

MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

ISMM Moa

Dr. Antonio Núñez Jiménez

FACULTAD DE GEOLOGÍA Y MINERÍA

Departamento de Minería

**Metodología para la producción de sustancias
explosivas simples**

**TESIS EN OPCIÓN AL GRADO CIENTÍFICO DE
DOCTOR EN CIENCIAS TÉCNICAS**

RESUME

Aspirante: MSc. Pascual Verdecía Vicet

Tutores: Prof. Titu; Ing. José A. Otaño Noguel. Dr. C.

Prof. Aux. Ing. Alberto Hdez Flores. Dr.C.

SÍNTESIS DE LA TESIS "Metodología para la producción de sustancias explosivas simples".

En el trabajo de investigación se exponen los estudios llevados a cabo sobre los procesos tecnológicos para la producción de sustancias explosivas simples, a base de nitrato de Amonio y cascarillas de café o de cacao.

Se realiza un conjunto de ensayos experimentales a escalas de laboratorio e industrial, en el campo de la reducción de tamaño de estos materiales con el uso del molino de bolas a partir de un diseño factorial, obteniéndose las curvas características del comportamiento de los factores que intervienen en el proceso de reducción hasta granulometría por debajo de 0,5 mm para cada uno de los materiales y en el campo de la homogeneización para la obtención de las mezclas explosivas.

Se realiza, además, un estudio de la reducción de tamaño de dichos materiales con el uso de un molino Rotor SR-2 y se valora la idoneidad del mismo para el trabajo de reducción de las cascarillas.

Finalmente, se analizan los procesos de secado, molienda, transporte, clasificación, mezclado y embalaje y se presenta una metodología para la producción de las mezclas explosivas, a partir de las investigaciones, los análisis y los cálculos realizados en el trabajo.



INTRODUCCIÓN

Los extraordinarios adelantos realizados en los últimos tiempos en el campo de la ciencia y la tecnología, representan un reto, particularmente difícil para los países en desarrollo. Tales avances brindan nuevas oportunidades, pero para aprovecharlas esos países tienen que aumentar rápidamente su capacidad para aplicar las nuevas tecnologías en la promoción de su desarrollo y para elegir de forma apropiada entre las disponibles.

En la actual coyuntura la política de la revolución está encaminada a reorganizar y desarrollar la economía, a desarrollar la industria nacional, diversificar e incrementar la producción agropecuaria y lograr un aumento progresivo de las exportaciones, disminuyendo en lo posible las importaciones de manera que salgamos del período especial en que estamos inmersos en el tiempo más breve posible. Esto implica entre otros aspectos el desarrollo e introducción más rápido de los adelantos científicos y técnicos.

En la resolución económica del V Congreso del PCC se reconoce la existencia de potencialidades y reservas en todos los sectores y ramas que, bien explotadas, pueden proporcionar al país recursos superiores a los que obtenemos; se plantea la necesidad de sustituir importaciones dondequiera que ello sea posible y la aplicación de la ciencia y la técnica (Castro Ruz, F. 1997).

Dentro de los renglones a desarrollar están el turismo y otras obras sociales con grandes inversiones, para lo cual, entre otras necesidades, requieren de un gran volumen de materiales de construcción que, en su mayor parte se extraen con el uso de los explosivos.

Actualmente se producen dos mezclas explosivas en el país: (TECTRON y la Nitromiel húmeda o seca), las cuales no satisfacen todas las exigencias de la gama de explosivos que por sus características demandan los diferentes trabajos que se realizan con el uso de los mismos por lo cual parte de ellos se importa.

En consonancia con esta problemática, en el ISMM de Moa Dr. Antonio Núñez Jiménez se ha venido trabajando en la investigación de algunas mezclas explosivas pulverulentas a base de nitrato de amonio y cascarilla de café o cacao así como su tecnología de producción.

El uso de los explosivos pulverulentos se remonta al surgimiento de la pólvora y las características de los mismos depende de una serie de factores, entre los cuales están presentes la granulometría de los componentes y el grado de homogenización. Estas características requieren siempre de procesos mecánicos para su obtención.

Uno de los aspectos a tener en cuenta en la producción de una mezcla explosiva pulverulenta, es el diámetro crítico de los cartuchos que con ella se pueden producir; en él influye la composición granulométrica de los materiales componentes y de la mezcla en cuestión.

Los materiales que se estudian en esta investigación constituyen elementos componentes de las mezclas explosivas pulverulentas (nitrato de amonio y cascarilla de cacao y, nitrato de amonio y cascarilla de café), los cuales requieren de un proceso de reducción granulométrica.

Uno de los equipos que con frecuencia se usa en la industria para la reducción granulométrica de los materiales, tanto por vía húmeda como por vía seca, es el molino de bolas, este es ampliamente utilizado en el mundo en la industria de preparación de minerales, también se conoce de su uso en la industria de los explosivos para procesos de intimación de mezclas (Informe Técnico S/A), pero no se conoce de su uso en la reducción de materiales fibrosos tales como las cascarillas de café y cacao.

Problema, hipótesis y objetivo de la investigación.

Para hacer estas formulaciones es importante tener en cuenta los siguientes aspectos:

- Actualmente Cuba se encuentra en una etapa de reorientación de la economía, en la cual se tiene como línea producir al máximo con los componentes nacionales, aumentar las exportaciones y disminuir las importaciones de todo tipo, dentro de estos, la rama de los explosivos es una en la cual se tiene que trabajar bajo esas concepciones y los materiales existentes brindan esas posibilidades.
- Cada explosivo tiene un conjunto de propiedades que lo limita a ser utilizado en determinadas condiciones, en dependencia de las exigencias de la labor a acometer, será el tipo de explosivo a utilizar.
- El análisis de la situación de los explosivos en Cuba, nos permite ver que existe un amplio uso de los mismos en las diferentes ramas de la industria, con una gama de surtidos de este producto, una parte de los cuales se importa, ya que en el país sólo se producen dos tipos y no satisfacen todas las necesidades en todas las ramas de la industria.
- El análisis de los recursos existentes en el país para la producción de explosivos demuestra que se cuenta con materia prima suficiente y de fácil adquisición para estos fines.
- El análisis de la evolución de la tecnología de los explosivos en el mundo, demuestra que el Nitrato de Amonio es el oxidante más usado en la fabricación de mezclas explosivas de este tipo, y que en el país es posible la instalación de una pequeña planta para la producción de un explosivo pulverulento, a partir del Nitrato de Amonio como oxidante y la cascarilla de café o de cacao, como combustible, sensible a la cápsula detonante número 8 y que sea posible utilizarlo en la industria minera, tanto en los trabajos a cielo abierto como subterráneos, en la industria de materiales de construcción, en la construcción de túneles populares y en el trabajo con los metales.
- El NH_4NO_3 que se produce en las plantas del país presenta una granulometría máxima que oscila entre (3 y 3,5) mm y se requiere reducir a granulometría por debajo de 0,5 mm (grado de reducción 6), para lo cual no se conocen estudios de la cinética de la molienda de este material.
- Las mezclas explosivas obtenidas en trabajos precedentes, a partir del Nitrato de Amonio como oxidante y la cáscara o cascarilla de café o la cascarilla de cacao, como combustible, exigen de un mezclado en determinada proporción, determinada densidad y una granulometría con dimensiones de las partículas por debajo de los 0,5 mm.

Si se tiene en cuenta, además, que las materias primas para la producción de estas mezclas presentan porcentajes muy pequeños (2,4 % de Nitrato de amonio, 0,474 % de cascarilla de café y 1,894 % de cascarilla de cacao) con granulometría por debajo de 0,5mm. Y que se desconoce la tecnología de la producción a escala industrial de estas mezclas, la tarea de la investigación está encaminada a resolver el siguiente:

PROBLEMA

El problema fundamental que ocupa la investigación que se realiza consiste en:

¿ Cómo lograr mediante procesos tecnológicos la producción industrial de las mezclas explosivas a base de nitrato de amonio y cascarillas de café o de?.

HIPÓTESIS

Si se logra establecer la relación entre los aspectos tecnológicos: cinética de la molienda, clasificación de las partículas y la cinética del proceso de mezclado es posible la elaboración de una metodología para la obtención industrial de mezclas explosivas simples a base de NH_4NO_3 y cascarillas de café o de cacao.

OBJETIVO

Elaborar una metodología que permita la obtención de los materiales con las características granulométricas necesarias para producir las mezclas explosivas a base de Nitrato de Amonio y cascarilla de café o de cacao con el grado de homogenización efectiva para su uso en los trabajos de voladuras.

Novedad científica.

1. Se obtiene una metodología para la producción industrial de las mezclas explosivas a base de nitrato de amonio y cascarilla de café o de cacao.
2. Se establece la relación entre los aspectos tecnológicos cinética de la molienda y del mezclado a partir de la obtención de las curvas características de los factores que intervienen en el comportamiento de los materiales durante los procesos de reducción de tamaño y homogenización de las mezclas.
3. Se establecen los parámetros de molienda del Nitrato de amonio, la cascarilla de cacao y la cascarilla de café a partir de la obtención de las curvas características de su comportamiento durante el proceso de reducción hasta una granulometría por debajo de 0,5mm.

Significación práctica de la investigación.

Las sustancias explosivas a producir cuentan con una base de materia prima para el componente combustible, procedente de plantaciones perennes, que están ubicadas en las zonas montañosas del país, que son menos vulnerables, en caso de agravamiento del bloqueo que sostiene los Estados Unidos contra nuestro país.

La metodología propuesta para la producción industrial de las sustancias explosivas permite diseñar las plantas productoras.

CAPITULO I: ESTUDIO DE LA SITUACIÓN DEL PROBLEMA Y FORMULACIÓN DE LAS TAREAS DE INVESTIGACIÓN.**Trabajos precedentes.**

Durante el desarrollo de la presente investigación fueron consultados un gran número de materiales bibliográficos, de los cuales en el trabajo sólo se refieren los que contribuyeron al desarrollo de la misma, como se observa, es muy variada, debido a la diversidad de temáticas indagadas, no obstante es bueno resaltar los trabajos relacionados con la temática realizados por los autores: (Videaux D., M.; Otaño N., J. y Batista L., J. 1990; Roselló W., N. y Verdecia V., P. 1990; Herrera M., V. y Otaño N., J. 1990; Lavín R., L.R. y Otaño N., J. 1991; Otaño N. y Batista L. 1992; Reyes N., W. 1994; González P., A. y Otaño N., J. 1995; Batista L., J.; Valdés C., J. y Miranda D., J. 1996; Otaño N., J.; Batista L., J. y Montero, J. 1996; Manuel A., I. y Verdecia V., P. 1998; Otaño N., J.; Batista L., J. y Verdecia V., P. 1998; Batista L., J. 1999) en el estudio de las mezclas explosivas formadas por NO_3NH_4 con cascarilla de cacao y NO_3NH_4 con cascarilla de café, obteniendo un gran número de características de los materiales utilizados, así como, de las mezclas obtenidas y un estudio de las características de uso de cada una; (Lavín R., L.R. y Otaño N., J. 1991), realizan un estudio de las mezclas explosivas a base de Nitrato de Amonio y cascarilla de café. (Otaño N., J. A., Batista L., J. y Verdecia V., P. 1996), publican la obtención de nuevas sustancias explosivas; se ensayan las mezclas

explosivas a base de nitrato de amonio (NA) y cascarilla de cacao y nitrato de amonio y cascarilla de café en la soldadura bimetálica, obteniéndose buenos resultados (Roselló W., N. y Verdecia V., P. 1990).

Estos materiales que componen las mezclas presentan granulometría por encima de las exigidas y no se tiene ninguna información precedente acerca de un estudio de la reducción de tamaño de los materiales (cascarillas de café y de cacao). En el caso del nitrato de amonio, se conoce que, en algunas instalaciones tecnológicas, se ha empleado el molino de martillo para su reducción y el tambor rotatorio para el proceso de mezclado o intimación (Informe Técnico S/A).

El profesor S.E. Andréiev (1881-1964) define el grado de trituración como la relación de las dimensiones de los trozos de máximo grosor del material antes y después del triturado. Define además, como leyes de la trituración, la dependencia del trabajo empleado en la trituración (desmenuzamiento) con respecto al resultado de la trituración, o sea, con respecto al grosor del producto (E. Andreiev S., A.; Perov V., V.; Zverievich, V. 1980).

P. Rittenger (1867) supuso que el trabajo consumido en la división de un cubo aislado en otros más pequeños es directamente proporcional a la nueva superficie formada.

Kik-Kirpichov (1874-1875) plantea que a deformaciones semejantes de cuerpos geoméricamente semejantes y físicamente iguales, corresponden trabajos proporcionales a los volúmenes de los cuerpos.

La tercera teoría de la reducción fue publicada por Fred C. Bond en 1952 y en su forma actual en 1960. El índice de trabajo propuesto por Bond se utiliza para la determinación de la potencia requerida en la reducción de tamaño. Para determinar este índice existen métodos aproximados.

El método de Berry y Bruce (1966) compara dos muestras que son molidas en molinos de laboratorio en idénticas condiciones, una de ellas conocida, a partir de las cuales obtiene el índice de trabajo.

Smith y Lee (1968) determinan mediante un gran número de ensayos que la ecuación de Bond puede ser empleada para diferentes tamaños del producto molido y trabajando con menos de 300 revoluciones en los ensayos.

El método de Horst y Bassarear (1975) también se basa en comparar el material desconocido con un patrón, pero se diferencia del de Berry Bruce en que no considera sólo un tamaño límite, sino que el mismo usa la distribución granulométrica del material alimentado y la ecuación cinética de primer orden.

Kanpur (1970) desarrolla un método de simulación para ensayo de molibilidad de Bond.

El método de Karra (1981) modifica el algoritmo de Kapur al realizar una serie de correcciones en correspondencia con la composición granulométrica y otros.

El método de Yashima y colaboradores (1970) desarrolla una relación empírica que correlaciona el índice de trabajo con las propiedades mecánicas de 7 materiales diferentes.

El método simplificado de Anaconda (1982) aunque fue desarrollado con un tipo de molino específico, presenta la ventaja de que puede ser ejecutado con otro tipo de molino, empleando métodos de calibración.

S. E. Andréiev considera que para el desmenuzamiento fino siendo grandes las superficies específicas de productos (para 1 t) se aplica la ley de Rittenger (E. Andreiev S., A.; Perov V., V.; Zverievich, V. 1980), y para la trituración, cuando los productos tienen superficies específicas pequeñas conviene más la ley de Kik-Kirpichov. La ley de Bond ocupa una posición intermedia.

Estas leyes han sido deducidas para unos esquemas de reducción de tamaño bastante simples, por ejemplo la ley de Rittenger se basa en la teoría de resistencia que toma en consideración el desarrollo de grietas en el cuerpo tesado, en este caso es poco objetivo trasladar el resultado referido a un grano al conjunto de granos reales durante el proceso industrial.

