

**ESTUDIO DE MOLIENDA DE CARBONES PARA LA PRODUCCIÓN DE
COMBUSTIBLES TIPO CCTA BAJO LOS ESQUEMAS DE USO RACIONAL DE
LA ENERGÍA**

CARLOS ARTURO GARCÍA BONILLA

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FISCOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2007

**ESTUDIO DE MOLIENDA DE CARBONES PARA LA PRODUCCIÓN DE
COMBUSTIBLES TIPO CCTA BAJO LOS ESQUEMAS DE USO RACIONAL DE
LA ENERGÍA**

CARLOS ARTURO GARCÍA BONILLA

**Trabajo de grado para optar al título de
Ingeniero Químico**

Director

**M. Sc. Jorge Luís Grosso Vargas
Ingeniero Químico**

**UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER
FACULTAD DE INGENIERÍAS FÍSICOQUÍMICAS
ESCUELA DE INGENIERÍA QUÍMICA
BUCARAMANGA**

2007

Resumen

Titulo: ESTUDIO DE MOLIENDA DE CARBONES PARA LA PRODUCCIÓN DE COMBUSTIBLES TIPO CCTA BAJO LOS ESQUEMAS DE USO RACIONAL DE LA ENERGÍA.*

Autor: Carlos Arturo García Bonilla**

Palabras Clave: Molienda, Molinos de bolas, Carbón, Uso Racional de la Energía, CCTA.

Contenido: El propósito de este proyecto es el de determinar las mejores condiciones de molienda de carbón en un molino horizontal de bolas operado en forma discontinua, por vía seca. Los criterios de molienda están dados por los requerimientos de granulometría para la producción de CCTA (molienda superfina), y los esquemas de Uso Racional de la Energía. Se ha utilizado un diseño factorial 2^3 tomando como factores: "Distribución de tamaño de los cuerpos moledores", "Porcentaje de la velocidad crítica del tambor" y "Porcentaje de llenado del volumen disponible para el material". Este último referido a los intersticios de las bolas utilizadas en una carga del 50% del volumen total del molino. La variable de respuesta utilizada fue "Energía Aprovechada en conminución" la cual fue calculada a partir de la ley de Bond.

Los resultados obtenidos reflejan que para un alimento de carbón triturado las mejores condiciones de molienda eran: Alto porcentaje de velocidad crítica, bajo porcentaje de llenado y una distribución de bolas en la que predominan las bolas de mayor tamaño (2 ½ pulgada). Se estableció que el Llenado presentaba el efecto individual mas importante seguido de la Velocidad, mientras que la configuración de bolas tenía un efecto individual mínimo; sin embargo la interacción más importante fue la existente entre la Distribución de bolas y el llenado del molino. Adicionalmente se realizó una comparación entre carbones de diferentes regiones, y una operación en serie con un molino de martillos en la cual se reflejó de nuevo la importancia del efecto de la interacción de este factor con los otros en lugar de su efecto individual.

* Proyecto de grado

**Facultad de Ingenierías Físico-Químicas, Escuela de Ingeniería Química

Director: Jorge Luís Grosso Vargas

Abstract

Title: GRINDING STUDY OF COALS FOR PRODUCTION OF CCTA TYPE FUELS UNDER THE OUTLINES OF RACIONAL USE OF ENERGY*

Autor: Carlos Arturo García Bonilla**

Keywords: Grinding, Ball Mill, Coal, Rational Use of Energy, CCTA.

Content: The purpose of this project is the one of determining the best conditions of coal grinding in a horizontal ball mill in batch, for dry operation. The mill approaches are given by the requirements of grain for the production of CCTA (superfine grinding), and the outlines of Rational Use of Energy. A 2³ factorial design has been used taking as factors: "Size distribution of balls", "Percentage of the critical speed of the drum" and "Percentage of filled with the available volume for the material". This last one referred to the interstices of the balls used in a load of 50% of the total volume of the mill. The response variable was "Taken advantage of Energy in grinding" which was calculated starting from the law of Bond.

The obtained results reflect that for a food of crushed coal the best mill conditions were: High percentage of critical speed, low percentage of having filled and a distribution of balls in which the balls of more size prevail (2 ½ inch). It was settled down that the Filled presented the individual most important effect, followed by the Speed, while the configuration of balls had a minimum individual effect; however the most important interaction was the existent one between the Distribution of balls and the filled of the mill. Additionally it was carried out a comparison among coal of different regions, and an operation in series with a hammer mill in which was reflected the importance of the effect of the interaction of this factor again with the other ones instead of its individual effect.

* Degree project

** Faculty of Physic-Chemical Sciences, School of Chemical Engineering.

Director: Jorge Luís Grosso Vargas.

AGRADECIMIENTOS

Sería casi superfluo nombrar a Dios, pues todo lo que hacemos viene de el y a el se dirige, pero deseo agradecerle por que cada día me ha representado una nueva oportunidad de empezar.

Para alcanzar cada instante que vivimos ha sido necesario cada uno de los instantes previos a el. Por ello debo agradecer, no solo a cada persona, sino a cada cosa que he encontrado en mi camino pues ellas me han traído aquí.

Haré, sin embargo, una especial mención de aquellos que directamente participaron en este proyecto.

En primer lugar debo mencionar a mi madre, Myriam Bonilla, y mi padre, Carlos García; quienes siempre han creído en mí; mi hijo, Carlos Jr, quien ha sido mi mayor motivo para continuar en el camino; y a mi esposa Vitalia González, quien ha estado a mi lado a lo largo de el. Al profesor Jorge Grosso quien ha sido, además de director de este proyecto, otro abuelo para mi hijo, y otro padre para mí. A mis hermanos, primos y tíos, que siempre han estado velando por mí. A mis amigos que han respondido al verdadero significado de esa palabra. Al personal del laboratorio de Operaciones Unitarias, quienes además de consejo profesional, proporcionan toneladas de tinto a los investigadores. Al señor Ángel Acuña y el personal de INAL, quienes muy amablemente me permitieron realizar las pruebas en su taller y siempre estuvieron para darme una mano. Y a tantas y tantas personas que en un momento u otro me proporcionaron un apoyo a lo largo de este proyecto, pues, afortunadamente, como dice la canción, “siempre tuve más amigos de los que pude contar”. GRACIAS...

TABLA DE CONTENIDO

1.	Introducción	1
2.	Conceptos Teóricos	4
2.1.	CCTA	4
2.2.	URE	4
2.3.	Selección de molinos	5
2.4.	Variables determinantes	6
2.4.1.	Diámetro	6
2.4.2.	Velocidad de rotación	6
2.4.3.	Porcentaje de llenado	8
2.4.4.	Tamaño del alimento	8
2.4.5.	Tamaño de las bolas	9
2.4.6.	Tamaño requerido del producto	10
2.4.7.	Consumo energético	10
3.	Metodología Experimental	12
3.1.	Caracterización del carbón	13
3.2.	Trituración del carbón	13
3.3.	Adecuación del molino	16
3.3.1.	Llenado del molino	18
3.3.2.	Determinación del tiempo de molienda.	18
3.4.	Ejecución del experimento principal	19
3.4.1.	Diseño experimental	20
3.4.2.	Pruebas en blanco	20
3.5.	Pruebas adicionales	21
3.5.1.	Carbón de otras procedencias	21
3.5.2.	Molino operado en serie con otros equipos	21
4.	Análisis de Resultados	22
4.1.	Determinación del tiempo de molienda.	22
4.2.	Pruebas en blanco	23
4.3.	Experimento principal	24

4.3.1.	Cálculo de los efectos	25
4.3.2.	Resultados	26
4.4.	Pruebas adicionales	30
4.4.1.	Carbones de otras procedencias	30
4.4.2.	Molino operado en serie con otros equipos	32
5.	Conclusiones	33
6.	Recomendaciones	35
7.	Bibliografía	36

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Comparación de diferentes molinos	13
Tabla 2. Análisis próximo	21
Tabla 3. Hoja de especificaciones del molino	24
Tabla 4. Bolas disponibles	25
Tabla 5. Piñones	25
Tabla 6. Variación de factores	28
Tabla 7. Diseño Experimental	28
Tabla 8. Consumo de corriente en blanco	31
Tabla 9. Resultados experimentales, efectos e interacciones	34
Tabla 10. Comparación de molienda de carbones de diferentes procedencias	38
Tabla 11. Resultados de carbones de otras procedencias	39

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Simulación del efecto de %Nc	15
Figura 2. Simulación del efecto de %Llenado	16
Figura 3. Diagrama de flujo del desarrollo experimental	20
Figura 4. Distribución de tamaños retenido del triturado	21
Figura 5. Distribución de porcentaje acumulativo inferior de triturado	23
Figura 6. Molino de bolas	24
Figura 7. Bolas disponibles	25
Figura 8. Diagrama de flujo de operación del molino	27
Figura 9. Cambio del tamaño de partícula con el tiempo	30
Figura 10. Respuesta obtenida para cada experimento	32
Figura 11. Efecto individual de cada factor	33
Figura 12. Efecto de los factores y sus interacciones	33
Figura 13. Tamaño alcanzado en la primera etapa	35
Figura 14. Efecto de los diferentes factores a lo largo del tiempo.	36
Figura 15. Molienda de carbones de diferentes procedencias	39
Figura 16. Molino operado en serie con molino de martillos	40

1. INTRODUCCIÓN

El carbón ha sido uno de los recursos naturales más importantes en el desarrollo de Colombia. Después del petróleo es el producto de mayor exportación en nuestro país. Sin embargo, aun teniendo esto en cuenta, puede considerarse que nuestro carbón se encuentra subutilizado pues son otros países quienes aprovechan el desarrollo energético y tecnológico que proporciona su combustión. Por otro lado son conocidos los problemas relacionados con el uso del carbón, particularmente los problemas ambientales que involucran producción de CO, compuestos de azufre y nitrógeno, y material particulado. Estos problemas han venido siendo estudiados desde la década de los 80's cuando entró en auge el uso de Tecnologías Limpias del Carbón (TLC's), con las cuales se han reducido considerablemente el impacto ambiental negativo de los procesos que involucran el uso del carbón al tiempo que se ha mejorado considerablemente el rendimiento de estos.

El uso de CCTA es una de las principales TLC's desarrolladas en Colombia. Esta consiste en una emulsión de Carbón pulverizado y Combustóleo en agua usando un surfactante para estabilizar la emulsión. Este combustible se perfila como una de las promesas en el campo energético de Colombia, pues presenta amplias ventajas tanto operativas como ambientales. Para su investigación e implementación se ha formulado el proyecto: "SELECCIÓN DE CARBONES PARA LA APLICACIÓN DEL COMBUSTIBLE "TIPO CCTA" EN HORNOS DE CERÁMICA DENTRO DE ESQUEMAS DE PRODUCCIÓN LIMPIA Y USO RACIONAL DE ENERGIA - DEPARTAMENTOS DE BOYACÁ, SANTANDER Y NORTE DE SANTANDER" dirigido por el *Ing. Químico M. Sc. Jorge Luís Grosso Vargas* y que propende por una unificación tecnológica, académica y productiva de los tres departamentos de la región en torno a un tema común. Proyecto que involucra múltiples objetivos dentro de los cuales se encuentra: "Determinar los tipos de procesos de molienda y sus condiciones de operación que faciliten la obtención del tamaño y distribución de partícula requeridos para el lavado de carbones y la formación de combustibles tipo CCTA, dentro de esquemas de Uso Racional de Energía y Desarrollo Sostenible".

Bajo este lineamiento, se ha realizado este estudio; cuyos objetivos específicos se han formulado de la siguiente manera:

- ✓ Determinar el consumo energético en la molienda de carbón hasta la granulometría requerida bajo diferentes configuraciones de la carga de cuerpos moledores (tamaño y cantidad); así como el tiempo de molienda y el número de revoluciones por minuto empleadas.
- ✓ Analizar el comportamiento diacrónico de la distribución de tamaño de partícula, relacionándolo con el consumo energético para diferentes tipos de carbones representativos de las zonas de Santander, Norte de Santander y La Guajira.

Para su cumplimiento se ha utilizado un molino horizontal de bolas en operación discontinua en el cual se han molido muestras de carbón por vía seca, de acuerdo con un diseño factorial 2^3 .

Es de esperar que una distribución de bolas en la cual predominen tamaños de bolas pequeños, produzca una granulometría más fina en la salida de carbón por la mayor cantidad de área superficial disponible para la molienda; de igual manera una mayor velocidad de rotación (inferior a la crítica, por supuesto) probablemente será más eficiente y un menor cantidad de carbón es más fácil de moler que una mayor. Nuestro interés se centra en cuantificar estos efectos y especialmente sus interacciones: el incremento de carbón en la carga probablemente producirá una granulometría más gruesa en la salida pero ¿Este incremento en el tamaño de salida es muy significativo?, o ¿Será lo suficientemente pequeño como para justificar el procesamiento de un volumen mayor de carbón? Estas y otras preguntas relacionadas han obtenido respuesta en el decurso de esta investigación.

Se ha establecido, por ejemplo, que contrariamente a lo que se esperaba, la granulometría más fina se ha obtenido con una configuración de bolas en la que predominan las bolas de mayor tamaño. Otro de los aspectos a destacar es el establecimiento de dos etapas de molienda. En la primera, que ocurre en los primeros 15 minutos, se realiza la mayor parte de la conminución a una reducción de tamaño muy alta y prácticamente lineal con el tiempo; mientras en la segunda

el comportamiento del tamaño es mucho más estable y tiende a variar poco con el tiempo siguiendo un patrón logarítmico. A una mayor tasa de reducción en la primera etapa, menor será el tamaño final alcanzado.

Es posible afirmar que en este trabajo se han alcanzado resultados útiles para la aplicación a la molienda fina de carbón, existen algunos aspectos prometedores para futuras investigaciones como la molienda por vía húmeda y la aplicación a sistemas continuos pero los conocimientos actualmente adquiridos tendrán, sin duda, un impacto favorable al aplicarse a las plantas industriales de molienda fina de carbón.

2. CONCEPTOS TEÓRICOS

2.1. CCTA

La CCTA, siglas de Carbón, Combustóleo, Tensoactivo y Agua, es una solución planteada a varios problemas de los hidrocarburos nacionales. En el país existen grandes reservas de crudo pesado, pero este presenta grandes dificultades en el transporte debido a su alta viscosidad, la emulsión de este crudo en agua, utilizando un surfactante estabilizador, mejora dramáticamente las propiedades reológicas de este permitiendo un fácil transporte por bombeo convencional. Si a esta ventaja sumamos el procesamiento fino de carbón, el cual permite un lavado más profundo de las impurezas y el azufre contenido en el carbón; y, debido al incremento del área activa mejora las propiedades de combustión, llegando esta a ser casi completa, por lo que disminuyen drásticamente los desechos de combustión. Obtenemos de la mezcla de ellos la CCTA en ella las microgotas de crudo forman micelas alrededor de los microgramos de carbón. Estas micelas forman una emulsión en el agua gracias al efecto hidrófilo del surfactante por lo que se obtiene un líquido de viscosidad cercana a la del agua que, sin embargo posee un poder calorífico superior al del carbón.

