32	1.07	6.95	63.23
6.00	0.79	5.13	25.13	1.10	7.21	61.11	0.74	4.83	58.40
5.00	0.55	3.62	21.51	1.07	6.98	54.13	0.69	4.50	53.90
4.30	0.40	2.63	18.88	0.93	6.06	48.07	0.73	4.79	49.11
3.70	0.36	2.32	16.56	1.05	6.84	41.23	0.83	5.43	43.68
3.10	0.37	2.42	14.14	1.19	7.74	33.49	0.72	4.71	38.97
2.60	0.33	2.13	12.01	0.89	5.78	27.71	0.63	4.13	34.84
2.20	0.28	1.82	10.19	0.67	4.37	23.34	0.72	4.69	30.15
1.80	0.30	1.96	8.23	0.61	3.96	19.38	0.55	3.58	26.57
1.50	0.25	1.60	6.63	0.63	4.11	15.27	0.40	2.61	23.96
1.30	0.18	1.15	5.48	0.53	3.48	11.79	0.47	3.08	20.88
1.10	0.19	1.22	4.26	0.42	2.75	9.04	0.49	3.22	17.66
0.90	0.20	1.32	2.94	0.40	2.64	6.40	2.26	14.72	2.94

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 48. Granulometrías de corrida experimental 3.1, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 3.1			Descarga 3.1 Experimental			Modelo ajuste Descarga 3.1		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.03	0.18	99.82	0.00	0.00	100.00	-0.01	0.00	100.00
73.00	0.11	0.55	99.27	0.00	0.00	100.00	-0.02	0.00	100.00
61.00	0.26	1.35	97.92	0.00	0.00	100.00	-0.05	0.00	100.00
51.00	0.49	2.55	95.37	0.00	0.00	100.00	-0.07	0.00	100.00
43.00	0.71	3.72	91.65	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
36.00	0.98	5.11	86.54	0.02	0.08	99.92	0.13	0.69	99.31
30.00	1.19	6.24	80.30	0.20	1.04	98.88	0.35	1.84	97.47
25.00	1.31	6.87	73.43	0.45	2.37	96.51	0.60	3.14	94.33
21.00	1.30	6.82	66.61	0.76	3.96	92.55	0.77	4.05	90.28
18.00	1.16	6.04	60.57	1.10	5.75	86.80	1.14	5.98	84.31
15.00	1.33	6.97	53.60	1.37	7.14	79.66	1.24	6.48	77.83
12.50	1.27	6.64	46.96	1.48	7.72	71.94	1.31	6.85	70.98
10.50	1.14	5.97	40.99	1.41	7.35	64.59	1.25	6.52	64.47
9.00	0.94	4.89	36.10	1.19	6.21	58.38	1.39	7.28	57.18
7.50	1.01	5.27	30.83	1.32	6.90	51.48	1.55	8.10	49.09
6.00	1.07	5.62	25.21	1.22	6.40	45.08	1.31	6.86	42.23
5.00	0.74	3.88	21.33	1.08	5.65	39.43	1.04	5.44	36.79
4.30	0.53	2.78	18.55	0.89	4.65	34.78	0.90	4.73	32.06
3.70	0.46	2.42	16.13	0.97	5.09	29.69	0.90	4.69	27.37
3.10	0.47	2.48	13.65	1.07	5.58	24.11	0.81	4.25	23.12
2.60	0.41	2.15	11.50	0.78	4.06	20.05	0.69	3.62	19.50
2.20	0.34	1.80	9.70	0.59	3.06	16.99	0.66	3.47	16.03
1.80	0.37	1.91	7.79	0.53	2.78	14.21	0.58	3.01	13.02
1.50	0.29	1.54	6.25	0.56	2.93	11.28	0.43	2.26	10.76
1.30	0.21	1.10	5.15	0.48	2.51	8.77	0.38	1.99	8.77
1.10	0.22	1.16	3.99	0.00	0.00	8.77	0.39	2.03	6.74
0.90	0.24	1.24	2.75	0.38	1.98	6.79	0.92	4.80	1.94

Tabla 49. Granulometrías de corrida experimental 3.2, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 3.2			Descarga 3.2 Experimental			Modelo ajuste Descarga 3.2		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.03	0.18	99.82	0.00	0.00	100.00	-0.01	0.00	100.00
