



FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE METALURGIA y QUÍMICA

Trabajo de Diploma en opción al título de
Ingeniero en Metalurgia y Materiales

Evaluación del régimen de trabajo de la
separación neumática del mineral zeolita en
la UEB Geominera Holguín.

Diplomante : Norma Yanela Rodríguez Pupo

Tutores : Dr.C. Ing. Pedro Enrique Beyris Mazar

Ing. José García Sánchez

Moa 2023

Declaración de autoridad:

Yo: Norma Yanela Rodríguez Pupo

Autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor de la Universidad de Moa “Dr. Antonio Núñez Jiménez”, la cual podrá hacer uso del mismo con la finalidad que estime conveniente.

_____ Norma Yanela
Rodríguez Pupo

_____ Dr.C. Ing. Pedro Enrique Beyris Mazar

Pensamiento

En la tierra hacen falta personas que trabajen más y critiquen menos, que construyan más y destruyan menos, que prometan menos y resuelvan más, que esperen recibir menos y den más, que digan mejor ahora que mañana.

Che.

Dedicatoria

A todos los que contribuyeron con la realización de esta investigación.

A mi madre que ha estado en cada decisión que he tomado en mi vida.

A mi padre que me apoyo aun estando lejos.

A mis abuelos Norma y Carlos, a mis tías, mi tío Guille, mis primos y mis hermanos.

A mis tutores, José García Sánchez (Cheo) y Pedro Enrique Beyris Mazar que me brindaron su conocimiento y experiencia como ingenieros.

A mi segunda familia mis amigos que desde primer año compartimos los mejores y peores momentos de nuestra vida universitaria (La funeraria). Los quiero

A todos muchas gracias.

Agradecimientos

La culminación de esta investigación, no es solo un resultado individual de la autora. En su ejecución intervinieron, aportaron y participaron varias personas, quienes me brindaron apoyo, colaboración, confianza y motivación, de manera incondicional y desinteresada. A todos, muchas gracias.

Resumen

Con el objetivo de evaluar el régimen de trabajo en la separación neumática de la zeolita para mejorar la calidad de los productos obtenidos en la UEB Geominera Holguín se aplicó el método de separación neumática. Para el desarrollo de la investigación se emplearon los métodos histórico-lógico, inductivo-deductivo, análisis y síntesis, como método empírico se empleó la observación directa y la revisión documental, para la recuperación de la información, en adición se utilizó la estadística descriptiva. En la preparación de la muestra se empleó el método por puntos y se utilizaron los análisis por tamices y la separación de clase por densidad, esta se preparó según lo establecido en la norma cubana NC 627 preparación de las muestras para ensayos de laboratorio. Se constató un aumento de partículas finas con el aumento de la velocidad del flujo de aire alcanzándose el 100%. Para cada clase granulométrica que se obtuvieron en los análisis de tamices se realizó un diagrama de Pareto, para separar la clase que tiene la mayor representatividad. En la sección de los resultados se expusieron y describieron los datos obtenidos en la investigación. Se realizó la evaluación económica, comparándose los resultados actuales y los proyectados en cuanto a ingresos, costos, beneficios y relación beneficio/costo. Se calcularon los ingresos teniendo en cuenta los rendimientos actuales y un incremento productivo estimado del 20%. Se comprobó que el régimen de trabajo en la separación neumática contribuye a la mejora de la eficiencia productiva y económica de este sistema.

Palabras claves: separación neumática, fracciones finas, zeolita.

Abstract

With the objective of evaluating the work regime in the pneumatic separation of the zeolite to improve the quality of the products obtained at the UEB Geominera Holguín, the pneumatic separation method was applied. For the development of the research, historical-logical, inductive deductive, analysis and synthesis methods were used. As an empirical method, direct observation and documentary review were used, for the recovery of information, in addition, descriptive statistics were used. The point method was used to prepare the sample, which was subjected to a size reduction process through crushing. The sample was prepared, which constitutes a preliminary stage of interest, since it allows for the subsequent treatments to which it will be subjected. It was prepared in accordance with the provisions of the Cuban standard NC 627, preparation of samples for laboratory tests. An increase in fine particles was observed with increasing air flow speed, reaching 100%. In the results section, the data obtained in the research were presented and described. The economic evaluation was carried out, comparing the current and projected results in terms of income, costs, benefits and benefit/cost ratio. Income was calculated taking into account current yields and an estimated productive increase of 20%. It was proven that the work regime in pneumatic separation contributes to improving the productive and economic efficiency of this system.