2.2. URE

El término “Uso Racional de la Energía” fue acuñado alrededor de los años 80 para referirse especialmente al ahorro de corriente eléctrica. Este concepto limitado pronto alcanzó una mayor dimensión para ser aplicado a un amplio abanico de aspectos como integración térmica, procedimientos de gestión en organizaciones, e incluso técnicas de estudio. Uno de los aspectos más destacados de los esquemas URE, es el de CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA(3). Este estudio gira en torno a la caracterización energética del proceso de molienda de carbón; para ello se ha identificado la variable “Energía útil” la cual consiste en la energía aprovechada en la conminución, que puede ser calculada de acuerdo a leyes energéticas que serán explicadas al final de este capítulo.

2.3. Selección de molinos

Para la selección del molino se ha realizado un estudio bibliográfico previo (4) en el cual se realizó una comparación entre diferentes tipos de molinos de acuerdo a los siguientes criterios.

- ✓ Escala de producción.
- ✓ Eficiencia energética.
- ✓ Versatilidad.
- ✓ Disponibilidad.
- ✓ Facilidad de construcción.
- ✓ Mantenimiento.
- ✓ Desgaste.

En la siguiente tabla podemos observar el porcentaje en el cual cada molino satisface todos los criterios.

Molino	Idoneidad
Horizontal	90%
Planetario	70%
Atritor	57,5%
Vibratorio	70%
Vertimill	75%
E-mill	70%
Martillos	55%
Anillo y rodillos	65%
Chorro	65
Szego	77,5

Tabla 1. Comparación de los diferentes molinos para pulverización de carbón.

Se puede observar fácilmente que el molino horizontal de bolas es el más indicado para el procesamiento de carbón con miras a la producción de CCTA.

Los molinos de bolas son utilizados como etapa final de conminución, dependiendo del uso para el cual son diseñados pueden tener una relación Longitud a Diámetro mayor o menor que 1; cuando esta es menor que 1 se suele hablar de molinos de cascada, ente 1 y 2,5 se habla simplemente de molinos de

bolas, cuando la relación es mayor de 3 se les llama molinos de tubo, y en algunos casos se encuentran divididos en compartimientos dentro de los cuales se va realizando la conminución por etapas. Un caso especial de los molinos de bolas son los molinos de guijarros en los cuales, como su nombre lo indica, se utilizan guijarros como medio de molienda.

A continuación estudiaremos más en detalle las partes y el funcionamiento de los molinos de bolas.

2.4. Variables determinantes

2.4.1. Diámetro

El diámetro del molino es prácticamente el aspecto característico que determina el funcionamiento del molino y de él dependen la mayor parte de las dimensiones del molino. A un mayor diámetro mayor será el impacto que sufrirán las bolas o las partículas al caer, por ello generalmente se utiliza un mayor diámetro en la medida que el tamaño de las partículas del alimento sea mayor. De acuerdo al método de diseño empleado el diámetro puede ser determinado enteramente por el criterio del diseñador o mediante un método iterativo para determinar el diámetro óptimo a utilizar. *En nuestro caso trabajaremos con un molino preexistente por lo que esta característica se encuentra fijada de antemano.*

2.4.2. Velocidad de rotación

Si la velocidad de rotación del molino es demasiado baja desaparecerá el efecto de cascada y la molienda ocurrirá solo por frotación entre las partículas y las bolas, si embargo si esta es demasiado alta ocurrirá una centrifugación de las bolas lo cual, por supuesto, disminuirá la eficiencia del molino. La velocidad límite en la cual esto ocurre es conocida como velocidad crítica y puede determinarse mediante un simple balance mecánico de las bolas.

La centrifugación de una bola ocurre cuando el peso de ella se encuentra balanceado con la fuerza centrífuga:

$$\frac{mV^2}{R} = mg \cos \alpha$$

Siendo m la masa de la bola, R la distancia del centro del tambor al centro de la bola, g la aceleración gravitacional, α el ángulo formado con la vertical por un radio que señale la posición de la bola, y V la velocidad tangencial de la bola dada por la ecuación

$$V = \frac{2\pi RN}{60}$$

En donde N es el número de revoluciones por minuto del tambor.

Despejando y reemplazando los valores tenemos:

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{(D-d)}}$$

Como el diámetro de la bola suele ser despreciable comparado con el del tambor podemos escribir la ecuación de la siguiente manera:

$$N_c = \frac{42.3}{\sqrt{D}}$$

La cual es la ecuación generalmente utilizada en el diseño de molinos de bolas (9).

Este balance sin embargo parte del supuesto de que las bolas no sufren deslizamiento por las paredes del tambor, lo cual no es cierto particularmente si no se utilizan elevadores, pero es útil como criterio de partida y proporciona cierto margen de seguridad en el diseño. En la figura 1 podemos observar una simulación del comportamiento del material bajo diferentes porcentajes de la velocidad crítica. Es fácil notar que a un mayor porcentaje de N_c mayor es el efecto de cascada.

El comportamiento de un molino a una velocidad de rotación dada depende no de la velocidad absoluta de rotación, sino de la relación que esta tenga con la velocidad crítica, la cual es función del diámetro; así,

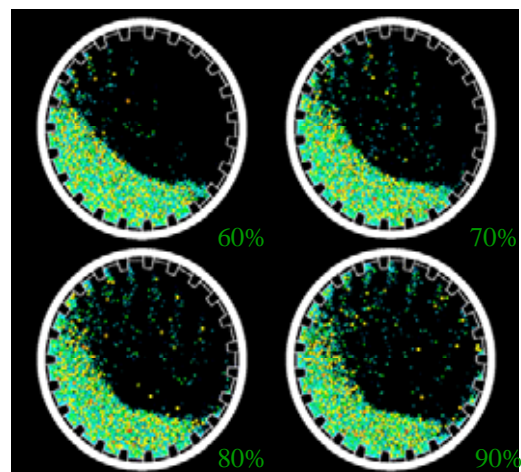


Fig. 1. Efecto de la velocidad

molinos que trabajen a un mismo porcentaje de la velocidad crítica tendrán un

comportamiento similar, aunque tengan diferentes velocidades de rotación y diferentes diámetros, por esta razón utilizaremos como factor de estudio no la velocidad de rotación sino el *Porcentaje de la velocidad crítica*.

2.4.3. *Porcentaje de llenado*

Normalmente un molino es llenado entre un 45% y un 55% de su volumen total. El material a moler se acomoda en los intersticios dejados por las bolas por lo que es el volumen de las bolas lo que se determina como una fracción del volumen total del molino y el volumen ocupado por el material se considera una fracción del volumen aparente de las bolas; este será otro de los factores que estudiaremos en este proyecto, será cuantificado como **Porcentaje de llenado de volumen disponible para el material**, o simplemente **porcentaje de llenado**, sin olvidar que no se refiere al porcentaje total de llenado.

Para el porcentaje total de llenado se suele utilizar una carga de bolas que represente entre el 45% y el 55% del volumen total del molino. Ya que por encima de este valor el exceso de material entorpece el efecto de cascada, y por debajo de este habría demasiado espacio desperdiciado por lo cual la capacidad y eficiencia del molino se verían reducidas.

En la figura 2 se observa la simulación de un molino que se encuentra lleno diferentes porcentajes de su volumen total. *En este estudio se utilizará un porcentaje total de llenado del 50% valor en el cual la operación es más eficiente.*

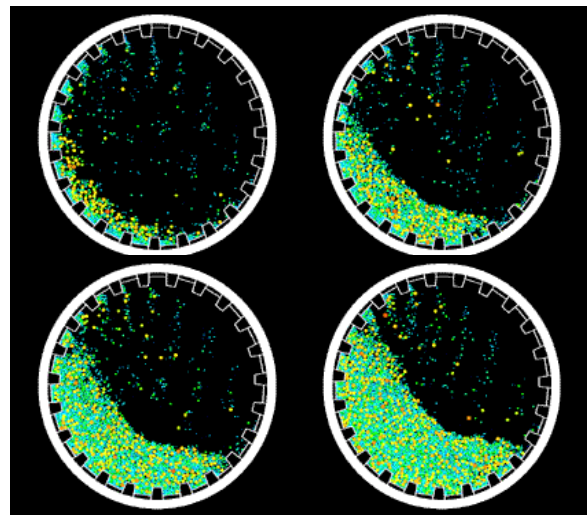


Fig. 2. Efecto del porcentaje de llenado

2.4.4. *Tamaño del alimento*

Es evidente que un menor tamaño en el alimento favorece el tamaño de salida del producto, no obstante esto implica un mayor trabajo en las etapas previas de conminución, sea de trituración o molienda primaria. Por estas razones, cuando no

se trabaja sobre un tamaño de alimento fijo impuesto por factores externos, sino que en su lugar se está diseñando un molino dentro de un circuito de conminución, se debe encontrar un tamaño de alimento que minimice el consumo energético del circuito en sí; normalmente esto se realiza por normas heurísticas dadas por la experiencia. En muchos libros de Procesamiento de Minerales podemos encontrar tablas en donde se establecen ciertos límites para el tamaño de alimento, el cual normalmente oscila alrededor de 5 mm. para pulverización de material duro. *En este caso se fijará esta variable realizando una trituración previa de todo el carbón en las mismas condiciones y realizando un muestreo para establecer un promedio del tamaño de entrada al molino.*

2.4.5. Tamaño de las bolas

Normalmente no se utiliza un único tamaño de bolas, en su lugar se utiliza una distribución de tamaños. El tamaño de las bolas más grandes viene dado por el tamaño más grande de la alimentación y el tamaño menor por el tamaño de salida deseado. El tamaño óptimo recomendado las bolas es:

$$Db = \sqrt{\frac{Xp * Ei}{K * Nr}} * \sqrt{\frac{\rho s}{\sqrt{D}}}$$

En donde:

Db: Diámetro del vástago o de la bola cm. (in)

D: Diámetro del molino, m (ft)

Ei: Índice de trabajo del material alimentado

Nr: Velocidad, por ciento de la velocidad crítica

ρs : Gravedad específica del material alimentado

K: 243 para vástagos y 143 para bolas, cuando Db y D se expresan en (in)

Xp: Tamaño de las partículas de alimentación más gruesas

Para el estudio de molienda se utilizaron dos cargas de bolas en las que se encuentran tres tamaños diferentes: 2 ½ pulgadas, 2 pulgadas, 1 ½ pulgadas.

2.4.6. *Tamaño requerido del producto*

El tamaño requerido del producto determinará no solo el tipo de molino a utilizar, o el diseño de este, sino también las condiciones de operación. Por ejemplo, para producir partículas con un tamaño inferior a las 15 μm (molienda ultrafina) es recomendable utilizar molinos horizontales de bolas con una relación L/D alta, que trabajen en húmedo pues la molienda seca difícilmente llega hasta estos tamaños de partícula. *No se requiere un grado de pulverización ultrafino, pero es importante que el molino alcance fácilmente niveles de molienda fina (74 micras). Esta será una de las variables de respuesta del estudio.*

2.4.7. *Consumo energético*

El consumo energético del molino viene dado por diversos aspectos. Uno de los más importantes es el diámetro del molino el cual determinará el brazo del torque que debe ejercer el motor para vencer el momento de inercia de la carga del molino. Otro factor importante es, por supuesto, la carga en sí; ya que su masa es la que causa la inercia que debe vencer el motor. También son relevantes el tiempo de residencia del material, que en los sistemas continuos se traduce en una mayor o menor longitud del tambor; y el porcentaje de la velocidad crítica a emplear que afecta el motoreductor y la transmisión de potencia. La rotación del tambor, incluyendo el material y las bolas requiere una gran cantidad de energía pero debido a la aleatoriedad de los choques, solo una pequeña parte de la energía suministrada al molino es utilizada en la conminución. Esta energía de conminución es la que interesa. Existen diferentes leyes para calcular esta energía, pero todas son soluciones particulares de la ecuación diferencial general:

$$dE = -C \frac{dX}{X^n}$$

La ley que mejores resultados arroja esta dada por una solución particular en la que n se hace igual a 0.5. Esta ley es conocida como ley de Bond. En la literatura (ver referencia 6) encontramos la ley de Bond formulada de la siguiente manera:

$$\left(\frac{P}{m}\right) = 0.3162 \times Wi \times \left(\frac{1}{\sqrt{D_{pb}}} - \frac{1}{\sqrt{D_{pa}}}\right)$$

En donde

P: Energía empleada en la conminución (Kw)

m = Masa de carbón molida (Ton)

Wi: Índice de trabajo de bond (Work Index). 12.5 Para el carbón de Santander.

Dpb: Tamaño que por debajo del cual se encuentra el 80% del producto (mm).

Dpa: Tamaño por debajo del cual se encuentra el 80% de la alimentación (mm).

Como puede observarse, este valor depende de los tamaños representativos de entrada y salida, y de la cantidad de carbón a moler. Es evidente que entre mayor sea el valor de la energía útil empleada en la conminución, mayor será la eficiencia energética de la operación, por ello se ha seleccionado esta como la variable de respuesta principal para el estudio.

3. METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

Se ha optado por un diseño experimental factorial 2^k involucrando tres variables a analizar:

- ✓ Porcentaje de la velocidad crítica (%Nc).
- ✓ Configuración de la carga de bolas.
- ✓ Porcentaje de espacio ocupado por el material.

El tipo de carbón no será considerado como un parámetro ya que el diseño factorial será efectuado sobre el carbón de Santander y los carbones de otras procedencias será utilizados para establecer una comparación en la operación, solo cuando se hayan determinado las mejores condiciones de molienda.

El tiempo de molienda también será fijado realizando un experimento en el que se determine el perfil de la reducción de tamaño a lo largo del tiempo.

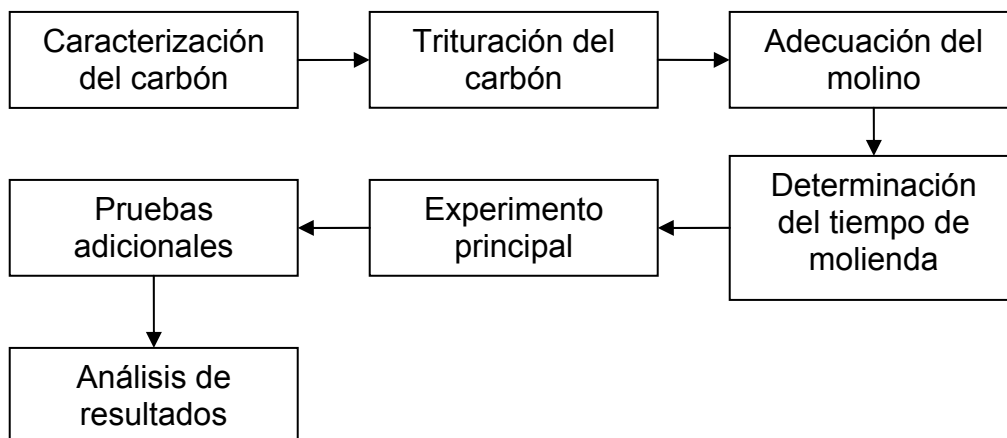


Figura 3. Diagrama de flujo del desarrollo experimental

3.1. Caracterización del carbón

Análisis próximo (ver anexo 1 análisis termogravimétrico) :

Humedad	7.14
Materia volátil	14.71
Carbón fijo	58.57
Cenizas	19.58

Tabla 2. Análisis Próximo del carbón

Índice de trabajo (ver anexo 2. Determinación del índice de Bond):

Carbón Santander: 12.5

Carbón Guajira: 11.7

Carbón Norte de Santander: 12.1

3.2. Trituración del carbón

Para la ejecución del diseño experimental fueron triturados 120Kg de carbón de San Luís (Santander). Al realizar el análisis de distribución de tamaños de partícula se obtuvieron los siguientes resultados.