73.00	0.11	0.57	99.25	0.00	0.00	100.00	-0.02	0.00	100.00
61.00	0.27	1.40	97.85	0.00	0.00	100.00	-0.05	0.00	100.00
51.00	0.52	2.72	95.13	0.00	0.00	100.00	-0.08	0.00	100.00
43.00	0.77	4.04	91.09	0.01	0.05	99.95	-0.01	0.00	100.00
36.00	1.06	5.52	85.57	0.11	0.57	99.38	0.14	0.72	99.28
30.00	1.27	6.62	78.95	0.29	1.53	97.85	0.38	2.01	97.27
25.00	1.35	7.08	71.87	0.61	3.19	94.66	0.65	3.40	93.87
21.00	1.31	6.84	65.03	0.88	4.58	90.08	0.82	4.30	89.56
18.00	1.14	5.94	59.09	1.15	5.99	84.09	1.19	6.21	83.35
15.00	1.30	6.79	52.30	1.33	6.97	77.12	1.27	6.62	76.73
12.50	1.23	6.44	45.86	1.41	7.37	69.75	1.32	6.89	69.84
10.50	1.11	5.79	40.07	1.36	7.09	62.66	1.24	6.49	63.35
9.00	0.91	4.75	35.32	1.16	6.08	56.58	1.38	7.22	56.13
7.50	0.98	5.13	30.19	1.30	6.80	49.78	1.53	8.00	48.13
6.00	1.05	5.47	24.72	1.19	6.24	43.54	1.29	6.75	41.38
5.00	0.73	3.80	20.92	1.04	5.45	38.09	1.02	5.35	36.04
4.30	0.52	2.71	18.21	0.85	4.43	33.66	0.89	4.64	31.39
3.70	0.45	2.37	15.84	0.93	4.84	28.82	0.88	4.61	26.78
3.10	0.46	2.43	13.41	1.02	5.34	23.48	0.80	4.18	22.60
2.60	0.40	2.11	11.30	0.75	3.91	19.57	0.68	3.55	19.05
2.20	0.34	1.77	9.53	0.56	2.95	16.62	0.65	3.42	15.64
1.80	0.36	1.88	7.65	0.52	2.70	13.92	0.57	2.96	12.68
1.50	0.29	1.52	6.13	0.55	2.85	11.07	0.43	2.23	10.45
1.30	0.20	1.07	5.06	0.47	2.45	8.62	0.37	1.95	8.50
1.10	0.22	1.14	3.92	0.38	1.97	6.65	0.38	1.99	6.51
0.90	0.23	1.22	2.70	0.37	1.92	4.73	0.90	4.72	1.79

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 50. Granulometrías de corrida experimental 3.3, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 3.3			Descarga 3.3 Experimental			Modelo ajuste Descarga 3.3		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.03	0.14	99.86	0.00	0.00	100.00	-0.01	0.00	100.00
73.00	0.12	0.61	99.25	0.00	0.00	100.00	-0.03	0.00	100.00
61.00	0.28	1.49	97.76	0.00	0.00	100.00	-0.06	0.00	100.00
51.00	0.52	2.71	95.05	0.00	0.00	100.00	-0.07	0.00	100.00
43.00	0.73	3.84	91.21	0.01	0.03	99.97	0.01	0.04	99.96
36.00	0.99	5.20	86.01	0.10	0.50	99.47	0.15	0.77	99.19
30.00	1.22	6.38	79.63	0.31	1.63	97.84	0.37	1.92	97.26
25.00	1.34	7.02	72.61	0.68	3.54	94.30	0.62	3.24	94.02
21.00	1.33	6.97	65.64	0.90	4.71	89.59	0.80	4.16	89.87
18.00	1.17	6.12	59.52	1.08	5.66	83.93	1.17	6.13	83.74
15.00	1.34	7.00	52.52	1.23	6.45	77.48	1.27	6.62	77.13
12.50	1.26	6.59	45.93	1.36	7.13	70.35	1.33	6.94	70.18
10.50	1.13	5.90	40.03	1.40	7.32	63.03	1.26	6.56	63.62
9.00	0.92	4.82	35.21	1.25	6.54	56.49	1.40	7.31	56.31