Keywords: pneumatic separation, fine fractions, zeolite

INDICE

CAPÍTULO I. MARCO CONCEPTUAL.....	6
1.1 Antecedentes Bibliográficos	6
1.2 El mineral zeolita. Evolución, generalidades y pertenencia.	7
1.3 La separación neumática como método para la obtención de partículas.....	8
1.3.1 El ciclón neumático como instrumento para la separación de partículas.....	11
1.3.2 La clasificación en criba, ciclón, filtro de manga, ventilador	11
1.4 La producción de zeolita en Cuba	12
1.5 El proceso tecnológico en la UEB Geominera Holguín	14
1.6 Conclusiones parciales	17
CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS	18
2.1 Procedimiento	18
2.2 Procesamiento estadístico y análisis de los resultados	21
2.3 Métodos de investigación.....	21
2.4 Conclusiones parciales.....	22
CAPITULO III. RESULTADOS Y DISCUSIÓN	36
3.1 Resultados de los ensayos	36
3.1 Resultados de la aplicación del método de clasificación neumática en la muestra estudiada.....	37
3.2 Estimación económica.....	48
3.3 Conclusiones parciales.....	50
Conclusiones generales	51
RECOMENDACIONES	52
Referencias bibliográficas	1
Anexos 1	5
Reactor cilíndrico	5

Anexo 2
6

Anexo 3
7

INTRODUCCIÓN

Las zeolitas son minerales con una estructura cristalina tridimensional relativamente abierta construida a partir de los elementos aluminio, oxígeno y silicio, con metales alcalinos o alcalinotérreos tales como sodio, potasio, y magnesio más algunas moléculas de agua atrapadas en los espacios entre ellos. Estas se forman con muchas estructuras cristalinas diferentes, por lo cual se han identificado alrededor de 40 zeolitas naturales, que se forman tanto en rocas volcánicas y sedimentarias, así como alrededor de 150 zeolitas sintéticas (Wood Ford, 2009).

Su producción a nivel global experimentó una disminución en la primera mitad del año 2021, como consecuencia del déficit de materias primas, limitaciones con la mano de obra y los cierres de plantas durante los embates de la pandemia de la Covid-19; sin embargo, se estima que el mercado de zeolitas experimente un crecimiento de un 2.5% en el periodo 2023-2028. Lo anterior responde a sus múltiples aplicaciones, siendo empleado como adsorbente o catalizador en diferentes industrias entre las que pueden mencionarse la agricultura para mejoramiento de suelos, aditivo y extensores de fertilizantes; el medioambiente en la potabilización de agua, como absorbente de aceites y el tratamiento de aguas residuales; en veterinaria para la nutrición animal y para lechos de mascotas; en la industria química en catalizadores, purificadores y separadores de gases; y en la industria de materiales construcción (Mordor Inteligencia, 2023).

En consecuencia, la diversidad de las aplicaciones de la zeolita, implica una gran variedad de producciones, caracterizadas principalmente por su espectro granulométrico, como principal característica de calidad, por lo cual comúnmente el procesamiento de las zeolitas naturales para su posterior utilización con fines industriales, incluye las operaciones de reducción de tamaño mediante la trituración y la molienda, así como el cribado y la separación de partículas, la cual puede ejecutarse a partir del método de la separación neumática, las cuales emplean el aire (Coello et al., 2005).

En este sentido, el método de separación neumática de partículas consiste en la aplicación de un fluido, gas o líquido en forma ascendente a través de un lecho de partículas, siendo una tecnología ampliamente usada en diferentes procesos industriales. Este resulta un método más ventajoso atendiendo a su resistencia a las variaciones de temperatura, a su seguridad, simplicidad y viabilidad económica (Tapia, 2006).

Por otro lado, según Geominsal (2023), Cuba posee una de las reservas de zeolitas naturales más grandes del mundo y de alta calidad y los yacimientos se encuentran distribuidos en toda la geografía nacional, cuyos depósitos según Díaz Díaz (2021) aseguran la producción por más de 150 años. En consecuencia, en el país existen tres plantas operativas de las cuales destaca por el crecimiento sostenido de sus ventas y exportaciones a países como Brasil, Colombia, Venezuela, España e Italia, así como por su eficiencia económica y productiva, la Unidad Empresarial de Base (UEB) Holguín, ubicada en San Andrés, provincia Holguín.