En la figura 4 podemos observar que la mayor parte de las partículas son retenidas en las mallas 8 y 20, las cuales corresponden a los tamaños 2.362mm y 0.841mm.

Si calculamos el tamaño promedio, por medio de la siguiente expresión:

$$\bar{D}_s = \frac{1}{\sum_{i=1}^n \left(\frac{x_i}{D_{pi}} \right)}$$

Encontramos que el tamaño medio de partícula es de 1,751mm. Sin embargo para el seguimiento del experimento seguiremos el criterio de Bond el cual toma el tamaño por debajo del cual se encuentran el 80% de las partículas; este será llamado tamaño representativo.

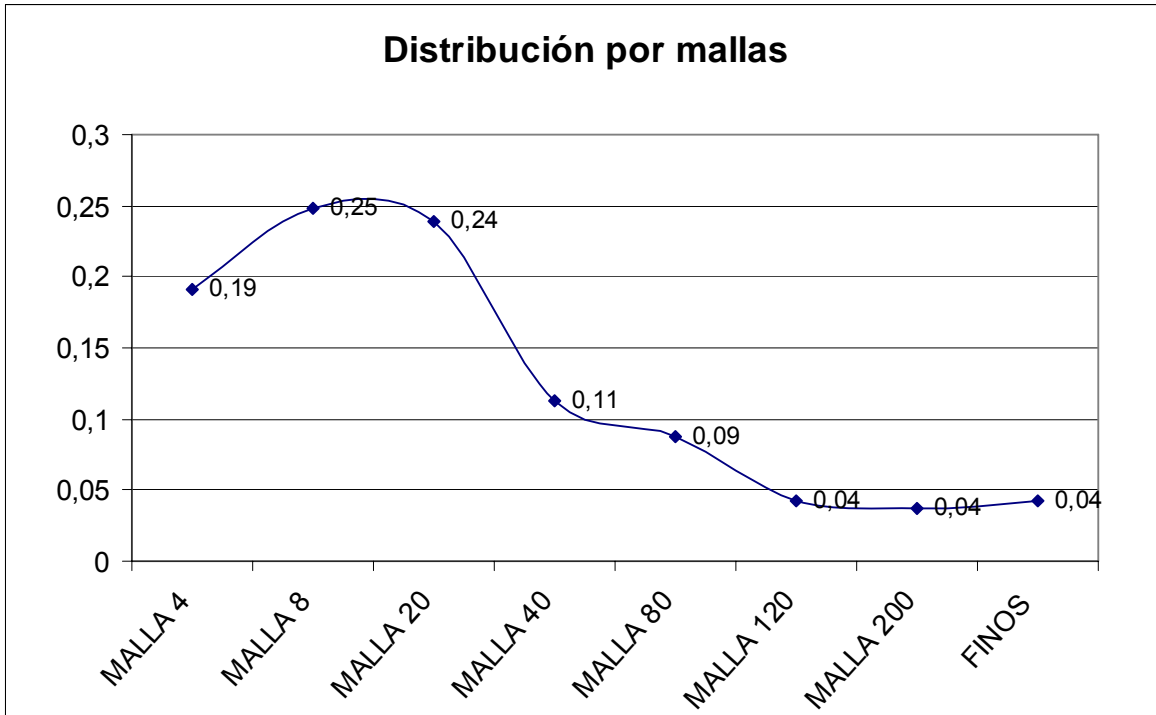


Figura 4. Distribución porcentual por mallas del carbón triturado.

El uso de este criterio representa varias ventajas. En operación, por ejemplo, es útil para establecer que número de malla debe utilizarse en el clasificador, a la salida del molino. Por otra parte, el análisis de distribución de partícula puede ser engañoso al utilizar porcentajes parciales de material retenido en cada malla, pues estos pueden variar para una misma muestra al seleccionar diferentes mallas para el análisis, pero esta incertidumbre se elimina al trabajar con un porcentaje acumulado inferior, ya que se está seguro que sin importar que mallas se utilicen por encima o por debajo, el porcentaje de una misma muestra que atravesará un tamiz determinado será el mismo.

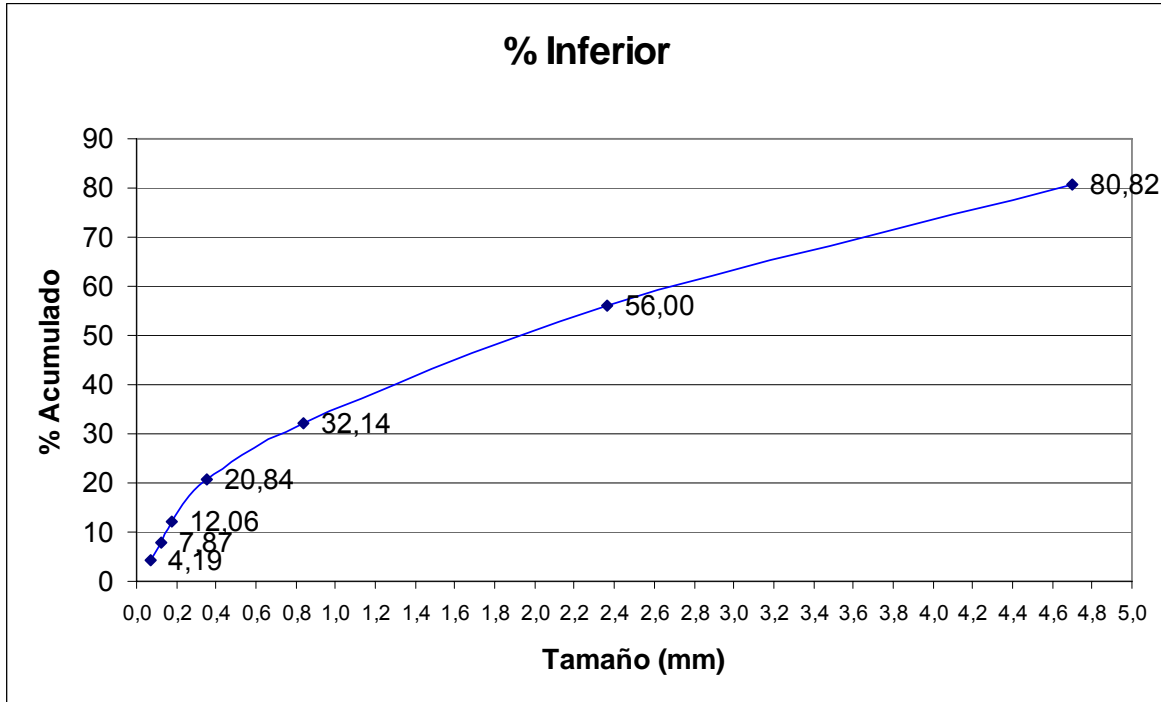


Figura 5. Distribución porcentual acumulativa de tamaños inferiores (Pasante).

En esta figura observamos que el 80,8% de las partículas se encuentra por debajo de los 4.699mm. Realizando una regresión por potencias podemos establecer que el 80% de las partículas tiene un tamaño inferior a 4.648mm, tamaño que asumiremos como punto de partida en la conminución.

3.3. Adecuación del molino



Figura 6. Molino de bolas.

Hoja de especificaciones del molino	
Diámetro	30 cm.
Longitud	50 cm.
Volumen total	$3.53 \times 10^{-2} \text{m}^3$
Motor	3.6 HP
Salida del motoreductor	61 rpm.
Velocidad crítica	59.8 rpm.

Tabla 3. Hoja de especificaciones del molino.

Bolas

Bolas		
Diámetro (cm.)	Peso	Número
6.35 (2 ½ ")	53Kg	45
5.08 (2")	148Kg	279
3.81 (1 ½ ")	52Kg	210

Tabla 4. Bolas disponibles

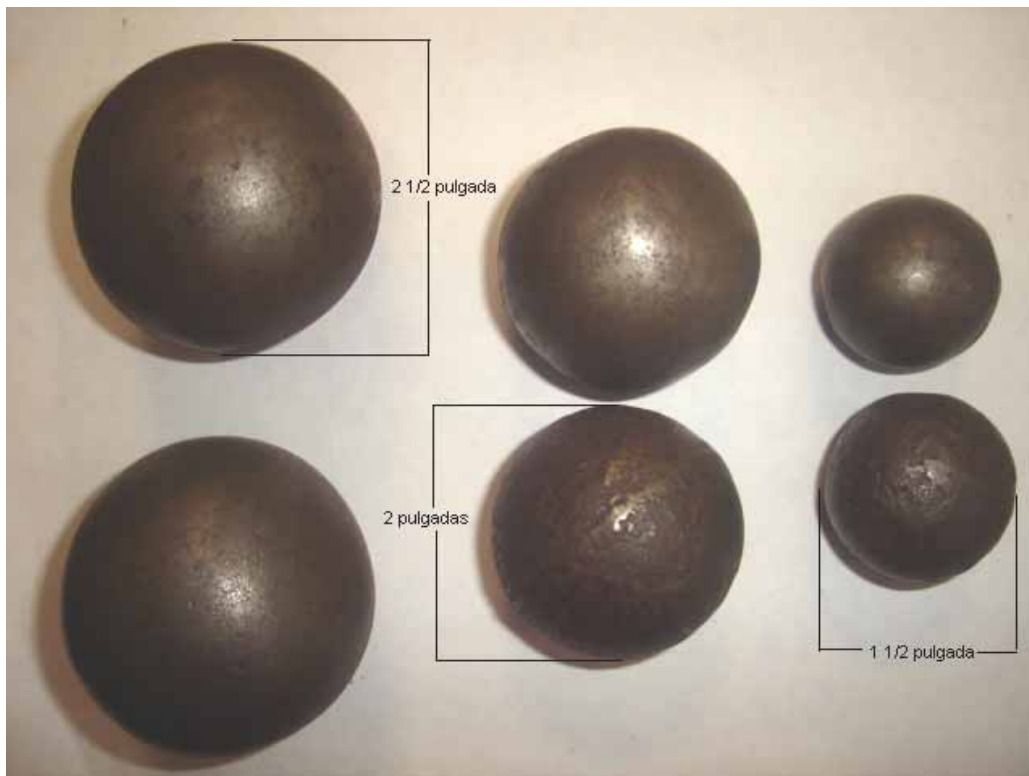


Figura 7. Bolas disponibles

Piñones:

Piñón	% de Nc que proporciona
60B-15	36.4%
60B-28	68.0%

Tabla 5. Piñones

3.3.1. Llenado del molino

Volumen total interno del molino (V_t)

$$V_t = \frac{\pi D^2 L}{4} = 3.53 \times 10^{-2} \text{m}^3$$

Volumen aparente ocupado por las bolas (V_b)

$$V_b = 0.5 \cdot V_t = 1.94 \times 10^{-2} \text{m}^3$$

Volumen ocupado por el material.

Para un lecho empacado con esferas se considera un factor de porosidad promedio de 0.4, el cual corresponde a la fracción de volumen disponible para el material o volumen vacío (V_o)

$$V_o = \epsilon \cdot V_b = 7.77 \times 10^{-3} \text{m}^3$$

La densidad del carbón triturado es de alrededor de 1700Kg/m^3 , por lo que 13.21Kg ocuparían por completo el espacio disponible; podemos utilizar 10Kg de carbón para el para el valor menor del diseño factorial, el cual corresponde a un 75% de uso del volumen disponible; y 14Kg de carbón para el valor mayor, el cual corresponde a un 105%.

Volumen real ocupado por las bolas (V_{rb}).

$$V_{rb} = (1 - \epsilon) V_b = 1.16 \times 10^{-2} \text{m}^3$$

La densidad del acero es de alrededor de 7600Kg/m^3 por lo que serán necesarios 90Kg de bolas en cada carga.

3.3.2. Determinación del tiempo de molienda.

Para la determinación del tiempo de molienda se realizó el primer experimento de molienda de carbón durante 1 hora. Cada 15 minutos se detenía la operación y se tomaba una muestra para análisis granulométrico que después era devuelta al molino, con el fin de evitar una desviación positiva, por una disminución de la cantidad de material a moler, lo cual aumentaría la eficiencia del molino.

Se estableció que en 1 hora era posible apreciar el desarrollo diacrónico de la molienda, por ello se ha optado por realizar todos los experimento bajo las mismas condiciones con el fin de establecer una comparación de sus perfiles.

3.4. Ejecución del experimento principal

(ver anexo 3. Manual de molienda)

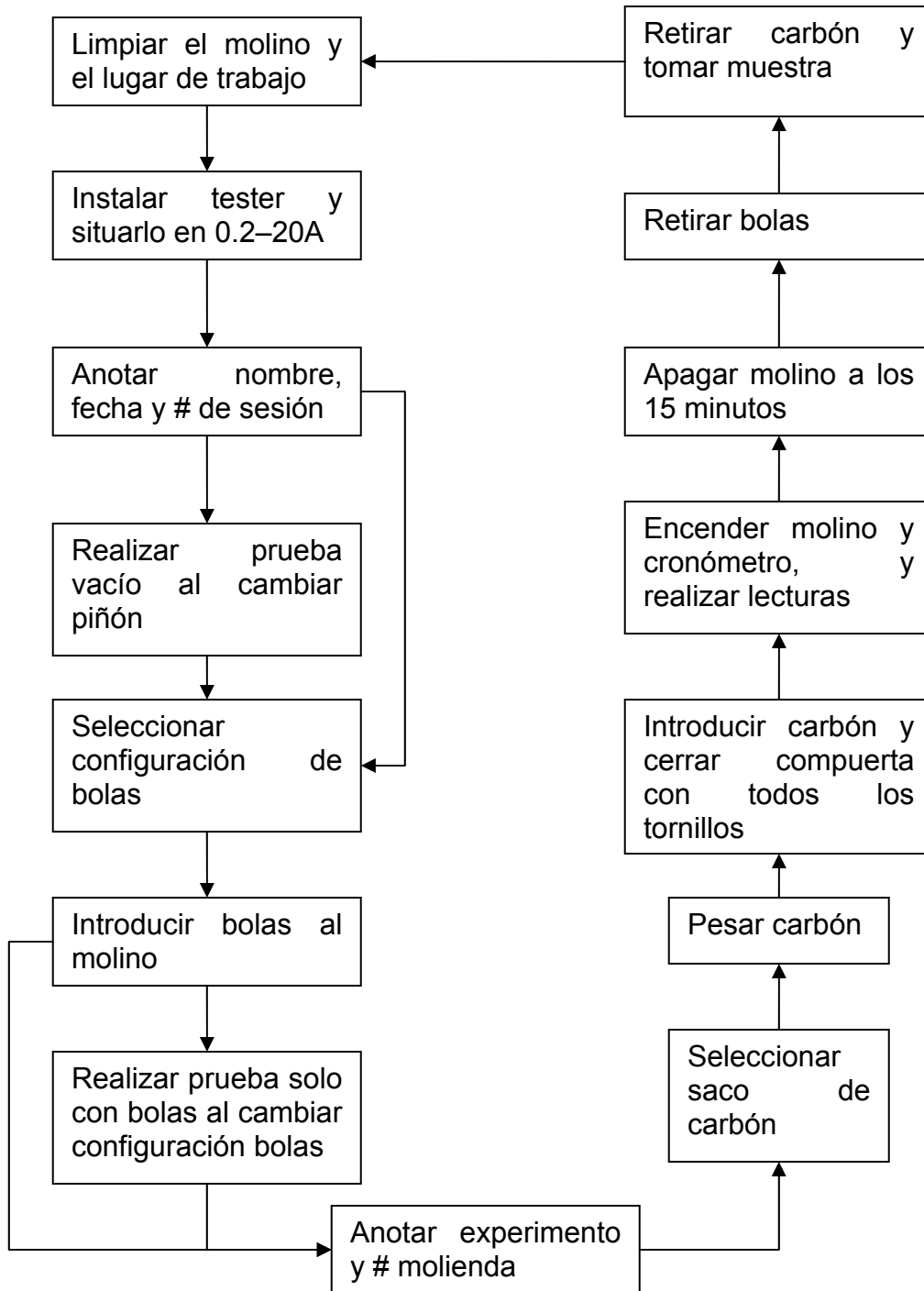


Figura 8. Diagrama de flujo de operación del molino

3.4.1. Diseño experimental

En la siguiente tabla podemos observar como son distribuidas las variables de acuerdo a la variación experimental.