7.50	0.99	5.18	30.03	1.42	7.42	49.07	1.55	8.09	48.22
6.00	1.06	5.52	24.51	1.30	6.80	42.27	1.30	6.82	41.40
5.00	0.73	3.82	20.69	1.12	5.84	36.43	1.03	5.39	36.01
4.30	0.52	2.72	17.97	0.89	4.63	31.80	0.90	4.68	31.33
3.70	0.45	2.36	15.61	0.93	4.84	26.96	0.89	4.64	26.69
3.10	0.46	2.41	13.20	0.98	5.12	21.84	0.80	4.19	22.50
2.60	0.40	2.08	11.12	0.70	3.65	18.19	0.68	3.55	18.95
2.20	0.33	1.73	9.39	0.53	2.75	15.44	0.65	3.40	15.55
1.80	0.35	1.85	7.54	0.48	2.51	12.93	0.56	2.94	12.61
1.50	0.28	1.49	6.05	0.51	2.67	10.26	0.42	2.20	10.41
1.30	0.20	1.05	5.00	0.44	2.29	7.97	0.37	1.93	8.47
1.10	0.21	1.12	3.88	0.35	1.85	6.12	0.38	1.98	6.50
0.90	0.23	1.21	2.67	0.35	1.81	4.31	0.90	4.70	1.80

Tabla 51. Granulometrías de corrida experimental 3.4, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 3.4			Descarga 3.4 Experimental			Modelo ajuste Descarga 3.4		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.03	0.17	99.83	0.00	0.00	100.00	-0.01	0.00	100.00
73.00	0.10	0.53	99.30	0.00	0.00	100.00	-0.02	0.00	100.00
61.00	0.25	1.33	97.97	0.00	0.00	100.00	-0.05	0.00	100.00
51.00	0.49	2.56	95.41	0.00	0.00	100.00	-0.08	0.00	100.00
43.00	0.72	3.78	91.63	0.00	0.00	100.00	-0.01	0.00	100.00
36.00	1.00	5.21	86.42	0.03	0.17	99.83	0.13	0.67	99.33
30.00	1.22	6.39	80.03	0.20	1.02	98.81	0.35	1.85	97.48
25.00	1.33	6.98	73.05	0.59	3.06	95.75	0.61	3.20	94.28
21.00	1.31	6.87	66.18	0.91	4.76	90.99	0.79	4.12	90.16
18.00	1.15	6.03	60.15	1.20	6.25	84.74	1.16	6.06	84.10
15.00	1.33	6.94	53.21	1.40	7.31	77.43	1.25	6.54	77.56
12.50	1.27	6.63	46.58	1.52	7.93	69.50	1.32	6.88	70.68
10.50	1.14	5.96	40.62	1.51	7.90	61.60	1.25	6.54	64.14
9.00	0.94	4.90	35.72	1.31	6.85	54.75	1.40	7.31	56.83
7.50	1.01	5.27	30.45	1.44	7.52	47.23	1.55	8.12	48.72
6.00	1.07	5.61	24.84	1.28	6.68	40.55	1.31	6.87	41.85
5.00	0.74	3.88	20.96	1.08	5.65	34.90	1.04	5.44	36.41
4.30	0.53	2.76	18.20	0.85	4.44	30.46	0.90	4.73	31.68
3.70	0.46	2.39	15.81	0.89	4.64	25.82	0.89	4.68	27.00
3.10	0.47	2.44	13.37	0.94	4.91	20.91	0.81	4.23	22.78
2.60	0.40	2.09	11.28	0.68	3.53	17.38	0.68	3.57	19.20
2.20	0.34	1.76	9.52	0.51	2.65	14.73	0.66	3.44	15.76
1.80	0.36	1.86	7.66	0.46	2.42	12.31	0.57	2.96	12.80
1.50	0.29	1.51	6.15	0.49	2.54	9.77	0.43	2.23	10.57
1.30	0.20	1.06	5.09	0.42	2.19	7.58	0.37	1.95	8.62
1.10	0.22	1.14	3.95	0.33	1.75	5.83	0.38	2.00	6.62
0.90	0.24	1.23	2.72	0.33	1.70	4.13	0.91	4.75	1.87

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 52. Granulometrías de corrida experimental 4.1, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 4.1			Descarga 4.1 Experimental			Modelo ajuste Descarga 4.1		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.02	0.10	99.90	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.08	0.42	99.48	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