La metodología seguida durante el desarrollo de las investigaciones, se presenta por etapas a continuación, esta ha sido similar a otras empleadas en trabajos similares relacionados con

el diseño, cálculo y proyección de fábricas e industria, con algunas peculiaridades necesarias. Las etapas de trabajo fueron las siguientes:

Primera etapa: lo constituye una amplia revisión bibliográfica en la cual se indagó lo existente acerca de la temática, se definió el objeto y campo de acción de dicha investigación (Objeto: Los procesos de producción de mezclas explosivas industriales. y Campo de acción: Los explosivos a base de nitrato de amonio y los combustibles vegetales cáscara o cascarilla de café y cascarilla de cacao). Se formula el problema, los objetivos y las tareas a realizar para lograr los resultados necesarios.

Segunda etapa: la constituye un conjunto de ensayos experimentales a escala de laboratorio e industrial, donde se determinan las características físico-mecánicas de los materiales componentes y de las mezclas a producir, y se realiza un estudio de la cinética de la molienda de los mismos usando el molino de bolas, a partir de un diseño factorial fraccionado empleando el criterio de Fisher. Además, se realiza un estudio de la cinética del proceso de homogeneización durante la producción de las sustancias explosivas.

La contradicción del Objeto es la reducción de las partículas y la homogeneización de las mezclas.

La contradicción del campo son las características físico-químicas y la proporción de los materiales para la producción de las mezclas.

Características de los materiales componentes de las mezclas a producir.

Teniendo en cuenta los trabajos realizados hasta la fecha y en específico los que se desarrollan en el Instituto Superior Minero Metalúrgico alrededor de esta temática (Videaux D., M.; Otaño N., J. Y Batista L., J. 1990), (Roselló W., N. Y Verdecia V., P. 1990), (Otaño N. y Batista L. 1992), (Manuel A., I. y Verdecia V., P. 1998), (Lavín R., L.R. y Otaño N., J. 1991), (Herrera M., V. y Otaño N., J. 1990), (González P., A. y Otaño N., J.), (Batista L., J. 1999), (Batista L., J.; Valdés C., J. y Miranda D., J. 1996), (Otaño N., J.; Batista L., J. y Montero, J. 1996), (Otaño N., J.; Batista L., J. y Verdecia V., P. 1998), se escogieron para la producción de explosivos a los siguientes materiales:

Nitrato de Amonio ($\text{NH}_4 \text{NO}_3$), la cascarilla de café y la cascarilla de cacao.

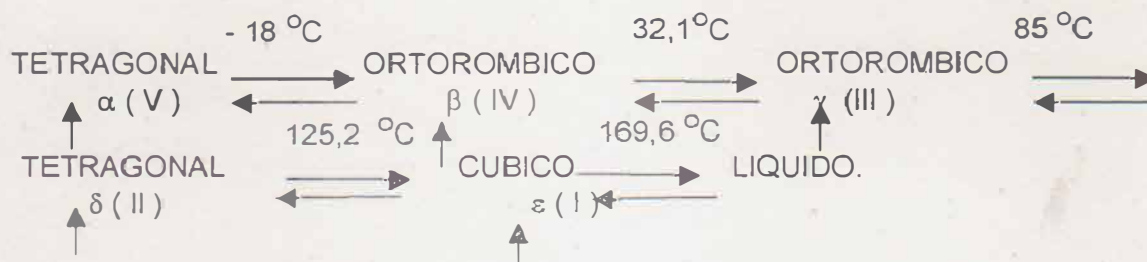
Características del Nitrato de Amonio.

Es el componente básico de las sustancias explosivas de salitre amoniaco y en grado considerable, determina las propiedades físico-químicas y explosivas de estas.

Es el oxidante más difundido en la producción de sustancias explosivas industriales. La facilidad de obtención de la materia prima inicial, así como, la sencillez y seguridad de la tecnología de obtención y elaboración durante la producción de sustancias explosivas, fundamenta su amplia utilización.

El nitrato de amonio es un conjunto de pequeños granos movedizos, cristalinos de color blanco, fuertemente higroscópico y de sabor amargo con una masa volumétrica de $0,8 - 1 \text{ g/cm}^3$ y densidad de $1,72 \text{ g/cm}^3$, soluble en agua.

Se define como una sal inorgánica de color blanco cuya temperatura de fusión es de $169,6^\circ \text{C}$ (Instituto Tecnológico Geominero de España 1994). Este pasa por 5 modificaciones o formas cristalinas, al variar su temperatura desde -18°C hasta $169,6^\circ \text{C}$.



Al pasar de una modificación a otra, varía su densidad y su volumen al recrystalizarse. (Instituto Tecnológico Geominero de España 1994).

Según ficha técnica dada por el fabricante, el nitrato de amonio que se produce en la Empresa de Fertilizantes "Revolución de Octubre" del municipio Nuevitas de la provincia Camagüey tiene las siguientes características:

Tabla I: Características del nitrato que se produce en la fábrica de Nuevitas.

Índice ensayado	UM	Resultado
Humedad	%	0,5
Acidez (HNO_3)	%	0,02
Cloruro (CL)	%	0,0005
Hierro (Fe^{2+})	%	0,001
Fosfato (PO_4^{3-})	%	0,001
Sulfato (SO_4)	%	0,001
Insolubles	%	0,02
Metales pesados	%	0,01
Nitritos	%	Ausentes
Cenizas	%	0,02
Pureza	%	99
pH de solución al 10 %	U	4 a 6

Características de los materiales combustibles (cascarilla de café y cascarilla de cacao)

- **Cascarilla de café:** existen varias zonas cafetaleras en el país con despulpadoras para procesarlo, donde se obtiene la cascarilla como uno de los productos desechables; en algunos lugares utilizan parte de ella para producir pienso para los animales, por lo que existen abundantes reservas a utilizar con otros fines. Presenta forma de hojuelas o laminillas con longitudes de aproximadamente 1 cm y un bajo porcentaje del material con granulometría por debajo de 0,5 mm.
- **Cascarilla de cacao:** este producto se encuentra en el país en menos cantidades que el café, su mayor producción está en la zona del municipio de Baracoa de la provincia de Guantánamo y sus cascarillas son poco utilizadas con otros fines, presenta forma de hojuelas o laminillas con longitudes de aproximadamente 1,2 cm y un bajo porcentaje del material con granulometría por debajo de 0,5 mm.

Ensayos realizados con las mezclas.

Para caracterizar la efectividad de las mezclas explosivas a producir, se realizaron además, ensayos en el laboreo de excavaciones subterráneas, tales como: Túnel popular de sección estrecha del Municipio Moa; túnel popular de sección ancha del Municipio Moa; galería de la mina Merceditas; túnel de gran sección, en la empresa de Construcciones Militares de Holguín. En cada caso se determinaron los siguientes índices evaluativos (Batista L., J. 1999):

Coeficiente de aprovechamiento de los barrenos;

Granulometría de las rocas fragmentadas por la explosión;

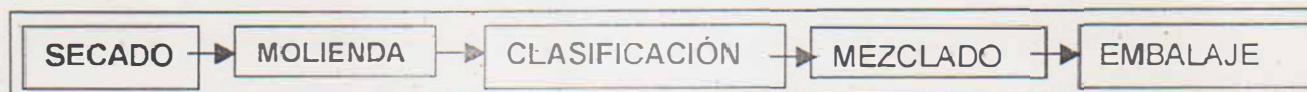
Características del montón de rocas producto de la explosión;
Contorneado de la excavación.

En todos los índices los resultados fueron similares a los de la Amonita 6jv.

Se realizaron también algunos trabajos en los metales, soldando planchas para formar uniones bimetálicas (Roselló W., N. y Verdecia V., P. 1990), obteniéndose buena unión en todos los ensayos.

Conclusiones del capítulo I

- Las mezclas explosivas obtenidas en trabajos precedentes, a partir del Nitrato de Amonio como oxidante y la cascarilla de café o la cascarilla de cacao, como combustible, necesitan la determinación de un tiempo óptimo de mezclado en determinada proporción, determinada densidad y una granulometría con dimensiones de las partículas por debajo de los 0,5 mm.
- Para la producción de las mezclas explosivas se quiere reducir el NH_4NO_3 y las cascarillas a granulometría por debajo de 0,5 mm, para lo cual no se conocen estudios de la cinética de la molienda de estos materiales con el uso del molino de bolas.
- La reducción de tamaño de estos materiales a granulometría por debajo de 0,5 mm requiere de un proceso de secado previo.
- Teniendo en cuenta las mezclas a producir se consideró un esquema formado por varios procesos, como el que se muestra a continuación:



Es decir, realizar un proceso de secado previo a la molienda, para garantizar la eficiencia del proceso, luego un proceso de clasificación que permita obtener las características granulométrica de los materiales, seguidamente un proceso de mezclado donde se obtenga la mezcla con la relación porcentual y homogeneidad deseada y finalmente un proceso de embalaje para el ensacado y encartuchado de las mezclas con las densidades requeridas.

Tareas de la investigación.

Una vez concluida la primera etapa, para dar cumplimiento al objetivo de trabajo se deben resolver Las siguientes tareas:

- Determinar las propiedades físicas necesarias de la cascarilla de café y la cascarilla de cacao, para el cálculo de los procesos tecnológicos.
- Análisis del secado de los materiales.
- Investigación de la cinética de la molienda de los materiales componentes.
- Análisis del proceso de clasificación de los componentes.
- Análisis de la cinética del proceso de mezclado.
- Cálculo de la variante de los procesos tecnológicos para la producción de las mezclas a escala industrial.
- Elaboración de una metodología para la producción industrial de las mezclas.

CAPITULO II: INVESTIGACIÓN EXPERIMENTAL DE LOS PROCESOS DE PREPARACIÓN DE LOS MATERIALES.

Secado de los materiales.

Secado del nitrato de amonio.

Por las características higroscópicas de este material no es posible el uso de la energía solar para la eliminación de la humedad. Las investigaciones de cinética de la molienda de este material demostraron la necesidad del uso de hornos u otras formas de secado para eliminar la humedad de dicho material.

Secado de las cascarillas de café y de cacao.

Durante los primeros ensayos del estudio de la cinética de la molienda de estos materiales se sometieron a un proceso de secado artificial con temperatura entre 60 y 80 °C por tiempos de alrededor de una hora y los resultados conllevaron a realizar un estudio para el uso de la energía solar en el secado de los mismos y se procedió al siguiente diseño experimental.

Se tomaron muestras de cascarillas de cacao y café, se le determinó la humedad (ver tablas 2 y 3) y luego se depositaron en bandejas plásticas con dimensiones de 0,5x0,6 m, con un espesor de capa de 0,05 m, se le colocó un termómetro en su interior y se situaron en un área sin viento e intenso sol, con humedad relativa del medio entre 60 % y 70%, y registro de temperatura entre 25 °C y 29 °C, se tomaron las lecturas de los termómetros a intervalos de tiempos de 15 min. y se obtuvo el comportamiento de los materiales bajo la acción de ese medio, luego se le determinó la humedad final, se determinó la masa de material en cada bandeja y se sometieron al proceso de molienda observándose que los mismos eran molibiles de 85 % a 90 % con un tiempo de retención de 40 min. utilizando el molino de bolas, no siendo así cuando se utilizó el molino de rotor SR-2, en el cual, el material se molía todo perfectamente, incluso, con un porcentaje de humedad mayor al que poseían los materiales cuando se empleó el molino de bolas.

Tabla 2: Porcentajes de humedad de la cascarilla de café antes del proceso de secado.

N° de muestra	Masa de la muestra (g)		Humedad de la muestra	
	Húmeda	Seca	%	g
1	20,040	16,967	15,334	3,073
2	20,040	16,466	17,834	3,574
3	20,040	16,498	17,674	3,542
4	20,040	17,036	14,990	3,004
5	20,040	17,022	15,059	3,018
6	20,040	17,592	12,215	2,448
Prom.	-	-	15,517	-

Media	14,37
Error típico	1,49
Mediana	13,82
Desviación estándar	3,65
Varianza de la muestra	13,33
Rango	11,08
Mínimo	10,05
Máximo	21,13
Nivel de confianza(95,0%)	

Tabla 3: Porcentajes de humedad de la cascarilla de cacao antes del proceso de secado.

N° de muestra	Masa de la muestra (g)		Humedad de la muestra	
	Húmeda	Seca	%	g
1	20,040	15,814	21,130	4,234
2	20,040	17,188	14,231	2,852
3	20,040	17,217	14,085	2,823
4	20,040	18,026	10,049	2,014
5	20,041	17,413	13,140	2,633
6	20,046	17,328	13,557	2,718
Promedio	-	-	14,365	-

Media	15,52
Error típico	0,85
Mediana	15,20
Desviación estándar	2,07
Varianza de la muestra	4,29
Rango	5,62
Mínimo	12,22
Máximo	17,83
Nivel de confianza(95,0%)	

Los resultados expuestos en las tablas 2 y 3 muestran que los porcentajes de humedad de las cascarillas de café y cacao son apreciables. Estos van a tener gran influencia en la eficiencia del proceso de reducción de tamaño de estos materiales, por lo cual exigen de un secado previo a la molienda. Estos materiales salen de los procesos de limpieza de los granos del café y de cacao con un porcentaje de humedad bastante estable, ya que ambos pasan por un secado previo, lo cual da una idea de los porcentajes medios de humedad con que se reciben los materiales.

Partiendo de los datos anteriores se determinó la masa volumétrica media del material depositado en las bandejas.

Esto permitirá más adelante determinar el área necesaria para el secado de estos materiales utilizando la energía solar.

Investigación de la cinética de la molienda de los materiales.

En nuestro caso se realizaron análisis de la cinética de la molienda a nivel de laboratorio.

Los ensayos se realizaron con el uso de dos molinos, un molino de bolas cilíndrico, que permitió trabajar con tres valores de r.p.m. en determinado rango y un molino de Rotor SR-2 de brazos fijos con parrilla interna.

Para el análisis de la cinética de la molienda de los materiales utilizando el molino de bolas, se trabajó según un diseño de investigación a partir del cual, para lograr el régimen de molienda más racional nos apoyamos en los siguientes factores.

Variar el tiempo de retención (t).

Variar la carga de material (M).

Variar el número de r.p.m. en el eje del molino (R).

Variar la carga de bolas en el molino (Q).

Plan de experimentación y resultados de las variables.

La matriz de planificación y los resultados de las variables de salida Y , que en este caso es el porcentaje de material que sale del molino con granulometría por debajo de 0,5 mm, aparecen en la tabla 7.