Variable	-	+
Distribución de bolas (a)	10kg-2 ½'	40kg-2 ½'
	40Kg-2'	40Kg-2'
	40Kg-1 ½'	10Kg-1 ½'
% Llenado (b)	75% (10Kg)	105% (14Kg)
% Velocidad Crítica (c)	36% (B60-20)	64% (B60-28)

Tabla 6. Variación de factores.

Y la tabla del diseño experimental:

Experimento	Distribución de Bolas	%Llenado	%Velocidad crítica
1	-	-	-
2	+	-	-
3	-	+	-
4	+	+	-
5	-	-	+
6	+	-	+
7	-	+	+
8	+	+	+

Tabla 7. Diseño experimental.

3.4.2. Pruebas en blanco

Con el fin de determinar las posibles variaciones del consumo de corriente a lo largo de la experimentación se realizaron pruebas en blanco bajo los siguientes criterios.

- ✓ Molino vacío
- ✓ Molino con los diferentes piñones
- ✓ Molino con las diferentes cargas de bolas

3.5. Pruebas adicionales

3.5.1. Carbón de otras procedencias

Una vez establecidas las mejores condiciones de molienda se realizaron corridas bajo esas condiciones para carbones procedentes de La Guajira y Norte de Santander.

3.5.2. Molino operado en serie con otros equipos

Se realizó la molienda de carbón previamente procesado en un molino de martillos. Debido a que la granulometría de entrada es mucho menor a la empleada en el resto de las pruebas experimentales, se optó por realizar tres corridas con diferentes configuraciones de bolas y toma de muestras cada 5 minutos de acuerdo al método especificado para ello en la sección “Determinación del tiempo de molienda”

4. ANÁLISIS DE RESULTADOS

4.1. Determinación del tiempo de molienda.

El procedimiento experimental seguido ha permitido identificar claramente dos etapas de molienda perfectamente diferenciadas, como se puede apreciar en la siguiente gráfica:

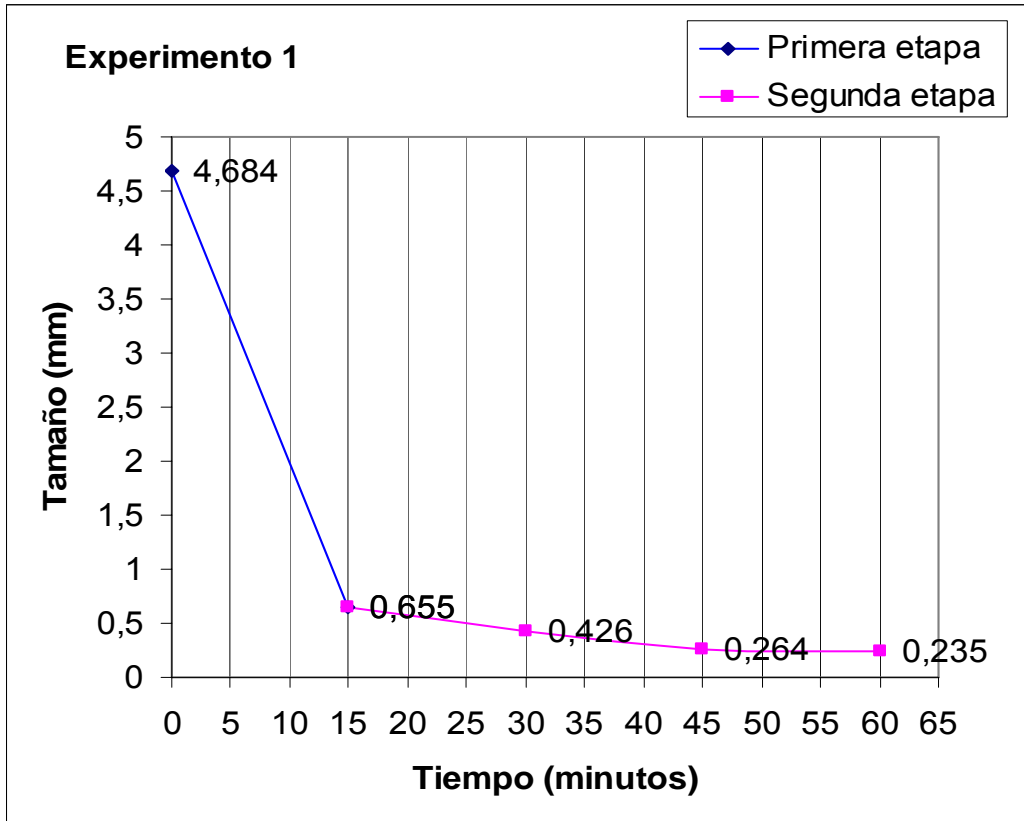


Figura 9. Tamaño representativo vs. Tiempo.

Se observa fácilmente que existen dos etapas de molienda. La primera tiene lugar en los primeros 15 minutos de operación, y es en ella donde se realiza la mayor parte de la conminución; la disminución de tamaño es prácticamente lineal con el tiempo. En la segunda etapa esta adquiere un carácter exponencial que tiende a estabilizarse. Este comportamiento se debe a que medida que avanza el tiempo existe una mayor proporción de partículas finas las cuales son más difíciles de

moler que las grandes, por lo que la eficiencia de la conminución disminuye dramáticamente. Este fenómeno es conocido como sobremolienda de finos.

Con fines comparativos se realizaron los 8 experimentos en las mismas condiciones con el fin de obtener un perfil diacrónico de la molienda.

4.2. Pruebas en blanco

Piñón	60B-15		60B-28	
	Arranque	Operación	Arranque	Operación
Vacío	6.5	6.4	6.7	6.7
Carga de bolas -	6.4	6.4	6.7	6.5
Carga de bolas +	6.5	6.5	6.6	6.7

Tabla 8. Consumo de corriente del molino en blanco.

Se observa que el consumo de corriente no depende directamente de las condiciones de operación del molino. Esto se debe a que el motor con el que cuenta el molino genera una potencia muy superior a la necesaria para la operación, por lo que no se ve forzado al trabajar con carga; y a que la operación de otros equipos conectados a la misma red eléctrica alteran la disponibilidad de energía eléctrica (los datos de consumo de corriente para todos los experimentos se encuentran en el anexo 4).

4.3. Experimento principal

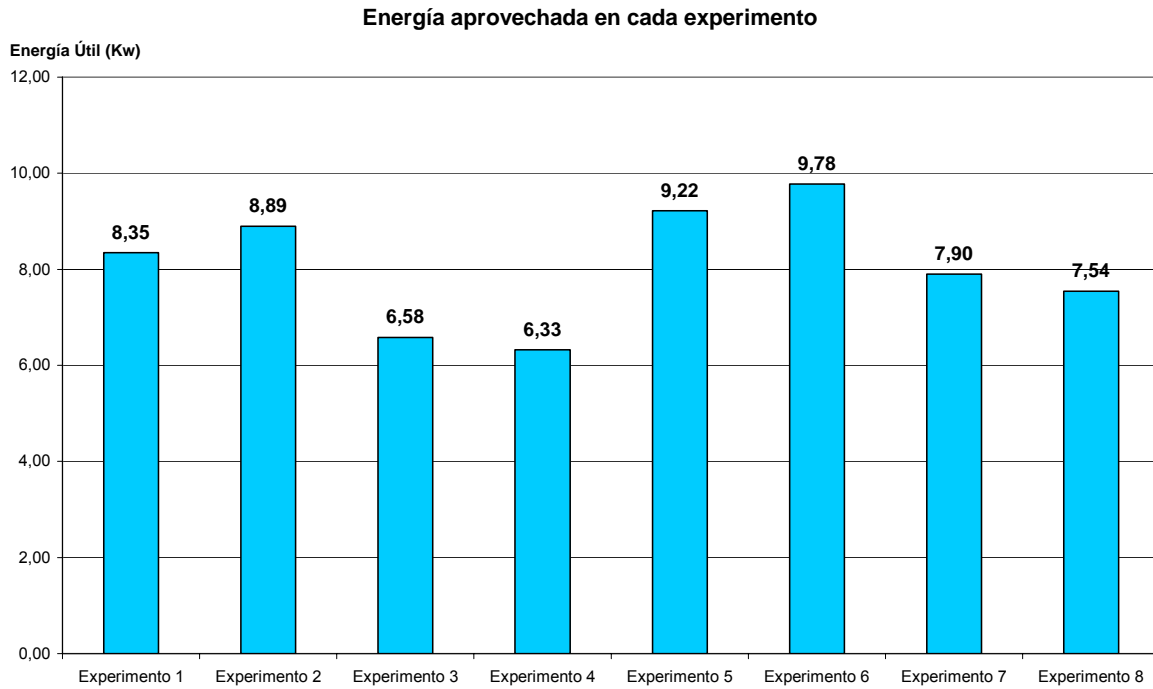


Figura 10. Respuesta obtenida para cada experimento

Es fácil notar que el porcentaje de la velocidad crítica favorece considerablemente la molienda teniendo un mayor efecto que los otros factores. También podemos observar que, aunque en el experimento 6 se obtuvo un menor tamaño final del producto, la configuración de factores del experimento 7 es más eficiente ya que muele una mayor cantidad de carbón a un tamaño que no se encuentra muy lejano del obtenido en el experimento 6. Esto implicaría que la interacción entre el llenado del molino y la velocidad de rotación es muy fuerte. A continuación cuantificaremos los efectos de cada uno de los factores y de la interacción entre ellos.

4.3.1. Cálculo de los efectos

Efecto individual de cada uno de los factores

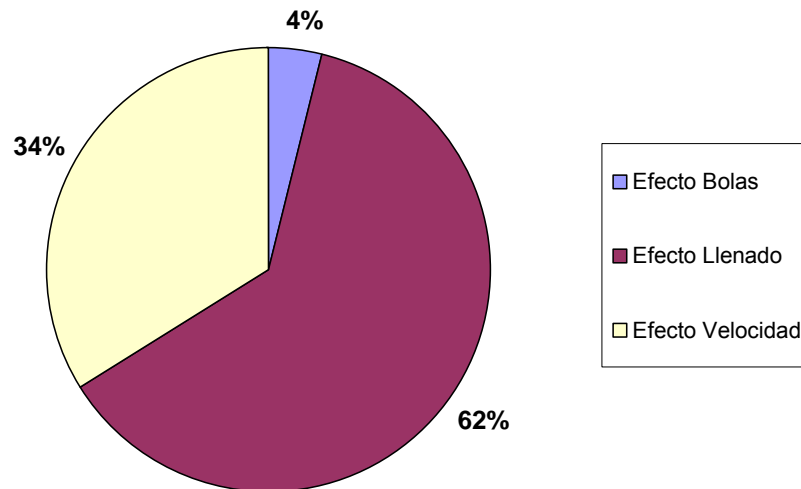


Figura 11. Efecto individual de cada factor.

Efecto de los factores y sus interacciones

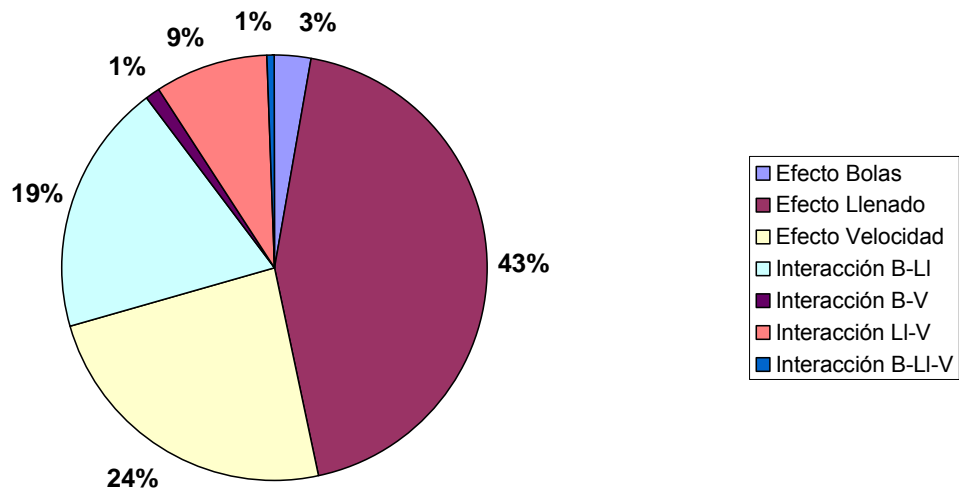


Figura 12. Efecto de los factores y sus interacciones

4.3.2. Resultados

Experimento	Bolas	% Llenado	% Nc	Energía útil (Kw/ton)	Tamaño final (micras)	Efecto Bolas	Efecto Llenado	Efecto Velocidad	Efecto ab	Efecto ac	Efecto bc	Efecto abc
1	Menor	75	36	8,35	151				-0,31	0,10	-1,78	-0,46
2	Mayor	75	36	8,89	136	0,55						
3	Menor	105	36	6,58	221		-1,76		0,55	0,15	-2,16	-0,40
4	Mayor	105	36	6,33	235	-0,25	-2,56					
5	Menor	75	64	9,22	128			0,88				
6	Mayor	75	64	9,78	116	0,56		0,89				
7	Menor	105	64	7,90	165		-1,32	1,32				
8	Mayor	105	64	7,54	178	-0,36	-2,24	1,21				
Promedio				8,07	151	0,12	-1,97	1,08	-0,86	-0,05	0,39	-0,03

Tabla 9. Resultados experimentales, efectos e interacciones.