61.00	0.22	1.14	98.34	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	99.99
51.00	0.46	2.40	95.94	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	99.99
43.00	0.73	3.80	92.14	0.00	0.02	99.98	0.05	0.24	99.75
36.00	1.04	5.45	86.69	0.05	0.26	99.72	0.12	0.63	99.12
30.00	1.29	6.73	79.96	0.17	0.88	98.84	0.26	1.37	97.75
25.00	1.40	7.30	72.66	0.37	1.96	96.88	0.43	2.27	95.48
21.00	1.36	7.09	65.57	0.57	2.98	93.90	0.55	2.89	92.59
18.00	1.18	6.17	59.40	0.82	4.31	89.59	1.04	5.45	87.15
15.00	1.35	7.04	52.36	1.09	5.71	83.88	0.93	4.85	82.30
12.50	1.27	6.65	45.71	1.30	6.80	77.08	0.99	5.16	77.13
10.50	1.14	5.94	39.77	1.37	7.18	69.90	0.94	4.90	72.23
9.00	0.93	4.87	34.90	1.26	6.61	63.29	1.37	7.15	65.07
7.50	1.00	5.21	29.69	1.50	7.83	55.46	1.47	7.68	57.40
6.00	1.06	5.52	24.17	1.43	7.47	47.99	0.90	4.73	52.67
5.00	0.73	3.80	20.37	1.26	6.61	41.38	0.94	4.90	47.77
4.30	0.52	2.70	17.67	1.01	5.30	36.08	1.03	5.39	42.38
3.70	0.45	2.33	15.34	1.08	5.63	30.45	1.12	5.88	36.50
3.10	0.46	2.38	12.96	1.15	6.00	24.45	0.88	4.61	31.89
2.60	0.39	2.04	10.92	0.82	4.27	20.18	0.75	3.91	27.97
2.20	0.33	1.71	9.21	0.61	3.17	17.01	0.85	4.43	23.55
1.80	0.35	1.81	7.40	0.55	2.85	14.16	0.57	2.99	20.56
1.50	0.28	1.46	5.94	0.56	2.95	11.21	0.41	2.14	18.42
1.30	0.20	1.04	4.90	0.48	2.50	8.71	0.53	2.79	15.63
1.10	0.21	1.10	3.80	0.38	1.99	6.72	0.52	2.71	12.92
0.90	0.23	1.18	2.62	0.37	1.94	4.78	1.97	10.30	2.62

Tabla 53. Granulometrías de corrida experimental 4.2, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 4.2			Descarga 4.2 Experimental			Modelo ajuste Descarga 4.2		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.03	0.17	99.83	0.00	0.00	100.00	-0.01	0.00	100.00
73.00	0.11	0.58	99.25	0.00	0.00	100.00	-0.03	0.00	100.00
61.00	0.27	1.42	97.83	0.00	0.00	100.00	-0.05	0.00	100.00
51.00	0.50	2.59	95.24	0.00	0.00	100.00	-0.03	0.00	100.00
43.00	0.69	3.62	91.62	0.00	0.00	100.00	0.08	0.40	99.60
36.00	0.93	4.88	86.74	0.00	0.02	99.98	0.21	1.08	98.53
30.00	1.13	5.89	80.85	0.08	0.43	99.55	0.39	2.03	96.50
25.00	1.23	6.44	74.41	0.24	1.28	98.27	0.57	2.98	93.52
21.00	1.23	6.42	67.99	0.46	2.43	95.84	0.68	3.54	89.98
18.00	1.09	5.72	62.27	0.67	3.51	92.33	1.07	5.62	84.36
15.00	1.29	6.72	55.55	0.86	4.51	87.82	1.02	5.36	79.00
12.50	1.25	6.53	49.02	1.03	5.37	82.45	1.08	5.64	73.36
10.50	1.15	6.00	43.02	1.13	5.92	76.53	1.03	5.37	67.99
9.00	0.96	5.02	38.00	1.11	5.82	70.71	1.33	6.97	61.02