Los 4 factores que se tienen, se fijan a tres niveles, por tanto, el diseño es factorial de la forma 3^4 , es decir, el número de experimentos necesarios es $3^4 = 81$, se realiza este diseño fraccionado teniendo en cuenta el volumen de experimentos a realizar y las posibilidades materiales que existen, para lo cual se tomaron solamente tres factores, resultando un número de 27 experimentos, se codificaron las variables y la última se obtuvo a partir de la interacción de las otras tres (ver condiciones del experimento y matriz de experimentación, tablas 6 y 7).

Las características de grosor de la carga de bolas debe garantizar el mayor estrujamiento y número posible de impactos sobre el material a moler, con el objetivo de garantizar esto, se preestablecieron los valores de masa de las cargas de bolas a utilizar y sus características de grosor, partiendo de los tamaños máximos de las partículas de los materiales a moler y la granulometría a obtener, los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4: Composición de las cargas de bolas según el tamaño.

COMPOSICIÓN PARA LA MOLIENDA DE LAS CASCRILLAS								
Grosor en mm	9 Kg.	# de bolas	10 Kg.	# de bolas	11 Kg.	# de bolas	12 Kg.	# de bolas
60	40	9	40	8	40	7	40	6
50	30	11	30	10	30	9	30	8
45	15	8	15	7	15	6	15	6
30	10	17	10	15	10	14	10	13
22	5	22	5	20	5	18	5	16
COMPOSICIÓN DE BOLAS PARA LA MOLIENDA DEL NH_4NO_3								
Grosor en mm	9 Kg.	# de bolas	10 Kg.	# de bolas	11 Kg.	# de bolas	12 Kg.	# de bolas
45	42	17	42	19	42	21	42	23
40	38	22	38	25	38	27	38	30
30	17	24	17	26	17	29	17	31
18	3	19	3	21	3	24	3	26

Nitrato de Amonio.

Para dar comienzo al estudio de la cinética de la molienda, variando cada uno de los parámetros anteriores, según el diseño de investigación, se realizó un análisis previo de la composición granulométrica del Nitrato de Amonio que se produce en Nuevitas y el mismo arrojó los resultados mostrados en la tabla 5 y gráficamente podemos verlo en las figs. 1 y 2.

Tabla 5: Distribución granulométrica del nitrato de amonio antes de someterlo a un proceso de molienda.

Nº de ensayo	Porcentaje de partículas con tamaño:						
	+3,0	-3,0 +2,5	-2,5 +2,0	-2,0 +1,5	-1,5 +1,0	-1,0 +0,5	-0,5 +0,0
Promedio	22,8	28,5	21,6	18,4	4,3	2,0	2,4

Como se puede observar, las características de grosor, tanto en las figuras (1 y 2), constituido por los diagramas de columna y las características sumarias, como en la tabla 5, por debajo de 0,5 mm, sólo se tiene un 2,4 %, los mayores porcentajes se registran por encima de los 2 mm. Esto indica que se debe someter el material a un proceso de reducción de tamaño.

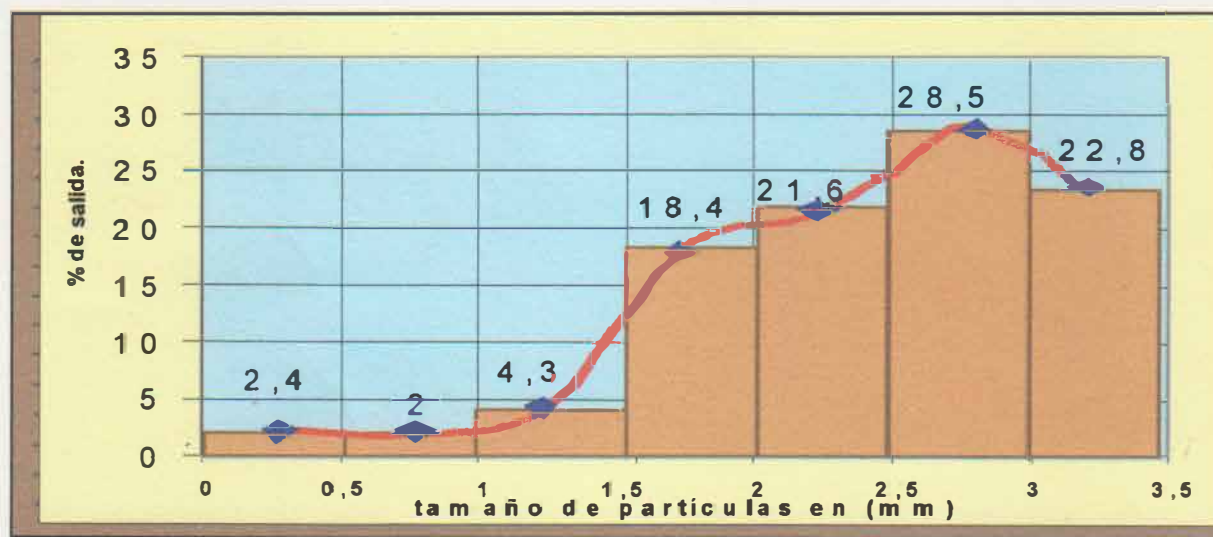


Fig. 1: Porcentaje de salida de nitrato según tamaño de partículas.

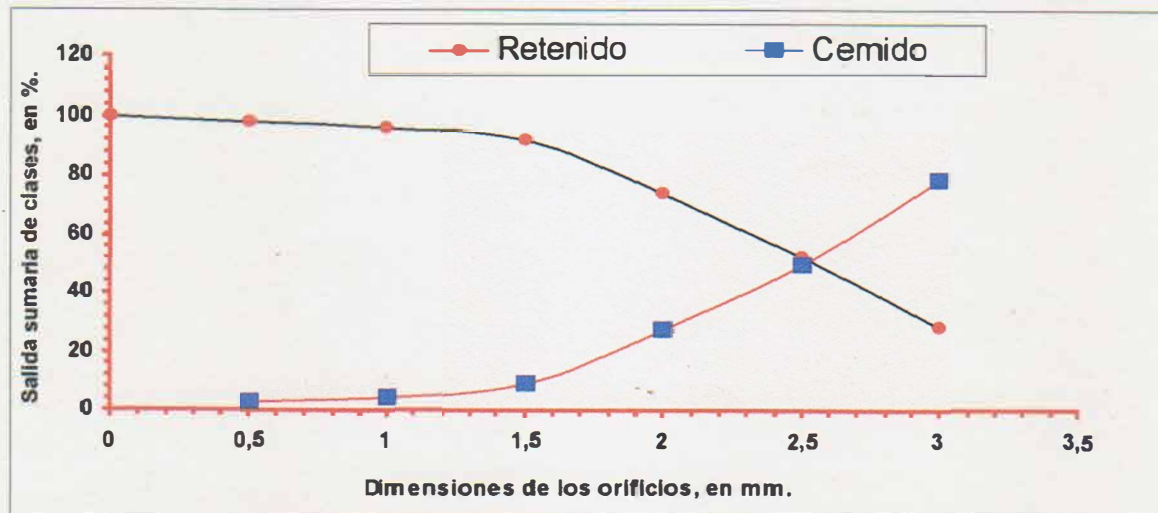


Fig. 2: Característica sumaria

Tabla 6: Condiciones del experimento.

Designaciones	t; tiempo (min.)		R; (r.p.m.)		Q; carga de bolas (kg)		M; masa de material (g)	
	Valor físico	Valor codificado	Valor físico	Valor codificado	Valor físico	Valor codificado	Valor físico	Valor codificado
Nivel inferior	10	-1	60	-1	9	-1	2500	-1
Nivel cero	15	0	80	0	10	0	3500	0
Nivel superior	20	+1	100	+1	11	+1	4500	+1
Δ	5	-	20	-	1	-	1000	

Tabla 7: Plan del experimento.

N° de experimento	Factores													Salida de N.A.
	t min	R rpm	Q Kg	M g	tR	tQ	tM	RQ	RM	QM	tQM	tRM	RQM	Y _v % -0,5 mm
1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	55,867
2	-1	-1	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	62,467
3	-1	-1	+1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	62,833
4	-1	0	-1	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	64,267
5	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	72
6	-1	0	+1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	76,633
7	-1	+1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	+1	-1	-1	68,333
8	-1	+1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	64,4
9	-1	+1	+1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	66,6
10	0	-1	-1	0	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	63,5
11	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	72,167
12	0	-1	+1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	67,7
13	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	88,9
14	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	91,533
15	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	88,3
16	0	+1	-1	0	0	0	0	-1	0	0	0	0	0	70,066
17	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	71,333
18	0	+1	+1	0	0	0	0	+1	0	0	0	0	0	66,2
19	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	55,3
20	+1	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	0	45,733
21	+1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	+1	+1	56,167
22	+1	0	-1	0	0	-1	0	0	0	0	0	0	0	43,133
23	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	64,067
24	+1	0	+1	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	55,167
25	+1	+1	-1	-1	+1	-1	-1	-1	-1	+1	+1	-1	+1	41,333
26	+1	+1	0	0	+1	0	0	0	0	0	0	0	0	42,633
27	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	+1	53,167

TABLA 8: Resultados de las variables en el experimento.

Nº del experimento	Y_u			$\bar{Y}_U$	$\sum_{j=1}^3 Y_{Uj}$	$(\sum_{j=1}^3 Y_{Uj})^2$	$\sum_{j=1}^3 Y_{Uj}^2$	$S_{\{Y_U\}}^2$
	Y_{u1}	Y_{u2}	Y_{u3}					
1	56,2	55,4	56	55,867	167,6	28089,76	9363,6	0,173
2	62	63,4	62	62,467	187,4	35118,76	11707,56	0,653
3	63,1	63,4	62	62,833	188,5	35532,25	11845,17	0,543
4	64	65	63,8	64,267	192,8	37171,84	12391,44	0,413
5	71	73	72	72	216	46656	15554	1
6	76,1	75,8	78	76,633	229,9	52854,01	17620,85	1,423
7	68,2	67,8	69	68,333	205	42025	14009,08	0,373
8	64,2	64	65	64,4	193,2	37326,24	12442,64	0,28
9	66,8	67	66	66,6	199,8	39920,04	13307,24	0,28
10	62,4	63,1	65	63,5	190,5	36290,25	12100,37	1,81
11	72	71,5	73	72,167	216,5	46872,25	15625,25	0,583
12	68,1	67,4	67,6	67,7	203,1	41249,61	13750,13	0,13
13	89,7	89	88	88,9	266,7	71128,89	23711,09	0,73
14	91,2	92	91,4	91,533	274,6	75405,16	25135,4	0,173
15	88	89	87,9	88,3	264,9	70172,01	23391,41	0,37
16	69	70,2	71	70,066	210,2	44184,04	14730,04	1,013
17	71,6	70,4	72	71,333	214	45796	15266,72	0,693
18	67,2	66	65,4	66,2	198,6	39441,96	13149	0,84
19	54,6	55	56,3	55,3	165,9	27522,81	9175,85	0,79
20	45	45,2	47	45,733	137,2	18823,84	6277,04	1,213
21	56,3	57,2	55	56,167	168,5	28392,25	9466,53	1,223
22	43	42,4	44	43,133	129,4	16744,36	5582,76	0,653
23	64	63,2	65	64,067	192,2	36940,84	12315,24	0,813
24	55	54,5	56	55,167	165,5	27390,25	9131,25	0,583
25	40,6	41,4	42	41,333	124	15376	5126,32	0,493
26	42,8	43,1	42	42,633	127,9	16358,41	5453,45	0,323
27	54	52	53,5	53,167	159,5	25440,25	8482,25	1,083

Considerando la variable de salida como Y_U y los factores expuestos en la tabla anterior se utilizó el siguiente modelo establecido en forma polinómica:

$$Y = b_0 + b_1t + b_2R + b_3Q + b_4M + b_{12}tR + b_{13}tQ + b_{14}tM + b_{23}RQ + b_{24}RM + b_{34}QM + \dots + b_{124}tRM + b_{134}tRM + b_{234}RQM$$

1

Se calcularon los coeficientes b_0 y b_1 , y se comprobó de la significación de las interacciones y los factores mediante la prueba de Fisher, la variación media de cada factor y sus interacciones, el valor de la distribución de Fisher o para cada factor e interacción (E. Freund, J. y A. Simon, G. 1992)

Quedando el modelo de regresión de la siguiente forma:

$$Y = 64,07 - 5,06t + 1,56Q + 0,73M - 1,42tR + 0,264tQ - 1,77RQM$$

2

Como se observa en el modelo, uno de los factores con mayor coeficiente es el tiempo. Su comportamiento se corresponde con los resultados prácticos obtenidos durante los ensayos, donde existe un valor a partir del cual la variable de salida disminuye con el aumento del tiempo, esto ocurre debido a que el nitrato se comienza a pegar en las paredes del molino, lo que dificulta su recuperación.

Cascarilla de cacao.

En este caso se realizó un diseño similar al anterior y la ecuación de regresión tiene la siguiente forma:

$$Y = 57,376 + 5,6t + 15,67R + 2,66Q - 2,35M + 0,92RQ + 0,924tR - 1,74RM$$

$$..... + 1,22RQM + 6,28tQM$$

3

como se observa en el modelo, el factor de mayor coeficiente es el número de revoluciones por minutos y luego el del factor tiempo, se nota además la significación de las interacciones entre factores.

Cascarilla de café.

siguiendo el mismo procedimiento de diseño, la ecuación de regresión tiene la forma siguiente:

$$Y = 55,034 + 5,54t + 15,67R + 2,63Q - 2,51M + 0,824tR + 0,96RQ - 1,76RM$$

$$..... + 1,486RQM + 6,205tQM$$

4

En este modelo se nota como mayor coeficiente el de R, durante el proceso de experimentación, a medida que aumentamos el número de r.p.m., aumenta el porcentaje de salida, el coeficiente del tiempo también muestra gran influencia en el proceso, lógicamente, el porcentaje de salida es proporcional al tiempo de retención del material

Análisis de la solución óptima a partir de los modelos obtenidos.

Una vez obtenidos los modelos adecuados se realizó una optimización por el método de ascensión abrupta, cuyos resultados se muestran en las figuras 3, 4 y 5.

Tabla 9: Resultados de la variable de salida en función de los incrementos (NA).