Esta organización tiene instalada una capacidad de procesamiento de 6 000 t/año y procesa zeolitas finas con granulometrías de 0.8 mm y 0.074 mm a partir de un proceso tecnológico basado en la trituración, clasificación dinámica, secado y molienda del mineral procedente de la mina, hasta alcanzar los requerimientos granulométricos del producto (Geominsal, 2023); sin embargo aunque actualmente sus clientes demandan granulometrías de fracciones finas, el proceso tecnológico caracterizado por el método de clasificación dinámica como mecanismo para la separación de partículas, no permite la obtención de productos en clases granulométricas con estos parámetros. En adición, se desconocen los rendimientos para las clases granulométricas finas de estrecho rango, razón por la cual resulta pertinente analizar las condiciones de trabajo para la obtención de estas granulometrías. Esto constituye la **situación problemática**.

El **problema científico**: insuficiencias del proceso tecnológico de producción de zeolita en la UEB Geominera Holguín lo que limita la obtención de productos en clases granulométricas finas de estrecho rango.

El **objeto de investigación** es el proceso tecnológico de producción de zeolita en la UEB Geominera Holguín.

Se formula como **objetivo general** de la investigación: evaluar el régimen de trabajo en el proceso tecnológico de la separación neumática de zeolita para mejorar la calidad de los productos obtenidos.

Para el logro del objetivo general se declaran los **objetivos específicos** siguientes:

1. Realizar el análisis granulométrico de los productos obtenidos en la separación neumática en la planta de zeolita de la UEB Geominera Holguín.

2. Evaluar las condiciones de trabajo en la separación neumática variando el caudal del aire en el Dámper del separador.
3. Analizar e interpretar los resultados de la investigación.

El **campo de acción** es estudiar la separación neumática en la planta de zeolita de la UEB Geominera Holguín.

La **hipótesis** la evaluación del régimen de trabajo de la separación neumática permitirá conocer las mejoras de las producciones granulométricas en la planta de zeolita de la UEB Geominera Holguín.

CAPÍTULO I. MARCO CONCEPTUAL

En el presente capítulo se expondrá la zeolita como mineral, sus características, la evolución, generalidades y la importancia de la separación neumática para una mayor productividad así como el proceso tecnológico que se realiza en la UEB.

1.1 Antecedentes Bibliográficos

Se realizó una búsqueda en los trabajos realizados en la separación de partículas en estos se emplean los métodos más tradicionales y rentables para obtener la granulometría deseada.

En este trabajo se desarrolló un modelo de programación no lineal (NLP) para optimizar el proceso de separación de partículas en un rango diámetros entre 0,5-10 μm . El proceso estudiado consta de un dosificador de sólido particulado, un ciclón de alta eficiencia, un filtro de mangas y un ventilador. Se evaluaron como casos de estudio 15 concentraciones de polvo alimentadas al proceso, variando entre 2 y 500 g/m^3 de aire, y 3 tipos diferentes de ciclones para el diseño: Starimand, Swift y Muschelknautz.

El NLP resultante en cada caso, de 102 ecuaciones y 80 variables continuas. El ciclón Swift resultó el más adecuado presentando un valor de eficiencia óptimo de 93,3%, para la máxima concentración de polvo estudiada, y una eficiencia global del proceso de 96,7%. Los resultados numéricos muestran que la eficiencia de separación en el ciclón aumenta con la concentración de partículas en el aire para todos los casos analizados. La utilización de herramientas computacionales y el modelado basado en restricciones han demostrado ser un método eficaz para predecir adecuadamente el comportamiento del sistema. El modelo propuesto ha proporcionado información útil para la mejor comprensión del proceso global de separación de partículas finas. Por otra parte, resulta una valiosa herramienta para el diseño óptimo de este tipo (Paulo, M.S. Diaz, 2013).

La importancia de mantener los ambientes de trabajo libres de polvo ha conducido al establecimiento de marcos legales. Para el correcto diseño de un sistema de desempolvado debe considerarse un número de variables que se interrelacionan entre sí. Las principales variables que afectan al sistema son la temperatura de operación, caudal de fluido a tratar y concentración y tipo de partículas. En este trabajo se presenta el diseño de sistemas que combinan ciclón-filtro para la disminución de la concentración de polvos en ambientes de trabajo. Para ello se desarrolla un