Tamaño alcanzado en la primera etapa de molienda

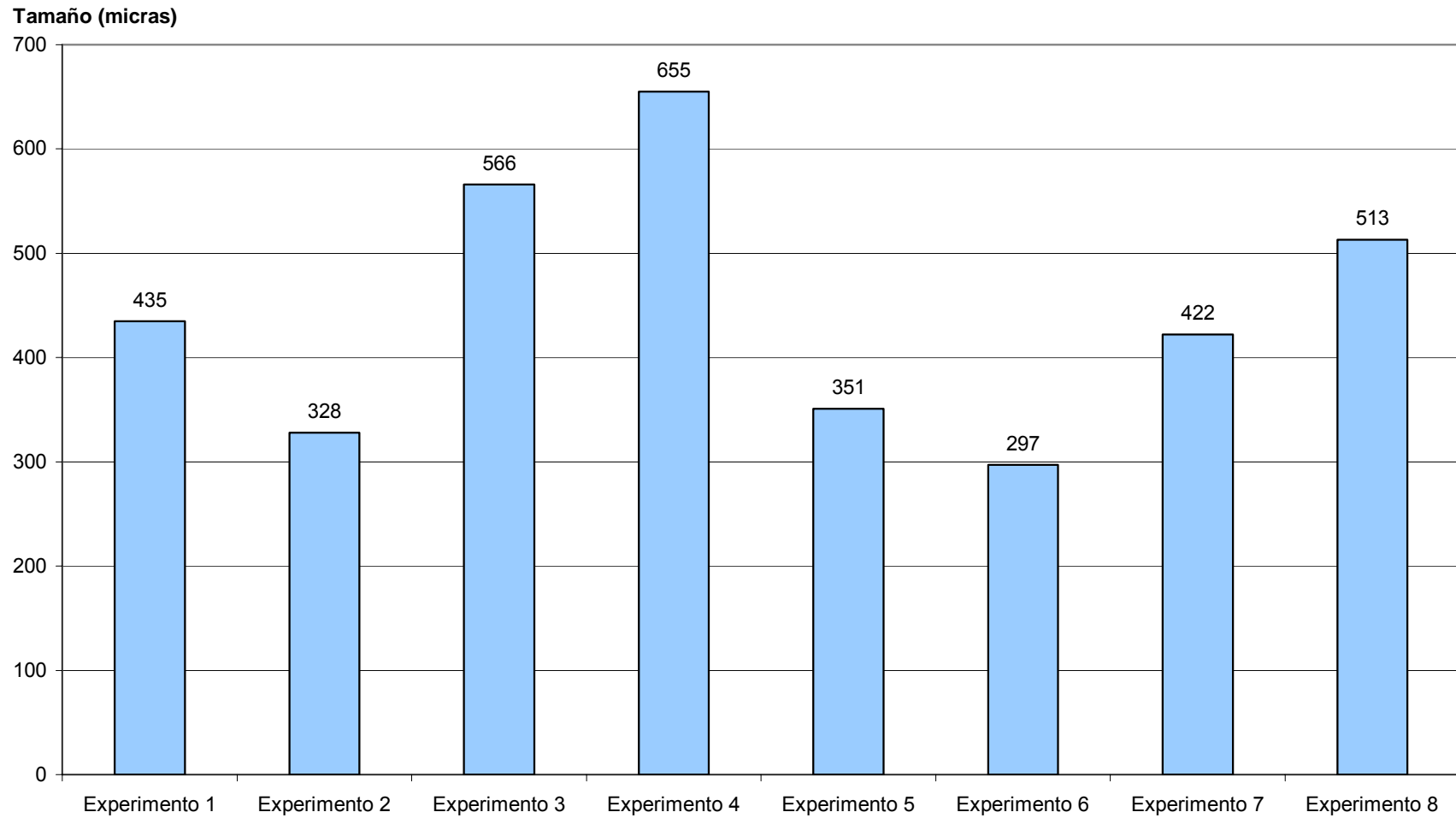


Figura 13. Tamaño alcanzado en la primera etapa de molienda para cada experimento.

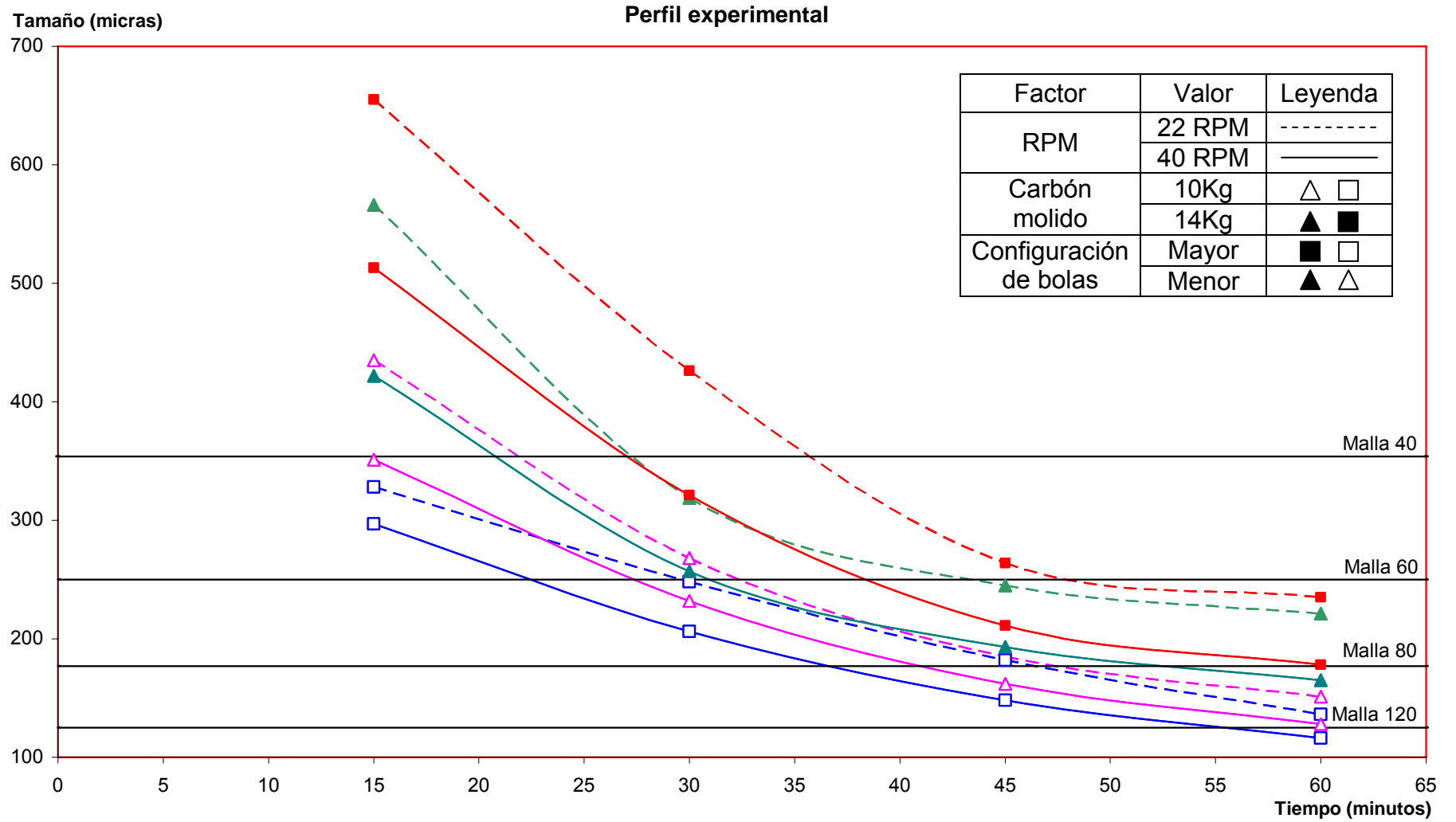


Figura 14. Efecto de los diferentes factores a lo largo del tiempo (segunda etapa).

- ✓ La suposición de la importancia del efecto de la velocidad de rotación, y de la interacción de esta con el porcentaje de llenado del molino se ha visto justificada pues es este factor y esta interacción las que más influyen en la eficiencia del molino.
- ✓ El experimento 6 es el que presenta las mejores condiciones de operación, un alto porcentaje de la velocidad crítica, una configuración de bolas predominantemente grandes y un porcentaje de llenado bajo. En este experimento se alcanza el tamaño de partícula más fino y se obtiene el mayor aprovechamiento de energía. Esta capacidad de alcanzar un tamaño mínimo de partícula es uno de los requerimientos más importantes en la elaboración de la CCTA. Por esta razón se realizaron las pruebas adicionales de comparación con carbones provenientes de La Guajira y Norte de Santander, en las mismas condiciones.
- ✓ Es importante considerar la ventaja económica que representan estos resultados. Por ejemplo si se instala una malla 120 a la salida del molino, para el experimento 4 sería necesario reprocesar 6.44 kg de carbón (el 46% que no pasa esta malla), pero para el experimento 6 solo sería necesario reprocesar unos 1.5 kg de carbón (el 15% que no pasa esta malla). De ahí la importancia económica del proyecto ya que se aumentaría la producción de carbón apto para CCTA sin incrementar los costos de procesamiento, e incluso disminuyendo estos ya que se podría reducirse el tiempo de operación al cumplir con la cantidad de carbón requerido en un menor tiempo, lo cual implicaría menor consumo de servicios y de personal.

4.4. Pruebas adicionales

4.4.1. Carbones de otras procedencias

El carbón del Cerrejón alcanza un tamaño menor que el obtenido para el carbón de Santander y de Cúcuta, esto se debe a que posee un menor índice de molienda, 11.7 contra 12.5 para el de Santander y 12.1 para el de Cúcuta; por ello es más fácil de conminuir, pero la eficiencia obtenida en la molienda de este es menor que la obtenida para el de Santander y el de Cúcuta en las mismas condiciones, siendo el de Santander el que presenta una mayor energía aprovechada.

Procedencia	Índice de trabajo	Tamaño final obtenido	Energía Útil
Santander	12.5	116	9,77
La Guajira	11.7	108	9,54
Norte de Santander	12.1	112	9,66

Tabla 10. Comparación de molienda de carbones de diferentes procedencias.

Comparación carbones de diferentes procedencias

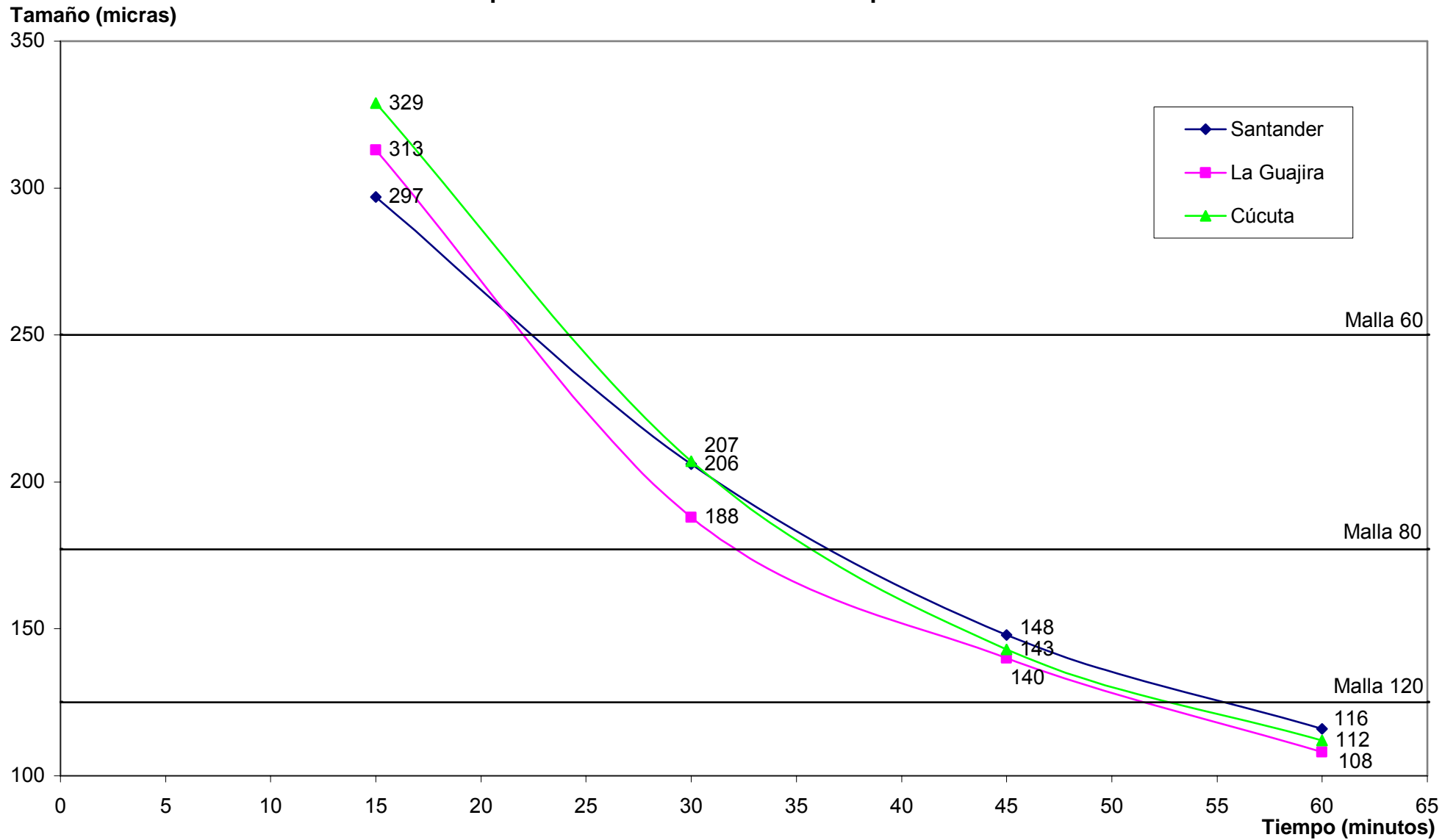


Figura 15. Comparación de perfil de molienda de carbones de diferentes procedencias.

4.4.2. Molino operado en serie con otros equipos

El resultado de introducir al molino de bolas el carbón previamente molido en un molino de martillos se presenta a continuación. En la figura 16 (ver anexo 5) se puede observar cada una de las pruebas en las que se varió únicamente la configuración de bolas, es de notar que el menor tamaño final obtenido en 15 minutos se alcanzó con una configuración de bolas predominantemente pequeñas pero con una presencia significativa de bolas grandes, mientras que en la operación sin bolas grandes se obtuvo un tamaño representativo ligeramente inferior pero el porcentaje de carbón que se encuentra por debajo de malla 200 es menos favorable, al aumentar más la cantidad de bolas grandes ambos indicadores se hicieron desfavorables. Esto indica que es necesario realizar siempre un calibrado de la configuración de bolas al cambiar la granulometría de entrada de un molino, pues existe una interacción entre los diferentes tamaños que aumenta las probabilidades de choque y fractura de las partículas.