Incremento del paso	t (min.)	Q (Kg.)	M (Kg.)	Y ₁	Y ₂	Y ₃	$\bar{Y}$
0 δ	15	9	0,2500	91,3	92	91,6	91,6
δ	10	9,31	0,2644	68	68	69	68,33
2 δ	5	9,62	0,2788	32,6	34	32,4	33

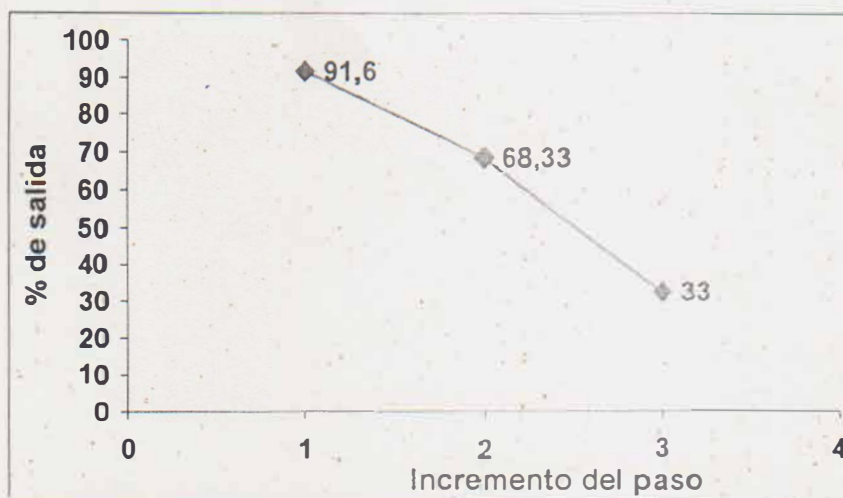


Fig. 3: Representación gráfica del proceso de optimización para el nitrato de amonio.

En la tabla 9 y la correspondiente gráfica de optimización mostrada, los mejores resultados se obtienen para un tiempo de 15 minutos, con 9 Kg. de bolas y una masa de material alimentado de 2,50 Kg. En este caso el factor con mayor coeficiente es el tiempo, a medida que se aumenta el mismo, el porcentaje de salida del nitrato de amonio es menor, aquí se manifiestan nuevamente los cambios en el nitrato de amonio con la temperatura, fundamentalmente la aglutinación, a partir de este tiempo comienza a adherirse el Nitrato a los elementos triturantes y a las paredes del molino.

Tabla 10: Resultados de la variable de salida en función de los incrementos (cascarilla de cacao).

Incremento del paso	t (min.)	R (r.p.m.)	Q (Kg.)	M (Kg.)	Y ₁ %	Y ₂ %	Y ₃ %	$\bar{Y}$ % de salida
0 δ	20	60	9	0,200	32	30,6	32	31,53
δ	23,6	80	9,17	0,215	49	49	48,7	48,9
2 δ	27,2	100	9,34	0,230	93	94	92,2	93,06
3 δ	30,8	120	9,51	0,245	75	77	76,4	76,1

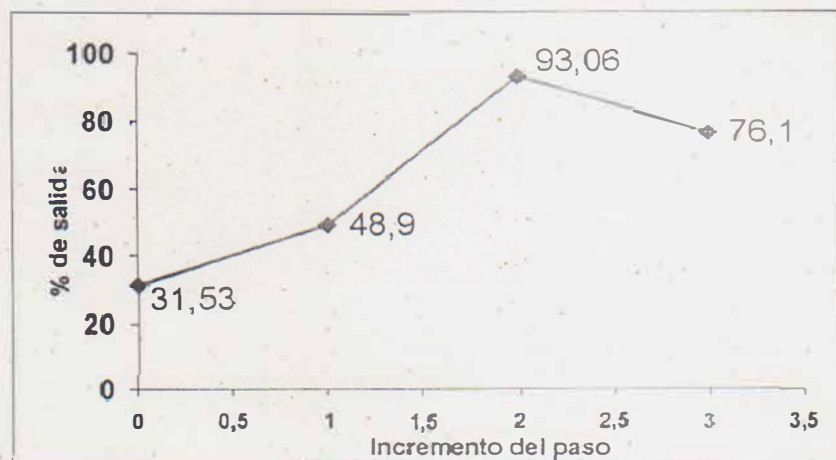


Fig. 4: Representación gráfica del proceso de optimización para la cascarilla de cacao. Según se observa en la tabla 10 y la figura 4 de optimización, podemos concluir que los mejores resultados se obtienen para un tiempo de 27,2 minutos, 100 r.p.m, 9,34 Kg. de bolas y una masa de material alimentado de 0,215 Kg. Para valores mayores de r.p.m. el porcentaje de salida es menor.

Tabla 11: Resultados de la variable de salida en función de los incrementos (cascarilla de café).

Incremento del paso	t (min.)	R (r.p.m.)	Q (Kg.)	M (Kg.)	Y ₁ %	Y ₂ %	Y ₃ %	$\bar{Y}$ % de salida
0 δ	20	60	9	0,200	31	30,2	29	30,06
δ	23,5	80	9,17	0,2046	38	39	39,4	38,8
2 δ	27	100	9,34	0,2092	93	93,2	92,4	92,8
3 δ	30,5	120	9,51	0,2138	75	76	74	75

Según se observa en la tabla 11 y la gráfica de optimización correspondiente, los mejores resultados se obtienen para un tiempo de 27 minutos, 100 r.p.m, 9,34 Kg. de bolas y una masa de material alimentado de 0,2092 Kg. En este caso, igual que en el anterior, el factor con mayor coeficiente es el número de revoluciones por minutos, de manera que este aumenta con el porcentaje de salida hasta 100 r.p.m., luego disminuye el porcentaje de salida con el aumento de las revoluciones.

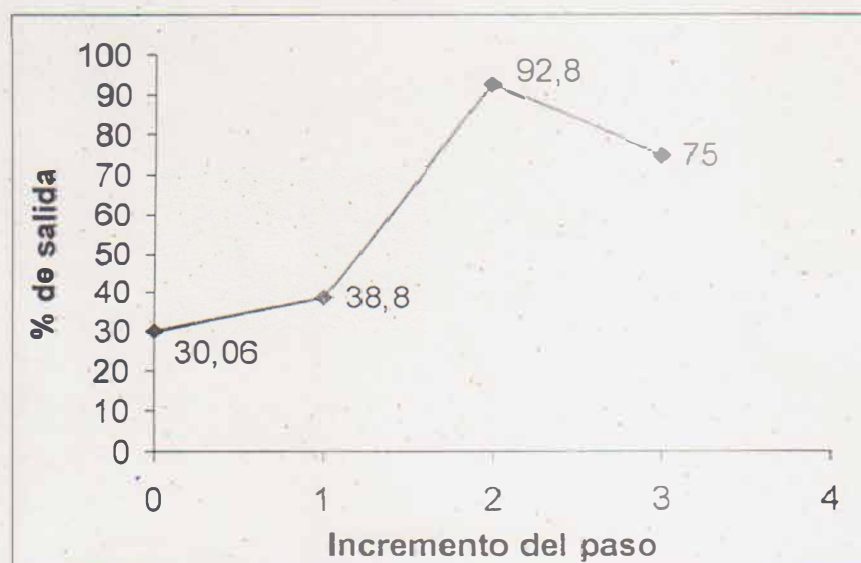


Fig. 5: Representación gráfica del proceso de optimización para la cascarilla de café.

Establecimiento del régimen y los parámetros de molienda para cada material.

Una vez analizados los parámetros de mayor influencia en el porcentaje de salida, así como, los niveles de mayor efectividad, se fijaron tres de los parámetros en los niveles más efectivos y se varió el cuarto parámetro para observar el comportamiento del porcentaje de salida en función de este. A partir de estos resultados se establecieron los siguientes parámetros de molienda para el nitrato de amonio:

Tiempo de retención . 15 min.

Carga de material en el molino. 3 Kg. (45 % del volumen del molino).

Carga de bolas en el molino. 10 Kg. (30 % del volumen).

80 r.p.m. en el eje del molino.

Una vez establecidos estos parámetros realizamos varios ensayos y el porcentaje promedio de la masa de partículas con granulometría por debajo de 0,5 mm fue de 92 %. Los resultados se muestran en la tabla 12.

Tabla 12: Resultados de los ensayos para establecer los parámetros de la molienda del Nitrato de Amonio.

Parámetros establecidos	Nº de ensayo	% de salida (-0,5 mm).
15 min. de retención	1	93,2
Carga de material de 45 % del volumen del molino.	2	91
	3	91,6
Carga de bolas 30 % del volumen. 80 r.p.m. en el eje del molino .	4	90,4
	5	93,3
	6	92,7
	Promedio	92,03

Cascarilla de cacao.

En este caso se realizó un procedimiento similar al del nitrato de amonio. El proceso de secado de la cascarilla de cacao es menos complejo, ya que este material no es higroscópico como el nitrato de amonio. Se tomaron muestras de la intemperie, con una humedad promedio de 15,5 % y se colocaron en estufa a temperatura de 60 a 70 °C, se extrajeron con un 7,4 % de humedad y se sometieron al proceso de molienda (ver tabla 13).

Tabla 13: Humedad de la Cascarilla de cacao después de pasar por la estufa.

N° de muestra	Masa de la muestra (g)		Humedad de la muestra	
	Húmeda	Seca	%	g
1	2,362	2,186	7,45	0,176
2	2,445	2,263	7,42	0,181
3	2,478	2,291	7,54	0,187
4	2,387	2,210	7,38	0,176
5	2,523	2,337	7,36	0,186
6	2,321	2,142	7,44	0,173
Promedio	-	-	7,43	-

A partir de los resultados obtenidos se establecieron los siguientes parámetros de molienda para la cascarilla de cacao:

Tiempo de retención 30 min.

Carga de material en el molino 250 g.

Carga de bolas en el molino 10 Kg.

100 r.p.m. en el eje del molino.

Cascarilla de café.

Para el análisis de este material se partió de su similitud con la cascarilla de cacao y se llevó a cabo un procedimiento similar. Se tomaron muestras de la intemperie, con un 14,3% de humedad y se colocaron en estufa a temperatura de 60 a 70 °C se extrajeron con un 8,23 % de humedad (ver tabla 14) y se sometieron al proceso de molienda.

Tabla 14: Análisis de la humedad de la cascarilla de café después de pasar por la estufa.

N° de muestra	Masa de la muestra (g)		Humedad de la muestra	
	Húmeda	Seca	%	g
1	2,078	1,907	8,22	0,171
2	2,437	2,237	8,19	0,200
3	2,345	2,151	8,25	0,194
4	2,656	2,435	8,32	0,221
5	2,234	2,051	8,18	0,183
6	2,432	2,231	8,24	0,200
Promedio	-	-	8,23	-

Partiendo de los resultados obtenidos se establecieron los siguientes parámetros de molienda para la cascarilla de café en el molino de bolas estudiado:

Tiempo de retención . 30 min.

Carga de material en el molino. 0,25 Kg.

Carga de bolas en el molino. 10,2 Kg.

100 r.p.m. en el eje del molino.

Después de analizados estos resultados a escala de laboratorio, se llegó a la conclusión de que la molienda hay que realizarla en seco y por separado para cada uno de los componentes, con parámetros diferentes, además que el molino de bolas es factible para este proceso. Cuando se va a realizar la molienda es necesario conocer su régimen, carga de bolas, tiempo de retención, frecuencia de rotación del tambor, dimensiones de los elementos triturantes, coeficiente de llenado, influencia de la molibilidad y tamaño del material molido para la proyección, utilización y explotación de los molinos de bolas.

Análisis del proceso de molienda de los materiales con el empleo del molino de rotor SR-2.

Este molino posee un sistema de 6 aspas o martillos que proyectan el material alimentado contra una parrilla de clasificación en forma de anillo cilíndrico. Se coloca el de orificios correspondiente al diámetro de salida que se quiera dar a las partículas y el proceso de alimentación puede ser regulado de forma manual o mecanizada a través de un embudo, y la productividad del mismo depende del tipo de material que procese; dentro de las especificaciones técnicas se plantea que el mismo posee una productividad de hasta 120 Kg./h para materiales desde blandos hasta dureza media, Tensión: 120-380 V., Potencia: 1,1 KW. y 3000 r.p.m.

En este molino se realizaron una serie de ensayos para determinar si era idóneo para la molienda de los materiales estudiados.

Teniendo en cuenta que parámetros tales como: número de r.p.m. y el número de brazos en el eje del rotor, eran fijos, sin posibilidades de variación, se decidió variar de forma manual, el régimen de alimentación de los materiales al molino y así determinar su productividad con cada material.

Análisis de la productividad de la molienda para el nitrato de amonio.

Debido a las características de este material, ya expuestas en el capítulo I se observó que cuando la alimentación en la boca del molino era superior a medio kilogramo por minuto se interrumpía el proceso deteniéndose el equipo, debido a que el nitrato se adhería en la parrilla tapando los orificios, que en este caso eran de 0,5mm. Al disminuir el ritmo de alimentación al molino se mantuvo un período de tiempo mayor trabajando pero, sufría un calentamiento durante el proceso, adquiriendo una diferencia de temperatura con respecto al nitrato y provocando un intercambio de calor entre ambos, lo que trajo consigo la adherencia del nitrato de amonio en la parrilla nuevamente. Se sometió el nitrato a una estufa con temperatura de hasta 60 °C para tratar de lograr un equilibrio de dichas temperaturas y también se dificultó el proceso de molienda. Se continuó el trabajo, desmontando de forma periódica la parrilla del molino para limpiarla del nitrato que se pegaba en forma de una capa de cemento duro y caliente, debido a la temperatura del molino. Esto demostró que con este tipo de molino es muy engorroso el proceso de molienda de este material, interrumpiéndose el proceso constantemente.

Análisis de la productividad de la molienda para la cascarilla de café.

Se comenzó a utilizar este material en las condiciones de humedad que poseía, es decir, sin someterlo a la estufa, con una humedad de 14,365 % y se comprobó que el mismo se molía correctamente pero con una productividad muy baja. Al reducir la humedad del material hasta 8,3 % con el uso de la estufa, se logró mayor régimen de alimentación de la cascarilla al molino en el tiempo, aumentando el régimen de la alimentación hasta el punto en que el proceso se interrumpía y luego con una alimentación constante por debajo de ese límite, se tomaron un conjunto de datos que se reflejan en la figura 6.

En el mismo se puede observar el comportamiento de la productividad del molino en el tiempo, con productividad del molino para este material de 354 g/min., según la pendiente.