7.50	1.05	5.48	32.52	1.41	7.36	63.35	1.44	7.55	53.47
6.00	1.13	5.89	26.63	1.45	7.56	55.79	1.05	5.47	48.01
5.00	0.79	4.11	22.52	1.35	7.08	48.71	0.97	5.10	42.91
4.30	0.56	2.93	19.59	1.13	5.92	42.79	0.98	5.12	37.79
3.70	0.49	2.56	17.03	1.23	6.42	36.37	1.03	5.36	32.42
3.10	0.50	2.61	14.42	1.33	6.96	29.41	0.85	4.44	27.99
2.60	0.43	2.25	12.17	0.96	5.00	24.41	0.72	3.77	24.22
2.20	0.36	1.90	10.27	0.71	3.73	20.68	0.77	4.01	20.20
1.80	0.38	2.01	8.26	0.64	3.36	17.32	0.57	2.99	17.21
1.50	0.31	1.63	6.63	0.67	3.52	13.80	0.42	2.21	15.01
1.30	0.22	1.15	5.48	0.57	3.00	10.80	0.48	2.49	12.52
1.10	0.24	1.23	4.25	0.46	2.40	8.40	0.47	2.44	10.07
0.90	0.25	1.32	2.93	0.45	2.35	6.05	1.49	7.79	2.28

Modelación matemática de la distribución granulométrica del producto de un molino vertical HIGMill® en circuito abierto.

Tabla 54. Granulometrías de corrida experimental 4.3, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 4.3			Descarga 4.3 Experimental			Modelo ajuste Descarga 4.3		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.06	0.30	99.70	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.13	0.68	99.02	0.00	0.00	100.00	0.01	0.05	99.95
61.00	0.29	1.50	97.52	0.00	0.00	100.00	0.02	0.09	99.86
51.00	0.51	2.65	94.87	0.00	0.00	100.00	0.03	0.16	99.70
43.00	0.72	3.79	91.08	0.00	0.00	100.00	0.10	0.50	99.20
36.00	1.00	5.23	85.85	0.00	0.00	100.00	0.17	0.88	98.32
30.00	1.24	6.46	79.39	0.02	0.12	99.88	0.29	1.49	96.83
25.00	1.35	7.05	72.34	0.20	1.04	98.84	0.43	2.27	94.56
21.00	1.31	6.86	65.48	0.36	1.88	96.96	0.54	2.83	91.73
18.00	1.14	5.96	59.52	0.63	3.27	93.69	1.02	5.31	86.42
15.00	1.30	6.82	52.70	0.93	4.85	88.84	0.90	4.70	81.72
12.50	1.24	6.47	46.23	1.15	6.01	82.83	0.95	4.99	76.73
10.50	1.12	5.84	40.39	1.24	6.48	76.35	0.90	4.71	72.02
9.00	0.92	4.82	35.57	1.17	6.12	70.23	1.32	6.92	65.11
7.50	0.99	5.19	30.38	1.44	7.55	62.68	1.42	7.45	57.66
6.00	1.06	5.53	24.85	1.46	7.65	55.03	0.88	4.59	53.07
5.00	0.73	3.83	21.02	1.35	7.07	47.96	0.92	4.80	48.27
4.30	0.52	2.73	18.29	1.12	5.85	42.11	1.02	5.33	42.94
3.70	0.45	2.37	15.92	1.20	6.30	35.81	1.12	5.83	37.11
3.10	0.46	2.42	13.50	1.31	6.84	28.97	0.88	4.59	32.52
2.60	0.40	2.10	11.40	0.94	4.93	24.04	0.74	3.89	28.63
2.20	0.34	1.76	9.64	0.71	3.70	20.34	0.85	4.45	24.18
1.80	0.36	1.89	7.75	0.64	3.34	17.00	0.57	2.98	21.19
1.50	0.29	1.52	6.23	0.67	3.49	13.51	0.41	2.16	19.03
1.30	0.21	1.08	5.15	0.57	2.98	10.53	0.55	2.85	16.18
1.10	0.22	1.15	4.00	0.46	2.38	8.15	0.53	2.77	13.41
0.90	0.24	1.24	2.76	0.44	2.32	5.83	2.04	10.65	2.76

Tabla 55. Granulometrías de corrida experimental 4.4, modelo de matrices.