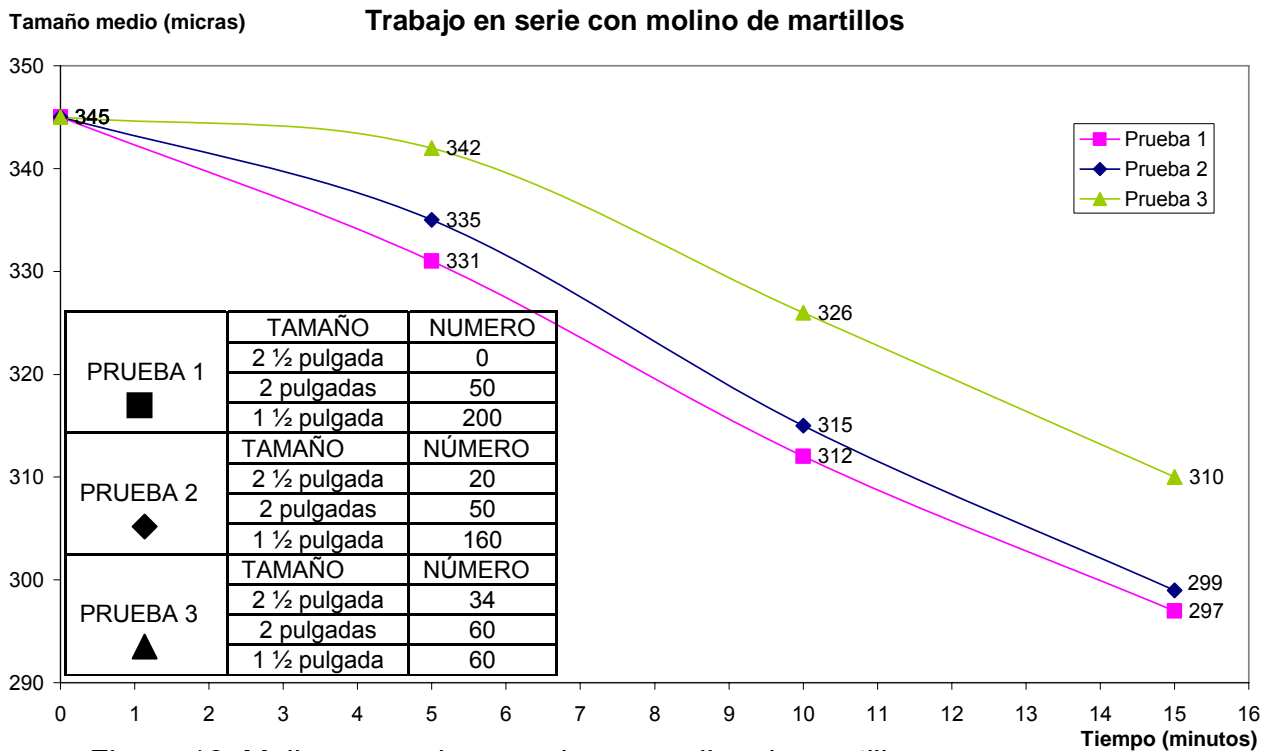


Figura 16. Molino operado en serie con molino de martillos

5. CONCLUSIONES

- ✓ Se identificaron dos etapas de molienda en el proceso. La primera, en la cual se lleva a cabo la mayor parte de la conminución, sucede en los primeros 15 minutos y la reducción de tamaño presenta un descenso muy pronunciado. En la segunda el tamaño tiende a estabilizarse y presenta un perfil exponencial que tiende a un límite en el tamaño del producto, por lo que la reducción de tamaño es menos eficiente; no obstante, debido a los requerimientos de CCTA es necesario operar en esta segunda etapa. Normalmente entre más pronunciada sea la primera etapa, menor será el tamaño final del producto alcanzado en la segunda etapa.
- ✓ La operación a velocidades cercanas a la velocidad crítica es definitivamente más eficiente que a velocidades lejanas a ella. El menor tamaño final y el mayor aprovechamiento energético fueron obtenidos con una carga baja de carbón, en conjunto con una configuración de bolas predominantemente grandes;
- ✓ El porcentaje de llenado del molino es el factor que más incide sobre el comportamiento de la molienda, sin embargo como no es aconsejable disminuir demasiado este debido a que la producción de carbón se vería perjudicada, es aconsejable trabajar sobre la velocidad crítica del molino para obtener un mejor desempeño, las bolas no causan un gran efecto individual, pero su interacción con el porcentaje de llenado es la más alta por lo que se debe tener especial cuidado en la selección de la configuración de bolas al fijar el porcentaje de llenado del molino. Esto puede observarse también en el trabajo en serie con el molino de martillos en el que, se halló que para trabajar en las mejores condiciones de operación, era necesario eliminar las bolas de mayor tamaño.
- ✓ Al poseer un menor índice de trabajo, los carbones de La Guajira y Norte de Santander alcanzaron un tamaño final de partícula más fino que el de

Santander, pero evidentemente esto no implica un mayor aprovechamiento energético ya que, al ser la molienda más suave, se emplea una menor cantidad de energía útil.

- ✓ Este trabajo ha permitido establecer un direccionamiento en la implementación a nivel industrial del procesamiento de carbón con miras a la producción de CCTA. Es importante notar que una vez diseñada la planta de molienda a nivel industrial se puede realizar una puesta a punto que proporcione una mayor cantidad de carbón apto para CCTA, en un menor tiempo lo cual redundaría en un beneficio económico directo, así como ambiental al disminuir el consumo de servicios.

6. RECOMENDACIONES

- ✓ Es evidente que la operación en circuitos cerrados, en donde se realiza una retroalimentación del material grueso, es más eficiente que la operación en circuito abierto. Por ello sería importante que se adelantaran trabajos en esta dirección; para ello sería necesario realizar algunas adaptaciones al molino como una tolva de carga y especialmente un ventilador en succión para la descarga, con un ciclón para la clasificación del material y su posterior recirculación.

- ✓ Una de las opciones de operación más ampliamente utilizada en el procesamiento de minerales es la molienda por vía húmeda, según Bond esta consumen un 30% de energía menos que la molienda seca, y presenta amplias ventajas en aspectos como control de material particulado y transporte del producto por lo cual favorecería la operación continua. En el caso de los carbones no es muy ampliamente utilizada debido a que el contenido de agua reduce el poder calorífico del carbón por lo que se hace necesario secarlo. En nuestro caso particular este problema pierde importancia ya el carbón será utilizado precisamente para producir emulsiones por lo que no sería necesario secarlo. Es altamente recomendable realizar un estudio en esta línea.

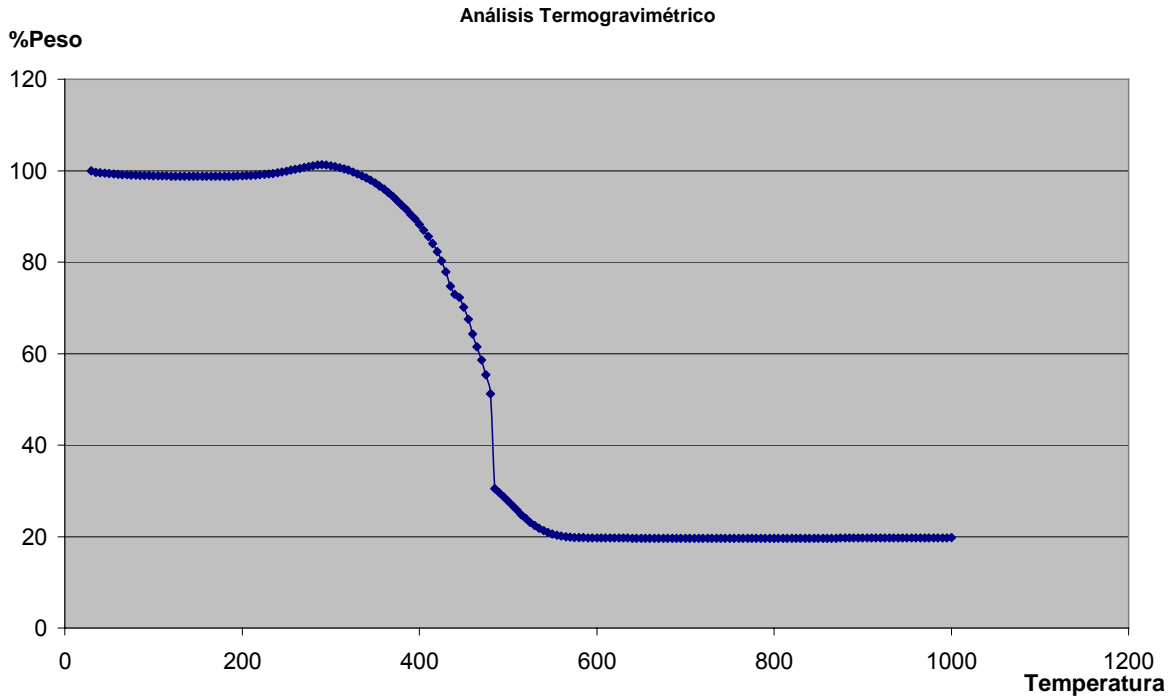
7. BIBLIOGRAFÍA

1. BOND, F. "THE THIRD THEORY OF COMMINUTION". *Trans. AIM.E* 1952.
2. BURDUKOV, Anatolii. Et al. PROSPECTS FOR USE OF MICRONIZED COAL IN POWER INDUSTRY. *Thermal Science: Vol. 6 (2002), No. 1*, pp. 29–42.
3. CAMPOS, J. "CARACTERIZACIÓN ENERGÉTICA: EL PRIMER PASO HACIA EL USO RACIONAL DE LA ENERGÍA" Universidad del Atlántico. Barranquilla. 2003
4. FRANCES, C. ", et al. "ON THE ANALYSIS OF FINE WET GRINDING IN A BATCH BALL MILL" *The Chemical Engineering Journal* 63 (1996) Páginas:141-147.
5. GARCÍA, C. "ESTADO DEL ARTE DE EQUIPOS DE MOLIENDA DE CARBÓN" Informe. UIS. 2006
6. GROSSO, J. "DISEÑO DEL SISTEMA DE MOLIENDA DE CARBÓN PARA LAS MEZCLAS CARBÓN-AGUA-TENSOACTIVO Y CARBÓN-COMBUSTOLEO-TENSOACTIVO-AGUA". ECOPETROL-ICP
7. McCABE, W. "OPERACIONES UNITARIAS EN INGENIERÍA QUÍMICA" 4 edición. Ed. McGraw-Hill. Madrid. 1991.
8. MESA, Ignacio; *Manejo de Sólidos*, 1ª edición, Universidad Pontificia Bolivariana, 1990.
9. MORRISON, M. "CLEAN COAL TECHNOLOGY" U.S. Department of Energy. Washington. 2002.
10. PRYOR, E. "MINERAL PROCESSING" Applied Science Publishers. London. 1965
11. SMIDTH, F. L., "COAL GRINDING PLANTS" .PDF Document. 2002
12. TRASS, O. "DEVELOPMENTS IN GRINDING TECHNOLOGY". University of Toronto, Department of Chemical Engineering and Applied Chemistry. 2005.
13. VALDIVIESO, J; Zea, L; "DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE UNA PULVERIZADORA DE MINERALES. UNIVERSIDAD INDUSTRIAL DE SANTANDER". 1980. Tesis de grado

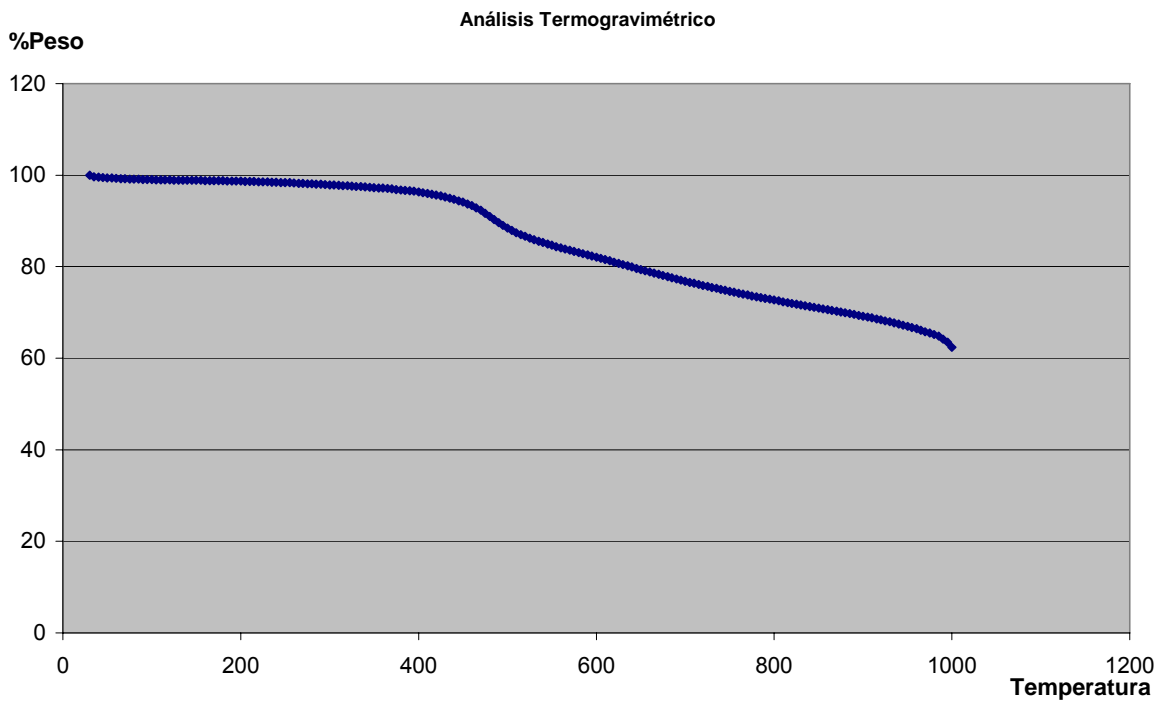
14. VÁSQUEZ, W. MICRONIZACIÓN DE CALIZA EN UN MOLINO DE BOLAS.
Escuela Superior Politécnica del Litoral. Guayaquil. 1999.

Anexo 1. Curvas de análisis termogravimétrico

Análisis en presencia de aire:



Análisis en presencia de Nitrógeno:



Anexo 2. Determinación del índice de trabajo de Bond.

Trabajo realizado con la colaboración de los estudiantes de Manejo de Sólidos)

El índice de trabajo del carbón se determinó aproximadamente, a partir de la eficiencia del molino calculada para dos minerales cuyo índice de trabajo se conocía: la piedra caliza y el cuarzo. Para esto se realizó una molienda para cada mineral y luego para el carbón, procurando mantener en las tres corridas, las condiciones de molienda constantes en los siguientes valores:

- Velocidad de rotación: 47rpm
- Carga de bolas: 20 bolas de 1 in de diámetro
- Tiempo de residencia: 20 min.
- Diámetro de partícula del alimento (D_{80}): 6-8 mallas
- Peso de material a triturar: 300g

A partir de un análisis de tamizado se midió el tamaño de partícula de los minerales patrones después de molidos y aplicando la ley de Bond se calculó la potencia teórica requerida para la molienda. Comparando este valor de potencia con el medido experimentalmente se determinó la eficiencia en la molienda de cada uno de estos minerales y a partir de estos resultados se construyó la curva eficiencia vs. Índice de Bond, con la cual se calculó el índice para el carbón.