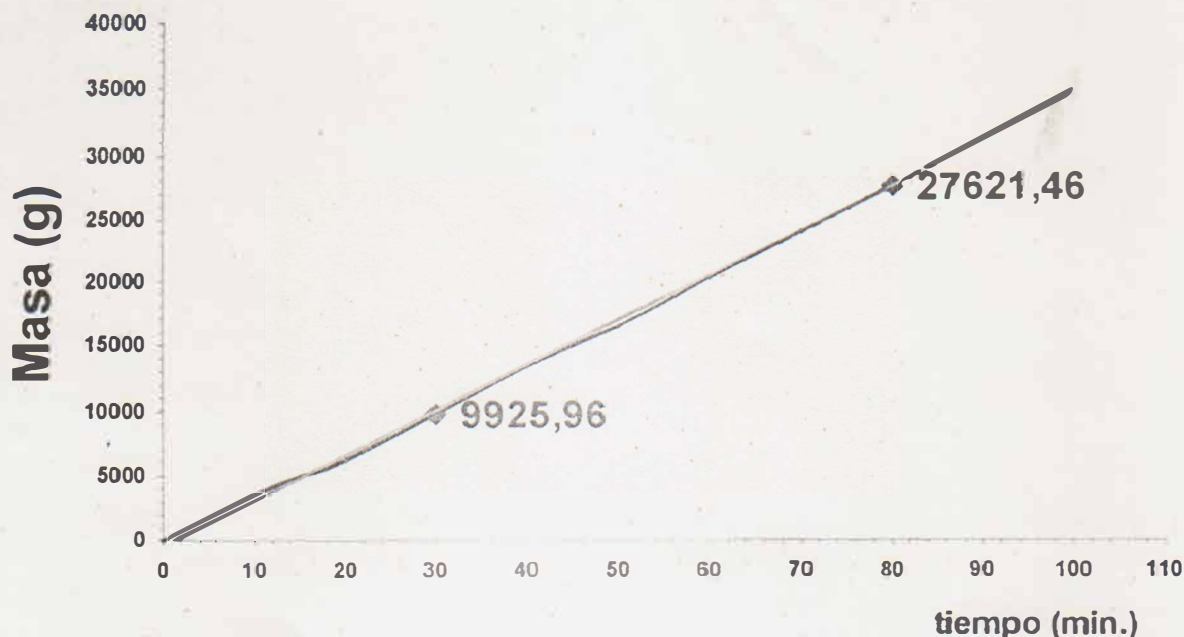


Fig.# 6: Gráfica del comportamiento del flujo de cascarilla de café alimentado al molino de rotor SR-2 en el tiempo.

La ecuación correspondiente a la curva es:

$$y = 353,91t - 691,34$$

Este gráfico del comportamiento de la masa de material molida en el tiempo indica que no fueron grandes las fluctuaciones que tuvo el flujo durante el proceso de alimentación manual.

5

Análisis de la productividad de la molienda para la cascarilla de cacao.

En este caso se procedió de forma similar al análisis que se realizó con la cascarilla de café. Primeramente se llevó al proceso de molienda sin someterlo a la estufa, con una humedad de 15,517% y se observó que la misma se molía correctamente y se sometió a la estufa para la eliminación de la humedad, lográndose reducir a un 7,43 %. De esta forma se logró que la alimentación al molino en el tiempo fuera mayor, se trató de aumentar el régimen hasta el punto en que el proceso se interrumpía y luego se trató de mantener una alimentación constante, tomándose un conjunto de datos que se reflejan en el gráfico siguiente (7).

La ecuación del comportamiento es de la forma:

$$y = 410,06t - 209,63$$

De la ecuación se obtiene la productividad del molino para este material (410 g/min.)

Como se ha demostrado, en la productividad de este molino tienen gran influencia la humedad del material, así como, la dureza del mismo.

De estos análisis se concluye que este tipo de molino es factible para llevar a cabo el proceso de molienda de los materiales combustibles (cascarillas de cacao y café), no siendo así para el nitrato, con el cual se interrumpe sistemáticamente el proceso y se pierde parte del mismo durante el lavado de las parrillas de clasificación que se emplee.

6

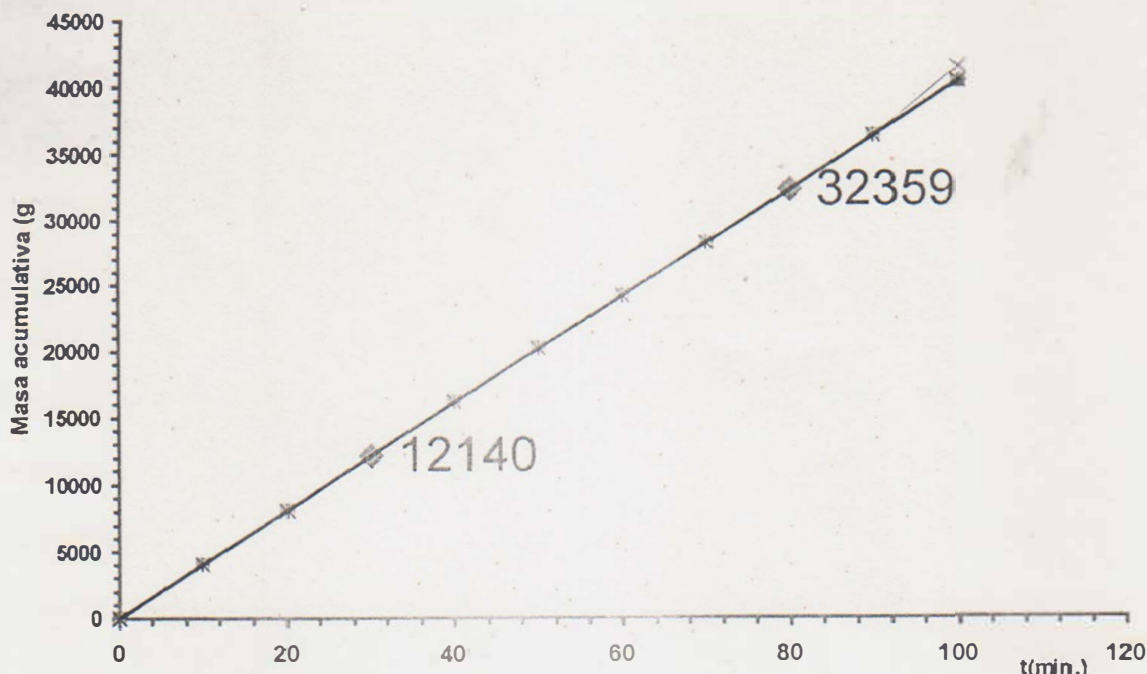


Fig. 7: Gráfica del comportamiento del flujo de cascarilla de cacao alimentado al molino de rotor SR-2 en el tiempo.

Los análisis realizados para la molienda demuestran que el uso del molino de rotor para la reducción de tamaño de los materiales combustibles es más idóneo que el molino de bolas, ya que permite hacer la clasificación directa durante el proceso y evita la necesidad de nuevas instalaciones para ello: el material pasaría directamente al proceso de mezclado. Esto no es así para el nitrato de amonio, para el cual se tiene que utilizar el molino de bolas y luego un mecanismo o instalación de clasificación para lograr las partículas con el tamaño deseado. Los resultados obtenidos permitirán realizar el cálculo y diseño del proceso de molienda de los materiales en el próximo capítulo.

Análisis del proceso de mezclado.

En la producción de explosivos pulverulentos juega un papel fundamental la homogeneidad de la mezcla, cuanto más homogénea e isotrópica sea la misma, más efectiva es la propagación de la onda de detonación y la efectividad del proceso de reacción de la mezcla, cuando la diferencia de densidades entre las partículas a mezclar es pequeña, cuanto más finas sean las partículas, más homogénea puede lograrse la mezcla durante el proceso de homogeneización. Cuando el proceso se realiza por medios mecánicos, donde no son empleados los cambios de temperatura, ni de fases de las sustancias sólidas a mezclar, juega un papel fundamental el tiempo de mezclado.

Para el análisis de la efectividad de las mezclas estudiadas se realizaron los primeros ensayos manuales y se valoró durante el proceso de detonación de los cartuchos. Para su producción industrial se requiere de un equipo (mezcladora) en el cual se realicen las pruebas de tiempo óptimo para la producción de la mezcla.

Procedimiento empleado para la obtención de ambas mezclas.

En este caso se tomó una mezcladora de eje vertical, la cual se emplea actualmente para la producción de la Nitromiel en el municipio de Contramaestre de la provincia de Santiago de Cuba.

Se tomaron las cantidades de 450 Kg. de NA y 50 Kg. de cascarillas de cacao para una de las mezclas y 460 Kg. de NA y 60 Kg. de cascarilla de café para la otra, con 2,3% de humedad

para el NA, 2,4 % de humedad para la cascarilla de café y 4,2 % de humedad para la cascarilla de cacao, se sometieron al proceso de mezclado y a los intervalos de tiempo mostrados en las tablas 15 y 16 se tomaron 10 muestras de 0,250 Kg. en cartuchos de polietileno de 25 cm de longitud por 2,5 cm de diámetro, con densidades entre 0,8 y 0,9 g/cm³, luego se explosionaron las muestras y se observaron los restos de la explosión en cada caso, los resultados se reflejan en tablas (15 a 16) y gráficos de las figuras (8 y 9).

Tabla N° 15: Resultados de las pruebas realizadas con la mezcla de cascarilla de cacao y nitrato de amonio

N°	N° de muestras ensayadas	Tiempo de retención (min.)	Color de los gases	Valores promedio de los restos de la explosión (mm)
1	10	2	Blanco lechoso	10,06 Medio cartucho
2	10	5	Blanco lechoso	5,37 Medio cartucho
3	10	8	blanco	2,27 Cuarto de cartucho
4	10	11	Blanco azul	0,33 Cabeza del cartucho
5	10	14	Blanco azul	0,02 Explosión completa
6	10	17	Blanco azul	0,00 Explosión completa
7	10	20	Blanco azul	0,00 Explosión completa

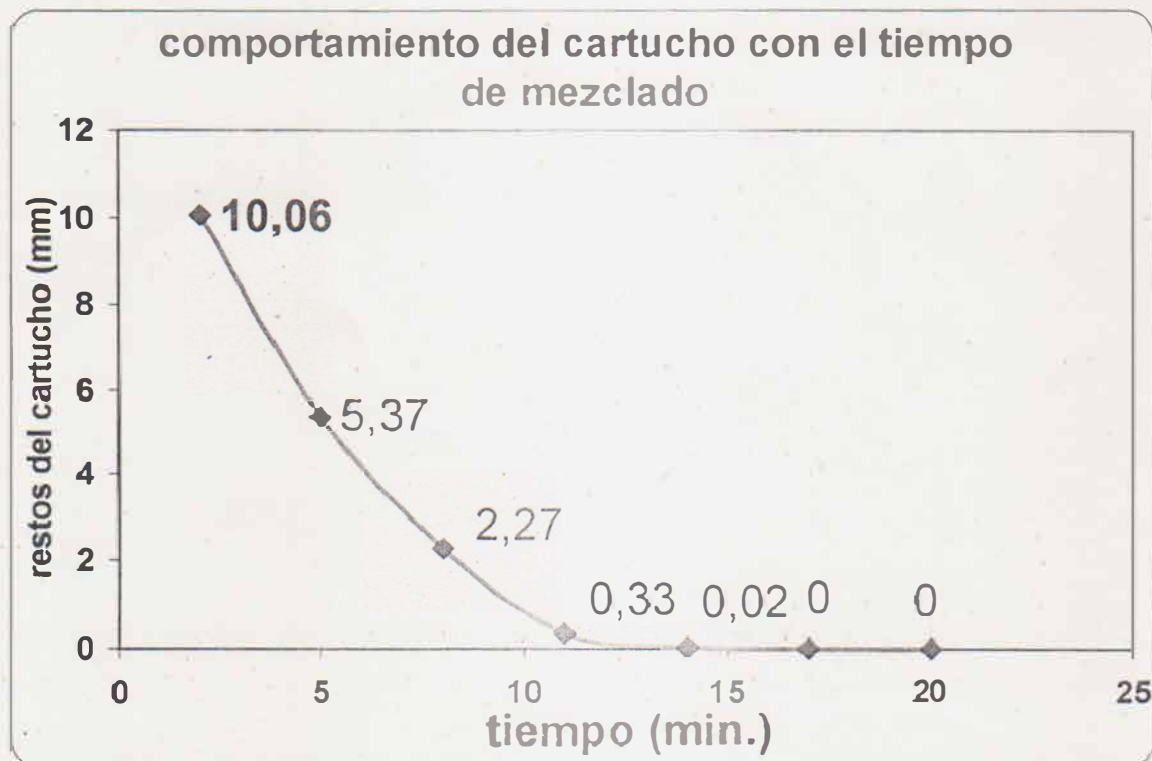
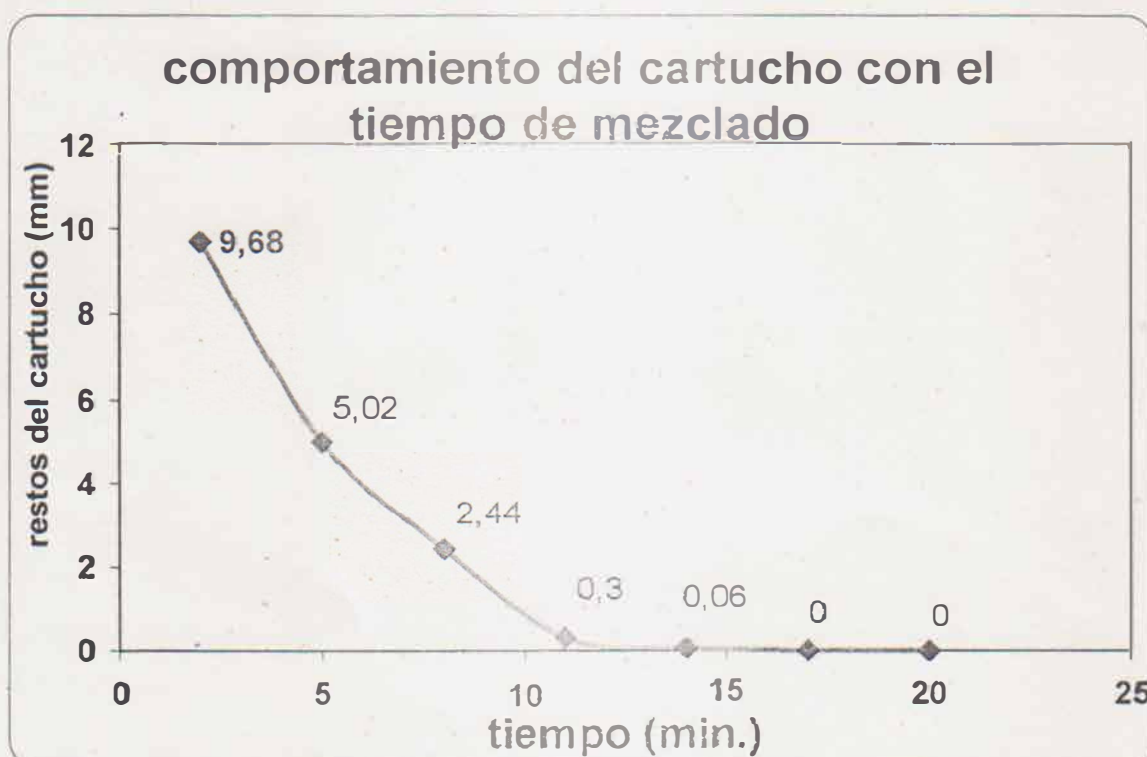


Fig. 8: Comportamiento de la mezcla encartuchada de cascarilla de cacao y nitrato de amonio con el tiempo de mezclado.