Micrómetros	Alimentación 4.4			Descarga 4.4 Experimental			Modelo ajuste Descarga 4.4		
	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante	Peso retenido, ton	% Retenido	% Acumulado pasante
87.00	0.03	0.16	99.84	0.00	0.00	100.00	0.00	0.00	100.00
73.00	0.10	0.54	99.30	0.00	0.00	100.00	0.00	0.01	99.99
61.00	0.27	1.41	97.89	0.00	0.00	100.00	0.00	0.02	99.97
51.00	0.51	2.67	95.22	0.00	0.00	100.00	0.01	0.08	99.89
43.00	0.75	3.90	91.32	0.00	0.00	100.00	0.08	0.42	99.48
36.00	1.01	5.28	86.04	0.00	0.00	100.00	0.17	0.88	98.60
30.00	1.21	6.34	79.70	0.02	0.08	99.92	0.30	1.57	97.03
25.00	1.30	6.82	72.88	0.17	0.89	99.03	0.45	2.35	94.68
21.00	1.27	6.66	66.22	0.34	1.80	97.23	0.54	2.81	91.87
18.00	1.11	5.83	60.39	0.62	3.23	94.00	0.99	5.18	86.69
15.00	1.28	6.71	53.68	0.91	4.77	89.23	0.87	4.57	82.12
12.50	1.23	6.43	47.25	1.15	6.02	83.21	0.92	4.83	77.29
10.50	1.11	5.83	41.42	1.27	6.66	76.55	0.88	4.58	72.71
9.00	0.92	4.83	36.59	1.20	6.28	70.27	1.30	6.80	65.91
7.50	1.00	5.25	31.34	1.44	7.51	62.76	1.40	7.32	58.59
6.00	1.08	5.65	25.69	1.40	7.30	55.46	0.86	4.48	54.10
5.00	0.75	3.93	21.76	1.27	6.66	48.80	0.91	4.78	49.33
4.30	0.54	2.81	18.95	1.07	5.61	43.19	1.02	5.36	43.97
3.70	0.47	2.45	16.50	1.19	6.22	36.97	1.13	5.89	38.08
3.10	0.48	2.52	13.98	1.32	6.90	30.07	0.89	4.63	33.45
2.60	0.42	2.17	11.81	0.96	5.04	25.03	0.76	3.97	29.48
2.20	0.35	1.83	9.98	0.72	3.78	21.25	0.87	4.54	24.93
1.80	0.37	1.96	8.02	0.66	3.43	17.82	0.58	3.06	21.88
1.50	0.30	1.58	6.44	0.69	3.60	14.22	0.42	2.22	19.65
1.30	0.21	1.12	5.32	0.59	3.08	11.14	0.56	2.94	16.71
1.10	0.23	1.19	4.13	0.47	2.47	8.67	0.55	2.86	13.85
0.90	0.24	1.28	2.85	0.46	2.43	6.24	2.10	11.00	2.85