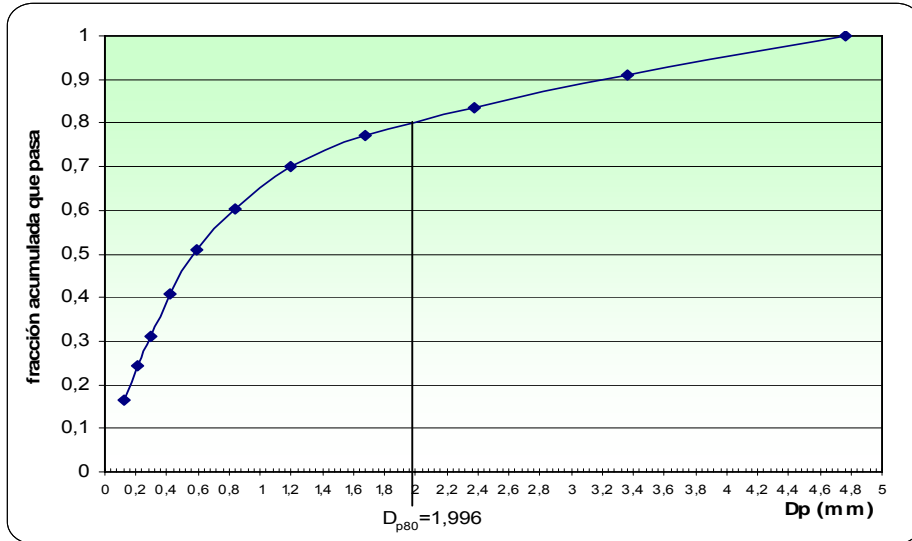
RESULTADOS Y ANÁLISIS

Piedra caliza

Índice de trabajo (W_i) = 16.99

Alimento: $D_{80} = 3.36\text{mm}$

Producto: 1.996



Potencia experimental: 0.8952kW

Potencia teórica (Ley de Bond): 7.84×10^{-4} kW

Eficiencia energética: 0.0876%

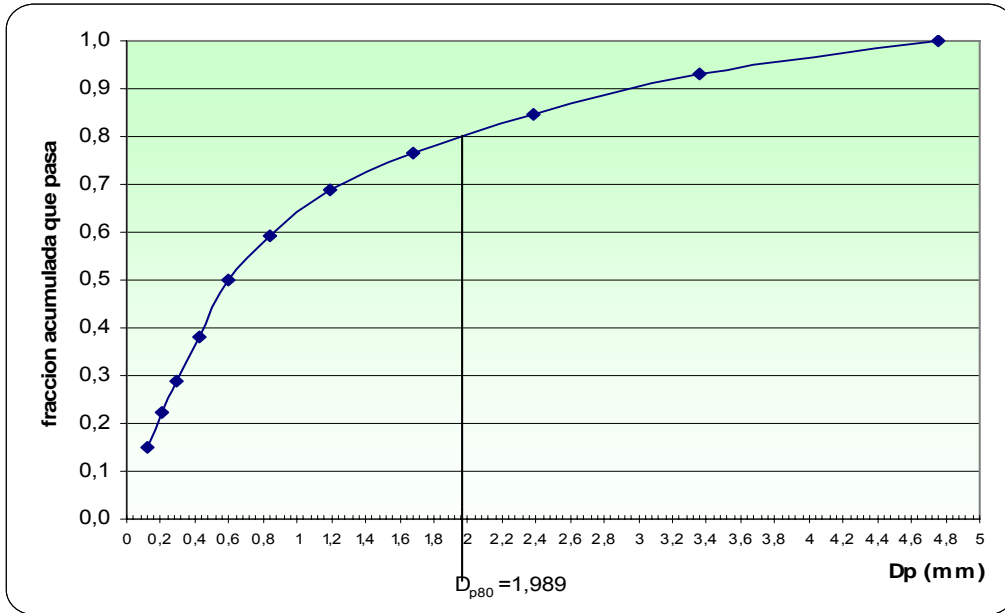
Es importante resaltar en ese punto, que según la literatura (1), los valores típicos de eficiencia energética de un molino de bolas se encuentran en el rango 0.06-1%.

Cuarzo

Índice de trabajo (W_i) = 18.09

Alimento: $D_{a80} = 3.36$ mm

Producto: 1.989

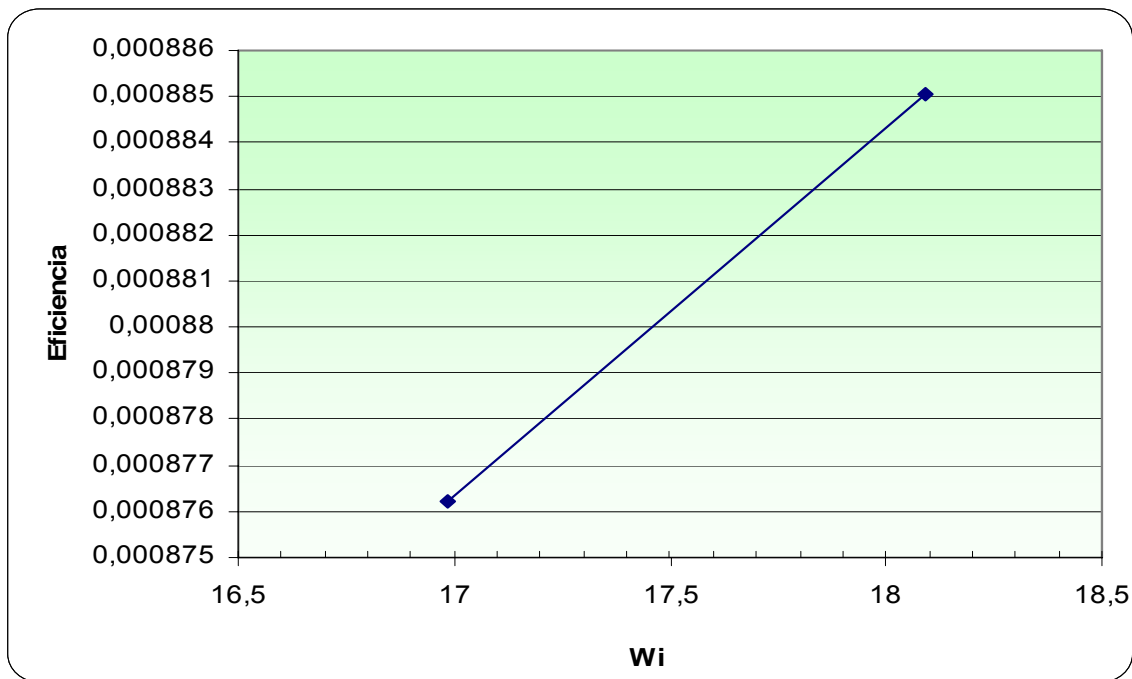


Potencia experimental: 0.8952kW

Potencia teórica (Ley de Bond): 7.92×10^{-4} kW

Eficiencia energética: 0.0885%

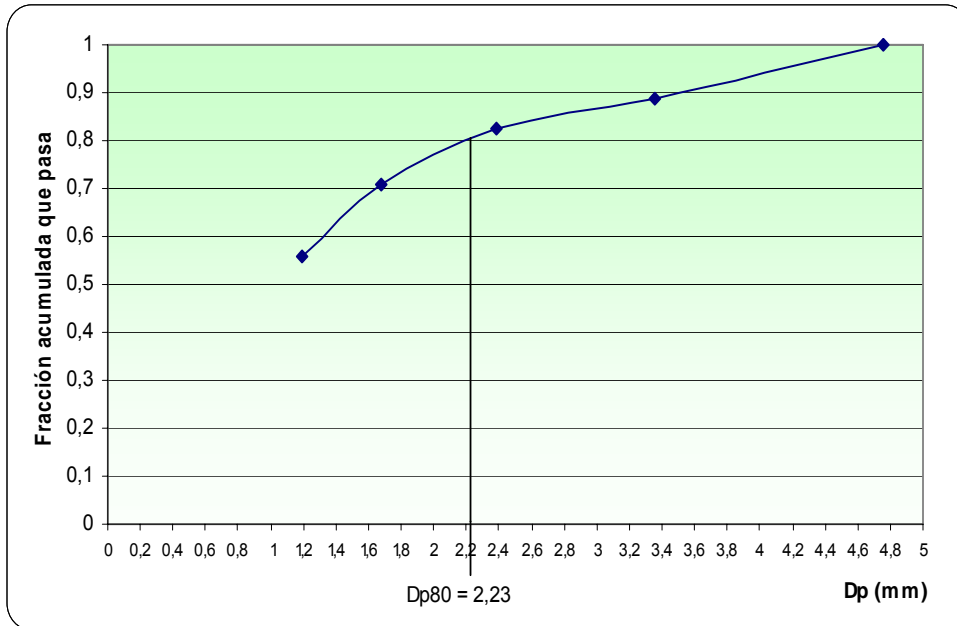
Curva de calibración



Carbón

Alimento: $D_{a80} = 4.76\text{mm}$

Producto:

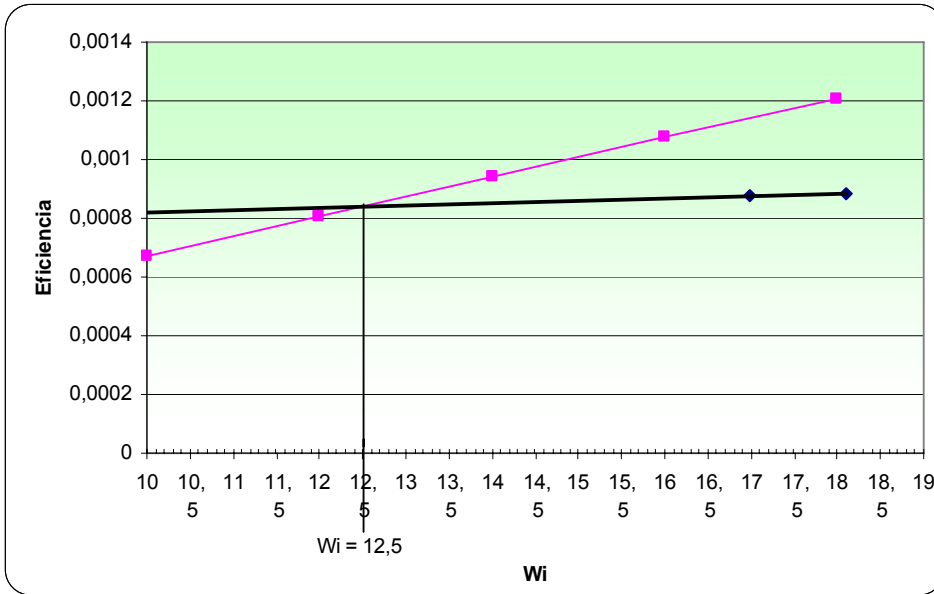


Potencia experimental: 0.8952kW

Potencia teórica (Ley de Bond): $6.013 \times 10^{-5} W_i$

$$\text{Eficiencia energética} = \frac{\text{Potencia teórica}}{\text{Potencia experimental}} = 6.7171 \times 10^{-5} W_i$$

La intersección de esta recta con la recta de calibración da el valor del índice de trabajo del carbón:



Índice de trabajo del carbón = 12.5

Este valor obtenido se encuentra dentro del rango 11-13 como señala la literatura (1) para la mayoría de tipos de carbón.

Anexo 3. Manual de molienda

Antes de iniciar la molienda es necesario asegurarse de contar con lo siguiente:

- ✓ Molino en buen estado
- ✓ Carbón debidamente adecuado para molienda (caracterizado, seco, etc....)
- ✓ Tester para medir consumo de corriente
- ✓ Llave de 9/16 para los tornillos de la compuerta de carga y descarga
- ✓ Ropa de trabajo adecuada
- ✓ Carga de bolas debidamente seleccionadas
- ✓ Sacos y recipientes para carga y descarga de carbón y bolas
- ✓ Balanza
- ✓ Cronometro
- ✓ Bitácora
- ✓ Lapicero

1. Se debe limpiar el molino antes de iniciar su operación. Una vez limpio revisar la instalación eléctrica e instalar el tester en uno de los hilos situándolo en la posición de 0.2–20 A.
2. Bolas: Una vez seleccionadas las bolas estas deben estar limpias. La distribución de estas se realizara de la siguiente manera: pesar 10 Kg. de bolas de 2½ pulgadas de diámetro, 40 Kg. de bolas de 2 pulgadas de diámetro y 40 Kg. de bolas de 1½ pulgadas de diámetro; almacenarlas todas juntas en un recipiente etiquetado como “BOLAS (-)” correspondiente al valor - de la variable:”Distribución de tamaño de cuerpos moledores” del diseño experimental. Después se pesarán 40 Kg. de bolas de 2 ½ pulgadas de diámetro, 40 Kg. de bolas de 2 pulgadas de diámetro y 10 Kg. de bolas de 1 ½ pulgadas de diámetro que serán almacenadas en un recipiente etiquetado como “BOLAS (+)” correspondiente al valor + de la variable:”Distribución de tamaño de cuerpos moledores” del diseño experimental.
3. Carbón: el carbón debe haber sido previamente secado, caracterizado y tamizado. Igualmente debe contarse con bolsas etiquetadas para el alimento, producto y las muestras a tomar.
4. Operación:
 - a. En la bitácora anotar la fecha y nombre del operario.
 - b. Encender el molino vacío anotar el primer valor leído en el tester en la sección de “Molino Vacío” en la casilla correspondiente a “Arranque”,

- durante 1 minuto observar el tester y anotar el valor alrededor del cual se estabiliza el consumo de corriente, en la casilla correspondiente a “Operación”. Apagar el molino. Esta lectura se debe realizar cada vez que se cambie el piñón.
- c. Utilizar la llave 9/16 para retirar los tornillos que aseguran la compuerta de carga del molino y abrirla
 - d. Seleccionar la carga de bolas de acuerdo a la tabla de diseño experimental e introducirlas en el molino.
 - e. Cerrar la compuerta de carga asegurándola con todos los tornillos y encender el molino anotar el primer valor leído en el tester en la sección de “Bolas” en la casilla correspondiente a “Arranque”, durante 1 minuto observar el tester y anotar el valor alrededor del cual se estabiliza el consumo de corriente en la casilla correspondiente a “Operación”. Apagar el molino. Esta lectura se debe realizar cada vez que se cambie la configuración de bolas.
 - f. Anotar el número del experimento y el número de molienda (1 si es una carga que se muele por primera vez) en la sección de experimentos y los valores correspondientes de + ó – en las casillas de variables.
 - g. Utilizar la llave 9/16 para retirar los tornillos que aseguran la compuerta de carga del molino y abrirla.
 - h. Pesar la cantidad de carbón indicada en la tabla de diseño experimental si es primera molienda; o seleccionar el saco con el carbón a moler de acuerdo al orden de los experimentos.
 - i. Introducir el carbón en el molino y asegurar la compuerta con todos los tornillos,
 - j. A un mismo tiempo iniciar el cronometraje y encender el molino, anotar el primer valor leído en el tester en la casilla de “Arranque”, durante 1 minuto observar el tester y anotar el valor alrededor del cual se estabiliza el consumo de corriente en la casilla correspondiente a “Operación”
 - k. Realizar la misma lectura del tester en el minuto 5 y en el minuto 14.
 - l. En el minuto 15 apagar el molino asegurándose de que la tapa quede en la parte superior.
 - m. Abrir la compuerta y retirar las bolas de manera tal que se pierda la menor cantidad posible de carbón.
 - n. Retirar el carbón cuidadosamente y seleccionar una muestra razonablemente homogénea de 200gr que será guardada en una bolsa hermética etiquetada con el número del experimento. El resto del carbón se almacenara en un saco etiquetado con el número del experimento y número de molienda si ha sido molido por en el otro caso se retornará al saco original y se anotará el nuevo número de molienda junto al anterior.
 - o. Limpiar el molino y el lugar de trabajo.
 - p. Realizar el tamizado de la muestra y posteriormente retornarla al cuerpo de carbón original.