En la curva se observa que a medida que aumenta el tiempo de mezclado mejoran las propiedades explosivas de la mezcla, ocurriendo una explosión completa de los cartuchos a partir de los 15 min. de mezclado.

Tabla N° 16: Resultados de las pruebas realizadas con la mezcla de cascarilla de café y nitrato de amonio

N°	N° de muestras ensayadas	Tiempo de retención (min.)	Color de los gases	Valores promedio de los restos de la explosión (mm)
1	10	2	Blanco lechoso	9,68 Medio cartucho
2	10	5	Blanco lechoso	5,02 Medio cartucho
3	10	8	blanco	2,44 Cuarto de cartucho
4	10	11	Blanco azul	0,3 Explosión completa
5	10	14	Blanco azul	0,06 Explosión completa
6	10	17	Blanco azul	0,00 Explosión completa
7	10	20	Blanco azul	0,00 Explosión completa

**Fig. 9:** Gráfico del comportamiento de la mezcla encartuchada de cascarilla de café y nitrato de amonio con el tiempo de mezclado.

El comportamiento de esta curva es muy similar a la del gráfico anterior, mostrándose que a medida que aumenta el tiempo de mezclado mejoran las propiedades explosivas de la mezcla, ocurriendo una explosión completa de los cartuchos a partir de los 15 min. de mezclado.

Conclusiones del capítulo II.

- Del análisis de la cinética de la molienda con el uso del molino de bolas, entre los parámetros establecidos para ambas cascarillas, se obtuvo un tiempo de retención alto y un bajo coeficiente de llenado del molino, lo que indica que el mismo no es el más idóneo para la molienda de estos materiales.
- Los ensayos realizados con el molino de bolas durante el proceso de molienda del nitrato de amonio demuestran que la misma es factible para un tiempo de retención de hasta 15 minutos. Según se observa en el modelo, este es el factor con mayor significación. Todo lo contrario ocurrió con el uso del molino de rotor SR-2, donde se demostró la no idoneidad de este para la reducción.

9. El uso del molino de rotor SR-2 para la molienda de las cascarillas de café y de cacao durante los ensayos realizados a escala de laboratorio demostró que este es más idóneo, para la reducción de este tipo de materiales.
10. Durante el proceso de mezclado se comprobó que para ambos casos a partir de los 15 minutos se obtiene un producto efectivo, de manera que las mezclas realizan una explosión completa, sin dejar restos del cartucho o la sustancia explosiva.

CAPÍTULO III: PROCESOS TECNOLÓGICOS

Para la producción de un explosivo a escala industrial se requiere de instalaciones tecnológicas que satisfagan las características de la mezcla a producir. La diversidad de plantas productoras de explosivos está en correspondencia con la diversidad de los que se producen actualmente en el mundo.

El explosivo a producir en este caso es pulverulento, a base de salitre amoniacal.

Los ensayos realizados hasta el momento permiten realizar los cálculos técnicos y confeccionar una metodología para la producción industrial de ambas mezclas estudiadas. Para la el cálculo de los procesos tecnológicos se parte de un ejemplo con una supuesta capacidad de producción de la planta a proyectar de 5 000 t/años.

Proceso de secado de los materiales.

A partir de las características de los materiales a emplear en el proceso de producción y los resultados experimentales, es evidente que los mismos deben ser sometidos a un proceso de secado previo, de manera que, se garanticen las condiciones óptimas para los procesos de trituración, transporte y clasificación, así como la efectividad de la mezcla. Partiendo de los experimentos realizados en este sentido, se concluyó que, el método más apropiado para el secado de las cascarillas de café y cacao es mediante el uso de la energía solar, no siendo así para el nitrato de amonio, con el cual se tiene que recurrir a una forma de secado artificial.

Secado de la cascarilla de café y la cascarilla de cacao.

Para el secado de los materiales combustibles con el uso de la energía solar, se deben realizar los cálculos del área necesaria en dependencia de la productividad de la planta de producción de las mezclas explosivas.

En este caso según los experimentos realizados se comprobó que, para lograr un secado eficiente, el espesor de la capa no debe ser mayor a los 0,05 m, elemento que constituye un parámetro fundamental al determinar el área para una determinada productividad.

Teniendo en cuenta una productividad proyectada de la planta de 1,5 t/h y que el clima es un factor determinante en el proceso de secado por vía solar, es necesario crear un área de secado que permita almacenar los materiales combustibles y contar con una reserva para los períodos de lluvia, de poco sol, de alta humedad relativa u otro.

Para un área de secado que satisfaga las exigencias industriales, es necesario que esta tenga capacidad para secar hasta 20 t, considerando un espesor de capa de 0,05 m.

Para la cascarilla de café.

1347 m²; es decir, un área de (30x40) m

Para la cascarilla de cacao.

1190 m²; un área similar de (30x40) m

Con áreas de estas dimensiones se resuelve el problema con holgura, para que no se interrumpa el proceso de producción.

Secado del Nitrato de amonio (NH₄NO₃).

Teniendo en cuenta las característica del nitrato de amonio y en especial su alta higroscopicidad, es necesario someter el mismo a un proceso de secado diferente al de los materiales combustibles.

Para esto se necesita un horno de secado, de trabajo continuo, de manera que garantice la continuidad de los procesos, por lo cual se realizó el análisis de un horno de tambor rotatorio utilizando el mazut como combustible, en el que se calculan los siguientes parámetros.

La potencia térmica del combustible.

La cantidad de aire teórica y práctica para la combustión.

La cantidad y composición de los productos de la combustión.

Realización del balance material.

Índices de entrada y de salida;

Balance energético;

Dimensiones del horno y;

Las pérdidas al medio ambiente, lo cual permite verificar y corregir los cálculos efectuados (Chang C., A.R. 1997).

Molienda del Nitrato de amonio.

Las numerosas condiciones del funcionamiento de un molino pueden variarse ampliamente por lo cual la determinación en base a fórmulas teóricas resulta ser imposible.

El rendimiento de los molinos para fábricas a diseñar, se calcula basándose en el método de semejanza, o sea, partiendo de los datos prácticos del trabajo de otros molinos en funcionamiento con un régimen de trabajo próximo al óptimo (E. Andreiev, S.; A. Perov, V. Y V. Zverievich, V. 1980).

Con frecuencia se hace uso de dos métodos de cálculo de rendimiento de los molinos, uno es determinando el rendimiento específico y el otro la eficacia de la trituración.

Teniendo en cuenta el molino de bolas que se utilizó a escala de laboratorio y que estos son muy empleados internacionalmente en la industria, para la molienda del N.A. hasta una granulometría por debajo de 0,5 mm, se propone la utilización de un molino de descarga central con las siguientes características:

Dimensiones interiores del tambor, mm.

➤ Diámetro: 900.

➤ Longitud: 1800.

Capacidad de trabajo, m^3 : 0,90.

La productividad real del molino proyectado se determinó basándose en el método según el rendimiento específico (A. Razumov, K.; A. Perov, V. 1985), y tomando como molino patrón, el utilizado para los ensayos a escala de laboratorio, el cual desmenuza el material analizado (NH_4NO_3), la capacidad volumétrica es de $8 \times 10^{-3} m^3$, es un molino cónico cilíndrico de descarga central, con el tambor de dimensiones $D \times L$ (400x 100). Para los cálculos fue necesario determinar a escala de laboratorio algunos datos, como son, el contenido en porcentaje de la clase - 0,5 mm en el material inicial y el porcentaje de la clase - 0,5 mm en el producto final, en este caso se tomó de 90 %, a partir de los resultados obtenidos El grosor del material inicial es de -3 +0, el contenido de la clase de cálculo en el material inicial es de 2,4 % (ver tabla 5) y en el producto molido 90 %, es de 0,6 KW de potencia y su rendimiento según el material alimentado es de 0,012 t/h, y volumen de $8 \times 10^{-3} m^3$.

La capacidad del molino proyectado (Q_m) según el material alimentado es de 2,316936 t/h.

Con la productividad del molino se determinó la cantidad de molinos necesarios (N_m) para cubrir la capacidad exigida, siendo necesario un molino.

Empleando el mismo método (según el rendimiento específico), se tomó como patrón un molino que desmenuza el cloruro de sodio o sal común ($NaCl$), material con características semejantes al nitrato de amonio. Este material es desmenuzado en un molino de descarga central, con el tambor de dimensiones $D \times L$ (700x 1400), el grosor del material inicial es de

-10 +0 el contenido de la clase de cálculo en el material inicial es de 6 % y en el producto molido 68 %, es de 16 kw de potencia y su rendimiento según el material alimentado es de 5 t/h.

Los resultados son los siguientes:

La capacidad del molino proyectado (Q_m) según el material alimentado es de 8,08 t/h y el número de molinos necesarios (N_m) fue uno.

Como se puede observar, en los cálculos se obtienen resultados muy similares a cuando se utilizó como molino patrón el de laboratorio.

Molienda de las cascarillas de café y cacao.

Previamente a este análisis se tomaron 10 muestras de cascarilla de cacao y 10 de cascarilla de café, con una masa de 200 g, para determinar el porcentaje en masa con granulometría por debajo de 0,5 mm de cada material. Se observó que estos materiales son laminillas con dimensiones máximas de 12 mm para la cascarilla de cacao y de 10 mm para la cascarilla de café y que el porcentaje con granulometría por debajo de 0,5 mm era casi nulo, ver resultados en la tabla 37.

Para la molienda de las cascarillas de café y cacao se prevé utilizar el molino Rotor SR-3, modelo similar al SR-2 empleado en el capítulo II, para el estudio del proceso de molienda, como se demostró durante la experimentación, con el mismo los resultados son satisfactorios, según las especificaciones técnicas el SR-3 tiene una productividad de 360 Kg./h, superior al SR-2.

Tabla 37 : Promedios de los porcentajes de cascarillas con granulometría por debajo de 0,5 mm en los materiales iniciales.

Nº de ensayo	Cascarilla de café (%)	Cascarilla de cacao (%)
10		
Promedio	0,474	1,894

Transporte y clasificación de los materiales

En este caso se prevé utilizar transportadores de banda para el traslado del material de un proceso a otro, excepto el proceso de clasificación del nitrato de amonio que se realizará con transporte neumático.

Los transportadores de banda son los más empleados en la transportación de materiales en la industria, tanto para carga a granel como de bultos o paquetes (Oriol G., J. M. 1988 y 1993).

En este caso se trata de nitrato de amonio ($\text{NO}_3 \text{NH}_4$) un material granulado, de granulometría muy fina antes de moler, pulverizado después de moler y las cascarillas de café o cacao en forma de pequeñas laminillas antes de moler y pulverizadas después de molidas.

Cálculo de los transportadores de banda.

Cuando se transporta carga a granel, el ancho de la banda debe determinarse a partir de la capacidad que se demanda del conductor y de las dimensiones de las partículas más representativas.

Los cálculos se realizan según metodología (Oriol G., J. M. 1988 y 1993):

Esto da como resultado un ancho de banda muy pequeño, para los cuales no hay diseño, lo que conlleva a escoger uno los más pequeños, especificados por tabla,. En este caso se tomó un ancho de 400mm, con bolillos acañalados ligeros de 83 mm de diámetro y separación entre ellos de 1500 mm. Este mismo ancho se tomará para el caso de la cascarilla, ya que la capacidad es menor. Este ancho de banda permite disminuir la velocidad del transportador.

Teniendo en cuenta los cálculos realizados se propone el uso del conjunto de tolva alimentadora cinta, cuyas características son:

Capacidad de la tolva hasta 4,5 m³

Ancho de la cinta 0,4 m
Potencia del motor 2,4 kW (30 cv)
Angulo de inclinación de 0° -45°

Transporte neumático

En este aspecto se realizaron los cálculos para el transporte en un tramo de tubería inclinado de 15 m de longitud y 0,30 m de diámetro según (Oriol Guerra, J.M. 1986) metodología donde se obtiene la longitud reducida de la tubería, la velocidad crítica del material, presión y flujo de aire necesario para su transporte.

Mezclado de los materiales componentes de las sustancias explosivas.

Una vez realizada la clasificación de los materiales, se efectúa el mezclado, proceso que reviste gran importancia, ya que de la correcta homogenización y dosificación de la mezcla depende la calidad de la sustancia explosiva.

El mezclado de los materiales se realiza de forma cíclica, proponiendo para el mismo, el uso de una hormigonera TAINO, de fabricación cubana, con una capacidad de 2,5 m³.

Debido a la abrasividad del nitrato de amonio y la peligrosidad de las mezclas bajo la acción de agentes externos como el golpe de dos metales, el trompo de la hormigonera debe llevar por todo su interior un revestimiento de goma de 10 mm de espesor, evitando con esto la corrosión, el deterioro del mismo y la posibilidad de que se produzca una explosión.

Se conoce que se emplea para mezclar la miel de caña con el nitrato de amonio.

Teniendo en cuenta que la granulometría de los materiales a mezclar es pequeña, que el combustible (cascarilla) se adhiere relativamente fácil al oxidante (nitrato) y los resultados obtenidos durante la prueba industrial del mezclado de ambas sustancias, para lograr una buena homogeneización de las mezclas explosivas, además, los resultados obtenidos en la voladura de un frente de cantera realizados con estas mezclas, se propone un tiempo de retención de los materiales de 15 min.

Dosificación de los materiales para el proceso de homogenización.

Conociendo la composición porcentual de las mezclas (Amocal - 1C: 90 % de NA + 10 % de cascarilla de cacao y Amocal - 2C: 88 % de NA + 12 % de cáscara o cascarilla de café) y que la capacidad de la mezcladora es de 2,5 m³, dejando 0,10 m³ para el revestimiento interior de goma, se puede calcular la dosis de materiales necesarios para cada mezcla.

Teniendo en cuenta el peso volumétrico de los materiales y la capacidad volumétrica de la mezcladora (2,4 m³); para una tonelada de sustancia explosiva compuesta de nitrato de amonio y cascarilla de café, cuya relación porcentual es 88/12, se toman 880 Kg. de nitrato de amonio y 120 Kg. de cascarilla de café.

Haciendo el análisis para la capacidad de la mezcladora se tiene que:

Para el amocal -2C

NA-----880 Kg. —————> 1,07 m³
C. de café---120 Kg. —————> 0,275 m³

De manera que una tonelada de esta mezcla ocuparía un volumen aproximado de 1,345 m³, con una densidad de la mezcla de 0,74 g/cm³. Además, para la capacidad volumétrica de la mezcladora, en cada ciclo se obtiene hasta 1,784 t, con la siguiente proporción:

NA-----1570kg —————> 1,91 m³
C. de café---214kg —————> 0,49 m³

Para el amocal -1C

NA-----900 kg —————> 1,09 m³
C. de cacao---100kg —————> 0,24 m³

De manera que una tonelada de esta mezcla ocuparía un volumen aproximado de 1,33 m³, con una densidad de la mezcla de 0,75 g/cm³. Además, se puede decir que, para la capacidad volumétrica de la mezcladora, en cada ciclo se obtiene hasta 1,804 t, con la siguiente proporción:

NA-----1623,6 Kg —————> 1,98 m³

C. de cacao ----180,4 Kg → 0,433 m³

Es necesario aclarar que, cuando ocurre el proceso de intimación entre los componentes, se tienden a ocupar más los espacios vacíos y se reduce el volumen de la mezcla, aumentando así su densidad.

Con la capacidad de la mezcladora y la densidad de la mezcla de cada sustancia se puede determinar el rendimiento horario de esta máquina.

El mezclado se realiza de forma cíclica, de modo que, el número de ciclos por hora se determina teniendo en cuenta el tiempo de duración de un ciclo (20 min., 15 min. para el mezclado y 5 min. para la carga y la descarga). Pueden establecerse tres ciclos.

La productividad por ciclo se determina al multiplicar la capacidad volumétrica de la máquina por la densidad de la mezcla.

Para el amocal -1C

NA + C. cacao → 1,804 t/ciclos

Para el amocal -2C

NA + C. café → 1,784 t/ciclos

Si se multiplican estos valores por 3 que es el número de ciclos en una hora, se obtiene la productividad horaria.

Para el amocal -1C

NA + C. cacao → 5,412 t/h

Para el amocal -2C

NA + C. café → 5,352 t/h

Embalaje de la sustancia explosiva

Una vez que la mezcla es homogenizada y almacenada en una tolva receptora, se hace necesario envasar dicha mezcla en el menor tiempo posible, producto de las propiedades de higroscopicidad del nitrato, lo que trae consigo la pérdida de sus propiedades explosivas.

Del embalaje va a depender en gran medida la calidad y el tiempo de duración del explosivo en el almacenaje, el mismo puede realizarse ensacado (a granel) o encartuchado. Para el ensacado a granel se recomiendan sacos de polietileno con capacidad de 50 Kg. de mezcla explosiva. La operación de llenado de los sacos se realiza directamente en la tolva receptora del producto final con ayuda de una báscula alimentadora. Dicha báscula es automática del tipo HALDBOOK. Este tipo de báscula lo podemos encontrar instalado en los centrales, con productividad de 18 sacos por min.

Para garantizar un correcto sellado de los sacos, de manera que, se logre la impermeabilización de las sustancias explosivas, se propone el uso de una máquina selladora tipo DUBOY, la cual ofrece un sellado hermético y de calidad. Una muestra de esta máquina se encuentra instalada en la planta Rayonitro de producción de fertilizantes en la provincia de Matanzas.

Encartuchado.

Encartuchado de las sustancias explosivas.

En las primeras etapas de estas investigaciones se conoció que el diámetro crítico de las mezclas era pequeño y que la misma podía ser encartuchada con pequeños diámetros, se comenzó utilizando envoltura de papel pero los ensayos demostraron que se dificultaba el almacenaje de dichas sustancias cuando el tiempo era prolongado, más aún, cuando se trabajaba con ellas en condiciones de presencia de agua o humedad. Se trató de resolver este problema impermeabilizando el papel con parafina o utilizando envolturas de polietileno y se realizaron pruebas de comparación visual de la efectividad del cartucho de polietileno con el cartucho de papel no parafinado en cuanto a:

- Transmisión de la detonación en lugares húmedos.
- Poder rompedor en lugares húmedos.

En dichas pruebas se obtuvieron mejores resultados con el cartucho de polietileno que los logrados hasta el momento con el cartucho de papel no parafinado.

Por todo lo anteriormente expuesto y atendiendo a los favorables resultados que se

obtuvieron con el empleo de este material se propone el uso de los cartuchos de polietileno para el encartuchado de las mezclas explosivas. Esta labor se realizará de forma mecanizada y el sellado por su parte se realice en la máquina selladora tipo DUBOYS.

Parámetros de los cartuchos.

Teniendo en cuenta que la máquina debe estar capacitada para encartuchar diferentes diámetros y longitudes y, que para este tipo de explosivo pulverulento, los diámetros de cartuchos más usados en el mundo, están en un rango de 25 mm a 40 mm, a partir de trabajos experimentales realizados con anterioridad se propone un conjunto de parámetros: la densidad del explosivo en cartucho, la carga de sustancia explosiva y la longitud del cartucho para los diámetros de cartuchos más utilizados para ambas mezclas.

Para $d_c = (2,8-4)$ cm; $\rho = (0,80-0,9)$ g/cm³; $Q = (200-800)$ g; $L_c = (25-40)$ cm

ρ - Densidad de la carga encartuchada.

d_c - Diámetro del cartucho

Q - Masa de sustancia explosiva del cartucho.

L_c - Longitud del cartucho.

Es necesario que al cartucho se le deja 2.5 cm por el extremo para el dobléz y sellado del mismo.

Metodología para la producción de las mezclas.

El conjunto de ensayos y cálculos realizados en los procesos analizados constituyen la base para la elaboración de una variante metodológica que permita la instalación de una tecnología apropiada para la producción de las mezclas explosivas analizadas.

Los análisis realizados demuestran que los materiales para la elaboración de las mezclas requieren de un conjunto de procesos previos, que le den las características granulométricas necesarias y la homogeneidad requerida. Este conjunto está formado por un esquema como el que se muestra en las conclusiones del Capítulo I (Secado, Molienda, Clasificación, Mezclado y Embalaje). Las diferencias en el comportamiento de los materiales durante los procesos, conllevaron al empleo de métodos diferentes para el tratamiento de cada uno de ellos

Como se muestra en las figuras, existe una tecnología para la reducción de los materiales combustibles y otra para la reducción del NH_4NO_3 .

Pasos para la producción de las mezclas.

1. Secado de los materiales

Se realiza el secado de las cascarillas con el uso de la energía solar, depositando las mismas en áreas de secado en correspondencia con la capacidad de producción que se necesite, con un espesor de la capa depositada no mayor a 0,05 m, hasta que estas tengan una humedad menor al 7,0 %, según se analiza en el capítulo II.

El NH_4NO_3 se seca por medio de un horno de tambor rotatorio, cuyas características se determinan según metodología descrita en el capítulo III.

2. Molienda de los materiales

- Para los materiales combustibles (las cascarillas), la molienda se realiza con el uso del molino Rotor SR-3, con un régimen de alimentación al mismo de 500 g/min., que resultó ser el idóneo a partir de los ensayos realizados.
- La molienda del NH_4NO_3 se realiza con el uso de un molino de bolas largo, de descarga central, con régimen de trabajo combinado, un coeficiente de llenado de 0,4, las dimensiones (diámetros) de las bolas deben estar distribuidas uniformemente, entre 1 y 5 cm, de manera que se garantice un trabajo eficiente con la combinación de los impactos y la fricción, según metodología de cálculo expuesta en el capítulo III.

3. Clasificación de los materiales

El proceso de clasificación de las cascarillas se realiza directamente en el molino Rotor SR-3, conjuntamente con el proceso de reducción. En este caso, todas las partículas salen del molino con dimensiones granulométricas por debajo de 0,5 mm.

La clasificación del NH_4NO_3 se realiza por medio de un flujo de aire, un separador de dampers y un ciclón. El flujo de aire transporta a través de una tubería, las partículas con granulometría por debajo de 0,5 mm hasta un separador de dampers, de manera que si quedan algunas partículas por encima de estas dimensiones retornen al proceso de molienda, el resto continúa en el flujo y sedimentan en el ciclón, según se muestra en el esquema del flujo tecnológico más adelante.

4. Mezclado de los materiales

El proceso de mezclado se realiza con una mezcladora de tipo Taino, empleando los porcentajes en peso o los volúmenes correspondientes, según se explica en el capítulo III, el tiempo de mezclado para lograr la homogeneidad de la mezcla es de 15 min., según los análisis hechos para ambas mezclas en el capítulo II

5. Embalaje de las mezclas

Durante el embalaje las mezclas se pueden ensacar o encartuchar, según los intereses de los consumidores

Para el ensacado se utilizarán bolsas de polietileno con capacidad de 50 Kg. o según convenga, de mezcla explosiva a granel. La operación de llenado se realiza en la tolva receptora del producto final con ayuda de una báscula de tipo HALBOOK y el sellado de los mismos de forma hermética, con la máquina tipo DUBOY, según se explica en el capítulo III.

Para el encartuchado se tuvieron en cuenta los resultados obtenidos en otros trabajos en las primeras etapas de estas investigaciones, tales como: el diámetro crítico, la envoltura, transmisión de la detonación en lugares húmedos y poder rompedor en lugares húmedos. Se tomó como envoltura el polietileno y para encartuchar se recomienda una máquina con una productividad de hasta 3 cartuchos por minuto, con densidad entre 0,8 y 0,9 g/cm³, diámetro de los cartuchos que oscilan entre 2,8 y 4 cm, longitud entre 25 y 40 cm y en correspondencia con estas dimensiones la carga de los cartuchos oscilará entre 200 y 800 g. El sellado de los cartuchos se realiza con la misma máquina que se emplea para el sellado de los sacos, luego se envasan en cajas, y se almacena tanto la mezcla ensacada como la encartuchada, para su distribución a los consumidores.

Tecnología del proceso de producción de las mezclas explosivas (ver esquema de flujo, gráficos de vista en planta y lateral).

Previo a la molienda se realiza el secado con la energía solar para las cascarillas, hasta que estas contengan no más del 7,0 % de humedad y con ayuda de un horno rotatorio para el nitrato, continúa un proceso de molienda, con el uso del molino rotor para la cascarillas y un molino de bolas para el nitrato, mediante el proceso de clasificación continúan las partículas con granulometría $-0,5$ mm y retornan al molino las que poseen dimensiones mayores en el caso del nitrato, las partículas de cascarillas salen del proceso de molienda con las dimensiones requeridas. Se almacenan ambos materiales y se alimentan en las proporciones indicadas en el capítulo III, luego se mezclan los materiales obteniéndose las sustancias homogéneas, se almacenan y se procede al embalaje.

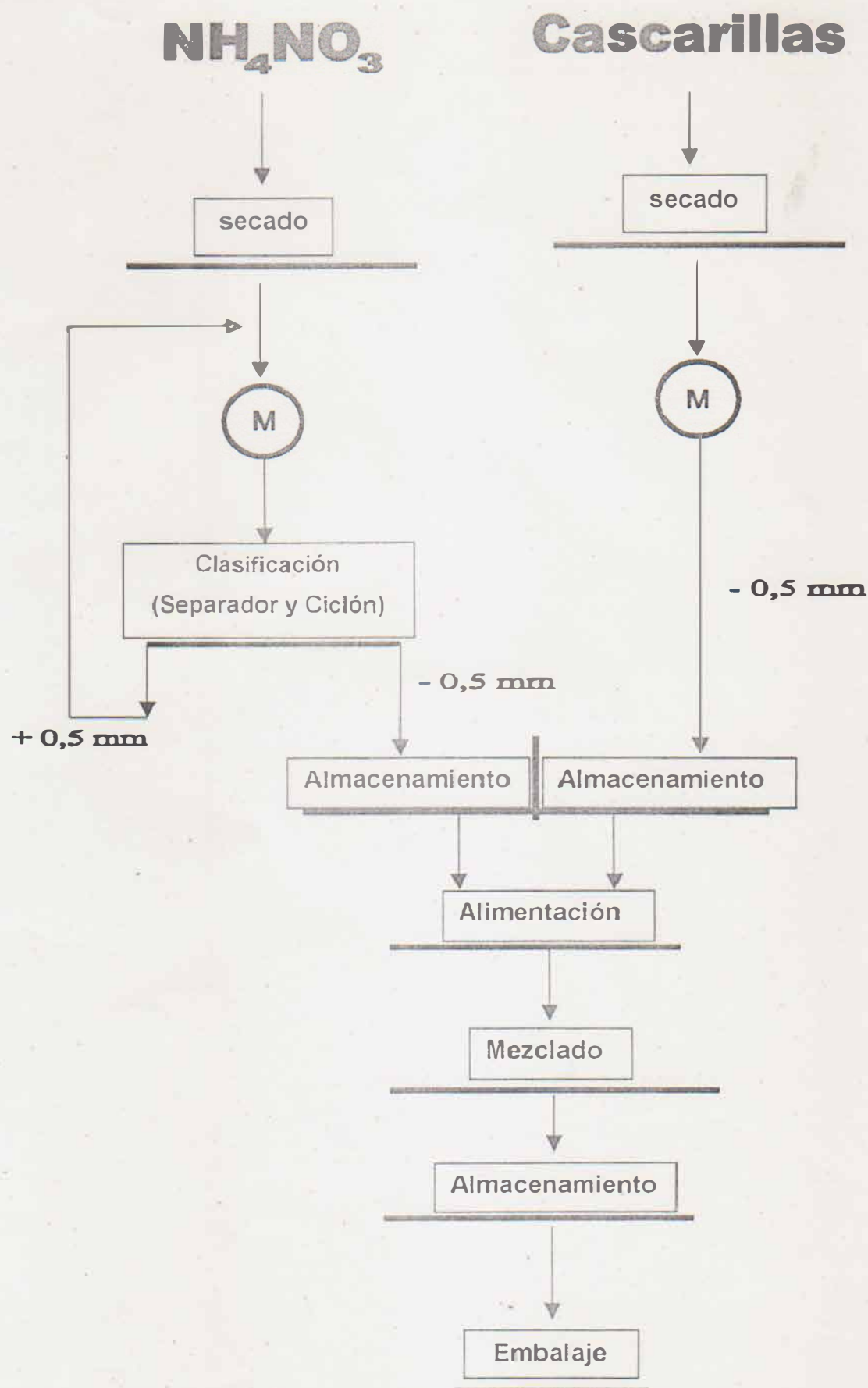


Fig. 10: Esquema del flujo tecnológico para la producción de las mezclas

Conclusiones del capítulo

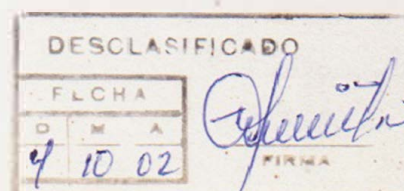
- El uso del molino Rotor SR-2 no satisface las demandas de producción a escala industrial de las cascarillas con granulometría por debajo de 0,5 mm, por lo que se propone el molino Rotor SR-3, con una productividad dada por el fabricante de 360 Kg./h.
- El análisis de escalado realizado, utilizando como patrón el molino de bolas empleado a escala de laboratorio para la molienda del Nitrato de Amonio da resultados similares a cuando se utiliza como patrón el molino empleado para la reducción del cloruro de sodio (sal común), material similar.