Anexo 4. Lecturas de consumo de corriente.

Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
1	1	-	-	-
Arranque 5.0	Operación min. 1:	4.9 min. 5:	4.8 min.14:	4.7
Observaciones:				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
2	1	+	-	-
Arranque 5.3	Operación min. 1:	5.0 min. 5:	5.0 min.14:	5.0
Observaciones:				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
3	1	-	+	-
Arranque 5.8	Operación min. 1:	5.7 min. 5:	5.6 min. 14:	5.8
Observaciones:				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
4	1	+	+	-
Arranque 6.4	Operación min. 1:	6.3 min. 5:	6.2 min.14:	5.7
Observaciones: La molienda inició en un momento de descanso en el taller por lo que pocos equipos se encontraban encendidos, pero al finalizar ya se habían reanudado las labores.				

Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
1	2	-	-	-
Arranque 6.4	Operación min. 1:	6.5	min. 5:	6.5
Observaciones: la molienda fue realizada a medio día por lo que ningún equipo se hallaba encendido durante toda la operación				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
2	2	+	-	-
Arranque 5.4	Operación min. 1:	5.4	min. 5:	5.6
Observaciones: La molienda inició en un momento de trabajo en el taller pero finalizó en un momento de descanso cuando pocos equipos se encontraban encendidos.				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
3	2	-	+	-
Arranque 6.5	Operación min. 1:	6.5	min. 5:	6.6
Observaciones: la molienda fue realizada a medio día por lo que ningún equipo se hallaba encendido durante toda la operación				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
4	2	+	+	-
Arranque 5.2	Operación min. 1:	5.1	min. 5:	5.4
Observaciones:				

Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
1	3	-	-	-
Arranque	Operación			
5.3	min. 1:	5.3 min. 5:	5.2 min.14:	5.2
Observaciones:				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
2	3	+	-	-
Arranque	Operación			
5.2	min. 1:	4.9 min. 5:	4.9 min.14:	4.9
Observaciones:				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
3	3	-	+	-
Arranque	Operación			
6.9	min. 1:	6.8 min. 5:	6.6 min.14:	6.4
Observaciones: la molienda fue realizada a medio día por lo que ningún equipo se hallaba encendido durante toda la operación.				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
4	3	+	+	-
Arranque	Operación			
5.0	min. 1:	5.0 min. 5:	5.1 min.14:	5.2
Observaciones:				

Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
1	4	-	-	-
Arranque 5.2	Operación min. 1:	5.0	min. 5: 5.5	min.14: 5.1
Observaciones:				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
2	4	+	-	-
Arranque 4.8	Operación min. 1:	4.6	min. 5: 4.8	min.14: 4.9
Observaciones:				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
3	4	-	+	-
Arranque 6.4	Operación min. 1:	6.0	min. 5: 5.4	min.14: 5.1
Observaciones: La molienda inició en un momento de descanso en el taller por lo que pocos equipos se encontraban encendidos, pero al finalizar ya se habían reanudado las labores.				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
4	4	-	+	-
Arranque 5.4	Operación min. 1:	5.3	min. 5: 5.4	min.14: 6.3
Observaciones: La molienda inició en un momento de trabajo en el taller pero los últimos minutos se desarrollaron en el descanso de medio día cuando todos los equipos son apagados.				

Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón		
5	1	-	-	+		
Arranque 5.7	Operación min. 1:	5.5	min. 5:	5.5	min.14:	5.6
Observaciones:						
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón		
6	1	+	-	+		
Arranque 5.8	Operación min. 1:	5.4	min. 5:	5.6	min.14:	5.6
Observaciones:						
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón		
7	1	-	+	+		
Arranque 7.1	Operación min. 1:	7.0	min. 5:	7.0	min.14:	6.9
Observaciones: la molienda fue realizada a medio día por lo que ningún equipo se hallaba encendido durante toda la operación.						
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón		
8	1	+	+	+		
Arranque 6.1	Operación min. 1:	5.9	min. 5:	5.7	min.14:	5.8
Observaciones:						

Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón		
5	2	-	-	+		
Arranque 5.7	Operación min. 1:	5.5	min. 5:	5.5	min.14:	6.2
Observaciones: La molienda inició en un momento de trabajo en el taller pero los últimos minutos se desarrollaron en el descanso de la mañana cuando hay pocos equipos encendidos.						
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón		
6	2	+	-	+		
Arranque 5.8	Operación min. 1:	5.9	min. 5:	5.9	min.14:	5.6
Observaciones:						
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón		
7	2	-	+	+		
Arranque 7.1	Operación min. 1:	6.9	min. 5:	6.8	min.14:	5.5
Observaciones: La molienda inició al medio día por lo que ningún equipo se encontraba encendido, pero al finalizar ya se habían reanudado las labores.						
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón		
8	2	+	+	+		
Arranque 6.1	Operación min. 1:	5.5	min. 5:	5.5	min.14:	5.4
Observaciones:						

Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
5	3	-	-	+
Arranque	Operación			
5.8	min. 1:	5.7	min. 5:	5.8
				min.14:
				5.6
Observaciones:				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
6	3	+	-	+
Arranque	Operación			
5.5	min. 1:	5.3	min. 5:	5.5
				min.14:
				5.5
Observaciones:				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
7	3	-	+	+
Arranque	Operación			
6.5	min. 1:	6.3	min. 5:	6.5
				min.14:
				6.6
Observaciones: la molienda fue realizada a medio día por lo que pocos equipos se hallaban encendidos durante la operación.				
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón
8	3	+	+	+
Arranque	Operación			
5.8	min. 1:	5.9	min. 5:	5.7
				min.14:
				5.8
Observaciones:				

Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón		
5	4	-	-	+		
Arranque 5.2	Operación min. 1:	5.2	min. 5:	5.1	min.14:	5.9
Observaciones: la operación empezó en un momento de trabajo pero los últimos minutos coincidieron con el descanso de mediodía cuando pocos equipos se encuentran encendidos.						
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón		
6	4	+	-	+		
Arranque 6.0	Operación min. 1:	6.2	min. 5:	6.0	min.14:	5.5
Observaciones: la molienda inició a medio día cuando pocos equipos se encontraban encendidos y finalizó cuando ya se habían reanudado labores						
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón		
7	4	-	+	+		
Arranque 5.7	Operación min. 1:	5.7	min. 5:	5.7	min.14:	5.9
Observaciones:						
Experimento	# Molienda	Bolas	Alimento	Piñón		
8	4	+	+	+		
Arranque 6.0	Operación min. 1:	5.9	min. 5:	5.7	min.14:	5.8
Observaciones: la molienda fue realizada en un descanso por lo que pocos equipos se encontraban encendidos.						

Anexo 5. Molino operado en serie con otros equipos

MUESTRA INICIAL	Tamaño representativo (mm)	% Pasante malla 200	
	0.345 mm	19.14	
PRUEBA 1		TAMAÑO DE BOLAS	NÚMERO DE BOLAS
		2 ½ pulgada	0
		2 pulgadas	50
		1 ½ pulgada	200
5 MINUTOS	Tamaño representativo (mm)	% Pasante malla 200	
	0.331	22.06	
10 MINUTOS	Tamaño representativo (mm)	% Pasante malla 200	
	0.312	23.25	
15 MINUTOS	Tamaño representativo (mm)	% Pasante malla 200	
	0.297	25.56	

MUESTRA INICIAL	Tamaño representativo (mm)	% Pasante malla 200	
	0.345 mm	19.14	
PRUEBA 2		TAMAÑO DE BOLAS	NÚMERO DE BOLAS
		2 ½ pulgada	20
		2 pulgadas	50
		1 ½ pulgada	160
5 MINUTOS	Tamaño representativo (mm)	% Pasante malla 200	
	0.335	21.50	
10 MINUTOS	Tamaño representativo (mm)	% Pasante malla 200	
	0.315	25.40	
15 MINUTOS	Tamaño representativo (mm)	% Pasante malla 200	
	0.299	28.61	

MUESTRA INICIAL	Tamaño representativo (mm)	% Pasante malla 200	
	0.345 mm	19.14	
PRUEBA 3		TAMAÑO DE BOLAS	NÚMERO DE BOLAS
		2 ½ pulgada	34
		2 pulgadas	60
		1 ½ pulgada	60
5 MINUTOS	Tamaño representativo (mm)	% Pasante malla 200	
	0.342	21.01	
10 MINUTOS	Tamaño representativo (mm)	% Pasante malla 200	
	0.326	24.66	
15 MINUTOS	Tamaño representativo (mm)	% Pasante malla 200	
	0.310	27.33	

Resultados de los experimentos adicionales.

Anexo 6. Cálculo de los efectos e interacciones.

Efecto de la configuración de bolas:

Medida individual el efecto	% Llenado	%Nc
Exp2 – Exp1 = 5,46257869	75	36
Exp4 – Exp3 = –3,560013555	105	36
Exp6 – Exp5 = 5,573662368	75	64
Exp8 – Exp7 = –5,068824553	105	64

Efecto principal de la configuración de bolas = 0,601850738

Efecto del porcentaje de llenado:

Medida individual el efecto	Bolas	%Nc
Exp3 – Exp1 = 8,687723318	Menor	36
Exp4 – Exp2 = –0,334868927	Mayor	36
Exp7 – Exp5 = 18,44456562	Menor	64
Exp8 – Exp6 = 7,802078699	Mayor	64

Efecto principal del porcentaje de llenado = 8,649874677

Efecto del porcentaje de la velocidad crítica:

Medida individual el efecto	Bolas	%Llenado
Exp5 – Exp1 = 8,761107887	Menor	75
Exp6 – Exp2 = 8,872191566	Mayor	105
Exp7 – Exp3 = 18,51795019	Menor	75
Exp8 – Exp4 = 17,00913919	Mayor	105

Efecto principal del porcentaje de llenado = 13,29009721

Interacciones

Interacción ab

$$\frac{Exp8 + Exp4}{2} - \frac{Exp7 + Exp3}{2} = -4,314419054$$

$$\frac{Exp6 + Exp2}{2} - \frac{Exp5 + Exp1}{2} = 5,518120529$$

$$-4,314419054 - 5,518120529 = -9,832539583$$

Interacción ac

$$\frac{Exp8 + Exp6}{2} - \frac{Exp7 + Exp5}{2} = 0,25241891$$

$$\frac{Exp4 + Exp2}{2} - \frac{Exp3 + Exp1}{2} = 0,95128257$$

$$0,252418908 - 0,951282568 = -0,69886366$$

Interacción bc

$$\frac{Exp8 + Exp7}{2} - \frac{Exp6 + Exp5}{2} = 13,1233222$$

$$\frac{Exp4 + Exp3}{2} - \frac{Exp2 + Exp1}{2} = 4,1764272$$

$$13,12332216 - 4,176427196 = 8,946894963$$

Interacción abc

$$\frac{(Exp8 - Exp7) - (Exp6 + Exp5)}{2} = -5,32124346$$

$$\frac{(Exp4 - Exp3) - (Exp2 + Exp1)}{2} = -4,51129612$$

$$\frac{(-5,32124346) - (-4,51129612)}{2} = -0,40497367$$

Anexo 8. Reseña histórica

(adaptado de referencia 13)

Desde la antigüedad se han triturado materias agitándolas junto con materiales duros como rocas o metales dentro de un tonel, principio que da sentido al molino de bolas; sin embargo el registro confiable más antiguo de un molino de bolas, tal como hoy lo conocemos, se remonta al año de 1868 en el que un individuo de apellido Alsing utilizó este procedimiento para pulverizar sílice calcinado para la industria cerámica, por ello aun hoy en día los molinos de operación discontinua se conocen como molinos Alsing. Solo ocho años después, en 1976, comenzaron a promocionarse los molinos de operación continua por parte de varias firmas constructoras entre las que cabe destacar a la firma Krupp, quienes, aunque probablemente no fueron los primeros constructores, fueron los más importantes de su época y aun hoy en día se encuentran fuertemente ligados a la industria de los molinos de bolas. Los molinos Krupp eran máquinas aptas para molienda gruesa y posteriormente se utilizaron como mezcladores o premoledores cuando se introdujeron molinos cuya relación Longitud/Diámetro permitía la obtención de tamaños de partícula más finos al aumentar el tiempo de residencia en operación continua, se encuentran referencias de estos molinos anteriores a 1890 pero solo hasta 1892 son comercializados bajo el nombre de molinos Dana en Europa y de molinos Gates en Estados Unidos. Estos molinos tuvieron un rápido desarrollo en las fábricas de cal y cemento en donde reemplazaron a los molinos de muelas; y por otra parte vinieron a complementar a los clásicos moteros que desde el siglo anterior se utilizaban en la minería de oro. Estos morteros sobrevivieron un tiempo como preparadores hasta que en 1920 se introdujo la práctica de la recirculación paralelamente al uso de los molinos de barras como preparadores lo cual significó la definitiva desaparición de los morteros.

El uso del circuito cerrado de molienda con clasificador se extendió durante la primera década de siglo XX, tanto con el molino cilíndrico como con el molino cónico "Hardringe". En esta misma época se desarrollaron los molinos de múltiples compartimentos o molinos "compound" que reunían dentro de un mismo cuerpo un

compartimiento con bolas gruesas para desbastar seguido de etapas subsiguientes con bolas más pequeñas para refinar el producto. En 1920 se introdujeron los circuitos neumáticos de molienda o molinos ventilados gracias a la popularización de los sistemas de calefacción de carbón pulverizado.

En la actualidad se han desarrollado sistemas de simulación de la molienda cada vez más eficaces para reemplazar el tradicional empirismo en este campo. Así mismo se han desarrollado molinos de diferente tipo basados en el principio de operación del molino horizontal de bolas, al punto que puede hablarse de una categoría de “Molinos de Bolas”, dentro de la cual caben los molinos verticales como el Vertimill, los molinos vibratorios y los molinos planetarios.