Conclusiones finales del trabajo

1. En el trabajo se resuelve el problema fundamental que ocupa la investigación lográndose establecer la relación entre los aspectos tecnológicos: cinética de la molienda, clasificación de las partículas y la cinética del proceso de mezclado, elaborándose una metodología de los procesos tecnológicos que permiten la producción industrial de las mezclas explosivas a base de nitrato de amonio y cascarillas de café o de cacao.
2. Se obtuvieron las curvas que caracterizan el comportamiento de los factores durante el proceso de molienda y se establecieron los regímenes de molienda de los materiales con el uso del molino de bolas
3. Durante los ensayos realizados a escala de laboratorio con el molino de bolas y el molino de Rotor SR-2, se comprobó que:
 - Para la reducción del Nitrato de Amonio es idóneo el uso del molino de bolas.
 - Para la reducción de las cascarillas es más idóneo el molino Rotor SR-3
4. La preparación de los materiales para la producción de mezclas explosivas se garantiza con los siguientes procesos:
Para las cascarillas de café y de cacao: secado con el uso de la energía solar y molienda con el uso del molino Rotor SR-3
Para el Nitrato de Amonio: secado con el uso de un horno de tambor rotatorio, molienda con el uso del molino de bolas y clasificación neumática.
El mezclado de ambos materiales se realiza con la hormigonera de tipo Taino.

Recomendaciones

- Como la metodología propuesta para la producción de explosivos pulverulentos se limita sólo al estudio de los materiales combustibles cascarillas de cacao y de café, se recomienda el estudio de otros materiales combustibles que permitan formar mezclas similares y ampliar la gama de producción en nuestro país.



REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- 1) A. Arbones, E. Ingeniería Económica – Bioxarev: Marcombo, 1998.
- 2) A. Crosby, W.; E. Pinco, M. When to use aluminum in bulk explosives. Canadad. 1998.
- 3) A. Razumov, K.; A. Perov, V. Proyectos de Fábrica de Preparación de Minerales. Mir. Moscú. 1985.
- 4) Aguilar Bartolomé, F. Los explosivos y sus aplicaciones tomo I. JEN. Madrid. España. 1972.
- 5) Akhavan, Jacqueline, The Royal Society of Chemitry. 1998.
- 6) Análisis de varianza. Empresa de producción y Servicio del mes. S/A.
- 7) Baró, Consuelo. Experiencia en la utilización de la nitromiel en minas a cielo abierto y subterráneas. Primer Taller de explosivos de uso industrial. Cuba. 1992.
- 8) Baró, María del C. Análisis de los resultados obtenidos con la aplicación de la nitromiel en los trabajos de voladura. Revista minería y geología. 1984.
- 9) Batista L, J.; Reyes, J. Historia de las sustancias explosivas industriales utilizadas en cuba. Forum estudiantil. 1996.
- 10) Batista L., J.; Otaño N., J. A. Creación de nuevas sustancias explosivas.- Moa, Cuba: ISMMANJ, 1996.
- 11) Batista L., J.; Otaño N., J. A. Verdecia V., P. Creación de nuevas sustancias explosivas. Memoria simposio de minería y geología. 1998.
- 12) Batista L., J.; Otaño N., J. A.; Montero, J. Creación de nuevas sustancias explosivas, forum estudiantil. 1996.
- 13) Batista L., J.; Otaño N., J. A.; Verdecia V., P. Obtención de nuevas sustancias explosivas. Revista minería y geología. 1996.
- 14) Batista L., J; Valdés C., J.; Miranda D., J. Valoración de la efectividad económica de la producción de sustancias explosivas en Cuba. Forum estudiantil. 1996.
- 15) Batista L., J. Tesis en opción al grado científico de Doctor en ciencias técnicas ISMMANJ Moa Cuba. 1999.
- 16) Blaisdell, E. A. Statistics and Practice. Saunder College. Philadelphia. 1993.
- 17) Castillo R., A.; Otaño, N.J. Creación de nuevas sustancias explosivas.- Moa, Cuba: ISMMANJ, 1988.
- 18) Castro Ruz, F. Informe Central. Discurso de Clausura V Congreso del PCC. – La Habana: Editorial Política, 1997.
- 19) Comisión del Sur. Desafío para el Sur.- México: Fondo Cultural Económico, 1990.

- 20) Cottrell-Uk at, Alan. An introduction to Metallurgy. Cambridge. 1995. (54-68)p.
- 21) Chang C., A. R. Cálculo de los principales procesos en los Hornos Metalúrgicos- La Habana: Felix Varela, 1997.
- 22) Chang C., A. R. -Hornos Metalúrgicos. La Habana: EMPES, 1986.
- 23) D. Cutnell, J.; W. Johnson, K. Physic. 2ed. New York, John Wiley & Sons, INC., 1992.
- 24) D. Finnerty, J. Financiamiento de proyecto. Técnica moderna de ingeniería económica. John Wiley & Sons INC. 1998.
- 25) D.Bernal, J. Historia Social de La Ciencia. Ciencias Sociales II Tomos. 1987.
- 26) Desh Varsheischili, A. B. Sistema de transporte por tuberías en las plantas de Beneficio de minerales. Nedra, Moscú. 1981.
- 27) Dirección de canteras. La Nitromiel en canteras. Primer taller de explosivos de uso industrial de producción nacional. Cuba, 1992.
- 28) Dubnov L., I.; Baxarievivh H., C.; otros. Sustancias Explosivas. NEDRA. Moscú. 1973.
- 29) E. Andreiev, S.; A. Perov, V.; V. Zverievich, V. Trituración desmenuzamiento y cribado de minerals. Mir. 1980.
- 30) Explosivos de Norteamérica S.A. Altos explosivos. 1998.
- 31) Fround E., John; Simon A., G. Modern Elementary Statistics. EUA. 1992.
- 32) G. Rudenkov, K.; M. Shejanov, M. Eliminación de la humedad y el polvo- La Habana: Pueblo y Educación, 1989.
- 33) Gibbs, T. R. y Popolato, A. Lasl Explosive Property Data. Berkeley. California, 1980.
- 34) González P., A.; Otaño N., J.A. Aplicación del Amocal en rocas de fortaleza 6 - 8 según protodiaconov. - Moa, Cuba: ISMMANJ, 1995.
- 35) Grauger B., G. Operaciones básicas y aportes básicos en la tecnología Química, Editorial química. Moscú. 1971.
- 36) Guerra Sardiña, L; Batista L., J. Creación de nuevas sustancias explosivas a base de nitrato de amonio y cascarilla de cacao.- Moa, Cuba: ISMMANJ, 1990.
- 37) H. Herrera, F., V. Kostrikov, P., D. Duque, J. A. Planificación de los experimentos. Ediciones. La Habana. 1985..
- 38) Hellber, T.; Lars M., J; Nobel, A. Lagerblads. Tryckeri. Suecia. 1983.
- 39) Herrera M., V.; Otaño N., J. Creación de nuevas sustancias explosivas trabajo de diploma.- Moa, Cuba: ISMMANJ, 1990.
- 40) Hornos de Cemento. Dpto de Información Técnica. Editora Tecnológica. 1986.

- 41) Ibolguin A., I. Explosiones creadoras. NEDRA. Moscú, 1975.
- 42) Instituto tecnológico Geominero de España. Manual de perforación y voladura, 1992.
- 43) Instituto tecnológico Geominero de España. Manual de perforación y voladura, 1994.
- 44) Jiménez P., H; Batista L., J. Investigación de sustancias explosivas simples para su producción en Cuba.- Moa, Cuba: ISMMANJ, 1998.
- 45) Kalinin, V. A. Transportación de desechos por Tuberías. Mecanización y Electrificación de la economía Rural Socialista. Moscú, 1969.
- 46) Kazakov A., T. Métodos y técnica para trabajos con explosivos.-Moscú: NEDRA, 1974.
- 47) kuhl, A. L. et all. Dynamic Aspects of Detonation. Vol. 153. Board. 1993.
- 48) kuhl, A. L. et all. Dynamic Aspects of Detonation. Vol. 154. Board. 1993.
- 49) Lavín M., L.R.; Otaño, N.J.A. Estudio de la sustancia explosiva en base de nitrato de Amonio y cascarilla de café. Trabajo de diploma. Cuba. 1991.
- 50) Lesme Jaén, R. y Rodríguez Alonso, L. F. Sistema de Transporte Pnumático, Cálculo y Proyección. ISPJAM. Cuba. 1996.
- 51) López Jimeno, Carlos y Otros. Manual de Túneles y obras Subterráneas. - MOSTOLES (Madrid): Gráficas Arias Montano S.A., 1997.- (404-412)p.
- 52) Lower costs and more work are keytrends in feeder dising-**Kiran Casteel**. World Mining Equipment.(Finlandia). Vol. 24 N° 2: (39-41)p.,-March, 2000.
- 53) Llórente, G.E. Estudio de explosivos industriales. Madrid. España. 1963.
- 54) M. Gordon, G.; L. Peisajo, I. Captación de polvo y purificación de gases en la Metalurgia de metales no ferrosos.- Moscú: Mir.1985.
- 55) M. Portuondo, F. Economía de Empresas 1T. La Habana: Pueblo y Educación, 1983.
- 56) M. Portuondo, F. Economía de Empresas 2T. La Habana: Pueblo y Educación, 1985.
- 57) Manual de Empleo de Explosivos. Unión Española de Explosivos. España 1994.
- 58) Manual de explosivos. MINFAR. 1990.
- 59) Manual de Perforación y Voladura de Rocas. Instituto Tecnológico Geominero de España. 1994.
- 60) Manuel Antonio, I. Perfeccionamiento de la tecnología para la producción de la Sustancia explosiva simple a escala industrial.- Moa, Cuba: ISMMANJ, 1998.

- 61) Masona Tardá, J. Ventiladores y Turbocompresores. MARCOMBO S.A. Barcelona. 1972.
- 62) Ministerio de Ciencia Tecnología y Medio ambiente. Un Pueblo de Ciencia- La Habana: 1997.
- 63) Noa, M.R; Batista, L.J. Pasaporte de voladura para túneles populares del municipio Moa. Trabajo de diploma. Cuba. 1993.
- 64) Oriol Guerra, J. M. Conferencia de Máquinas Transportadoras. Felix Varela. ISPJAE. Cuba. 1993.
- 65) Oriol Guerra, J. M. Conferencia de Máquinas Transportadoras. ISPJAE. Cuba. 1986.
- 66) Oriol Guerra, J. M. Máquinas de transporte Continuo. Pueblo y Educación. La Habana. 1988.
- 67) Otaño, N.J. Fragmentación de rocas con explosivos. Pueblo y Educación. Cuba. 1980.
- 68) Otaño, N.J; Batista, L.J. Algunas experiencias en la investigación de sustancias explosivas industriales. 1er. Taller de explosivos de producción nacional. Cuba. 1992.
- 69) Otaño, N.J. Fragmentación de rocas con explosivos. Felix Varela. Cuba. 1998.
- 70) Pan, R.; W. Wypych, P. Pressure drop and slug velocity in low – velocity pneumatic conveying of bulk solids. Powder Technology.
- 71) Peñafuerte González, A. Análisis de una variante tecnológica para la producción de sustancia explosiva. Trabajo de Diploma. ISMMANJ, Moa, Cuba, 1995.
- 72) Pereira, E.R; Batista, L.J. Introducción del Amocal en Minas "Merceditas". Trabajo de diploma. Cuba. 1994.
- 73) Perry, J. H. Chemical Engineers. Hand Book. E.Revolucionarias. la Habana, 1967.
- 74) Plant energy systems McGRAW-HILL BOOK. New York. 1967.
- 75) Prokrovcki, G.I. La explosión MIR. Moscú. 1983.
- 76) Prokrovcki, G.I. La explosión. NEDRA. Moscú. 1973.
- 77) Puzdmakov, Z.G. Manual de las sustancias explosivas industriales y medio de explosión NEDRA. Moscú. 1977.
- 78) R. Lide, David. Hanbook of chemistry and physics. CRC PRESS. New York. 1997.
- 79) Reisch, Karl y otros. Técnica de explosivos y voladura su influencia en la minería y en el medio ambiente. XV congreso de minería. Madrid. 1992.

- 80) Revista. Vergel P.,O. Producción de cal en hornos rotatorios Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Ingeniería de Minas. 1995. (55-58)p.
- 81) Revistas: Propellans, Explosives, Pyrotechnics. Vol.21, N°3 del 90 (108-172)p.
- 82) Revistas: Propellans, Explosives, Pyrotechnics. Vol.24, N°5 del 99 (269-330)p.
- 83) Revistas: Propellans, Explosives, Pyrotechnics. Vol.24, N°6 del 99 (331-380)p.
- 84) Riaño C.,N. Fundamentos Físico Químicos- Colombia: Manizales, 1998.-313p.
- 85) Rodríguez, A; Hernández, L.M. Tablas y resúmenes estadísticas. Pueblo y Educación. Cuba. 1986.
- 86) Rosello, W.N; Verdecia, V.P. Trabajo de los metales con explosivos. Cuba. 1990.
- 87) Smoldirev, A. E. transporte Neumo-Hidráulico. Metalurgia, Moscú. 1967.
- 88) Smoldirev, A. E. Transporte por Tuberías. Niedra, Moscú. 1980.
- 89) Stettbacher, A. Polvoras y explosivos. Ediciones G. GI/I, S.A. Buenos Aires. 1952.
- 90) Técnica de Conservación Energética en la industria. Ediciones Revolucionaria. 2T. 1987.
- 91) Tecnología y Sociedad. Grupo de Estudio de Ciencias Sociales: Felix Varela. La Habana.1999.
- 92) Teixeira Freire, J. Transporte Pneumático Vertical. Sao Carlos. Brasil, 1993.
- 93) The International Society of Explosives Engineers . Cantera y Explotaciones N° 384, 1999.
- 94) Torres Triana, A. Hornos Rotatorios del Cemento. Ciencia y Técnica. La Habana, 1981.
- 95) Unión Española de explosivos S.A. Riomex pequeño diámetro. España.1997.
- 96) Unión Española de explosivos. IV Curso sobre explosivos en las obras públicas. Principios básicos y aplicaciones. España. 1994.
- 97) Urbanski. T. Química y tecnología de los explosivos. T-2 y T-4.1984.
- 98) Vergily López, Pablo A.; Rodríguez Aguilar, Juan C. Algunas Consideraciones Sobre la Explotación del Transporte Neumático en la Empresa Ernesto Guevara.- Moa, Cuba: ISMMANJ, 1987.
- 99) Videaux D., M.; Otaño N., .J.; Batista, L.J. Creación de nuevas sustancias explosivas. Trabajo de diploma. 1990.
- 100) T., Ohsawa; H., Fujimory; Y., Takahashi y K., Katajama. Submicron Grinding of $\text{BaNd}_2\text{Ti}_5\text{O}_{14}$ Dielectric Capacitor Material and It's Sinterability.