algoritmo de cálculo que permite comparar diferentes combinaciones de ciclón-filtro para lograr condiciones óptimas de funcionamiento, minimizando costos. Puede predecir un resultado técnico y económico rápidamente y efectuar una comparación de las eficiencias logradas y los costos requeridos para los sistemas con y sin ciclón. Se presenta un esquema dinámico que permite modificar la disposición física de cada elemento. La aplicación del método de diseño muestra que el uso de un ciclón como único dispositivo de desempolvado no resulta suficientes para satisfacer las condiciones de emisión establecidas por ley, debido a su baja eficiencia respecto a las partículas con diámetros menores a 10 μm . El filtro de mangas puede reducir el contenido de partículas a los niveles requeridos, pero requiere altos costos de instalación y mantenimiento. La combinación de ambos equipos, utilizando el ciclón como pretratamiento, puede conducir a un óptimo económico y técnico. Los costos correspondientes al gasto para la impulsión del material, aumentan cuando se introduce el ciclón, pero disminuyen los correspondientes al consumo de aire comprimido. Es por ello que cada situación en particular debe analizarse como un todo y no de forma aislada (Elortegui y M. R. Barbosa, 2013).

En los trabajos anteriores se evaluó la separación de partículas combinado con un equipamiento tecnológico y un análisis matemático, en ambos casos se usan los ciclones como principal instrumento de separación. En base a lo analizado se evaluó en el presente trabajo la separación neumática usando un circuito de ciclón, criba, filtro de mangas y ventilador aumentando el caudal del aire de dicho proceso por lo que se obtuvieron las partículas finas con la calidad requerida. Hasta la actualidad no se ha realizado ninguna investigación anterior a esta en la planta de zeolita de la Geominera Holguín.

1.2 El mineral zeolita. Evolución, generalidades y pertenencia.

Las zeolitas son minerales con una estructura cristalina tridimensional relativamente abierta construida a partir de los elementos aluminio, oxígeno y silicio, con metales alcalinos o alcalinotérreos tales como sodio, potasio, y magnesio más algunas moléculas de agua atrapadas en los espacios entre ellos. Estas se forman con muchas estructuras cristalinas diferentes, por lo cual se han identificado alrededor de 40 zeolitas naturales, que se forman tanto en rocas volcánicas y sedimentarias, así como alrededor de 150 zeolitas sintéticas (Wood Ford, 2009).

En el año 1756 un mineralogista sueco, Axel Fredrik Cronstedt, observó que algunos minerales liberaban vapor al ser calentados. Estos minerales parecían hervir debido a la rápida pérdida de agua y los nombró 'zeolitas'. La palabra 'zeolita' que significa piedras en ebullición o hirviendo

se forma a partir de dos palabras griegas “zeo” = hervir y “lithos” = piedra. Las moléculas de agua que se pierden con el calentamiento forman cavidades de dimensiones que van desde 0.3 nm a 1 nm dentro de la estructura de estos minerales (Moshoeshoe et al., 2017).

Por sus propiedades las zeolitas han sido de gran importancia en diferentes campos industriales y diversas aplicaciones, desde la industria petroquímica, para refinar el crudo y convertir el petróleo en gasolina, hasta la purificación de agua contaminada con metales pesados. Uno de sus usos más comunes se presenta en la industria alimenticia, tanto humana como animal; por ejemplo, para encapsular compuestos nutricionales y liberarlos en el organismo.

Las zeolitas también pueden atrapar los componentes activos de los fertilizantes y luego liberarlos paulatinamente para nutrir plantas, lo que permite reducir las aplicaciones de estos y evitar que su exceso termine contaminando las fuentes de agua. Un caso reconocido de su uso, fue en el accidente nuclear de Chernóbil, en donde se esparcieron cerca de 1.5 millones de toneladas de zeolita para atrapar parte de los elementos radioactivos que quedaron en el ambiente, probando una vez más, la versatilidad de estos materiales (Escobar, 2013).

1.3 La separación neumática como método para la obtención de partículas.

Con el objeto de separar el producto mineral proveniente de las distintas operaciones, surgen las operaciones de separación para controlar el tamaño de dicho mineral que alimenta a otro equipo. Esto se debe a que todo equipo es capaz de manejar un tamaño óptimo de material en la forma más eficiente, además que los materiales procedentes de la trituración o molienda, no se ajustan a los tamaños requeridos y, por lo tanto, hay que hacer una separación por dimensiones en función de su uso final (Wills, B. 1997).

El método de separación neumática de partículas consiste en la aplicación de un fluido, gas o líquido en forma ascendente a través de un lecho de partículas, siendo una tecnología ampliamente usada en diferentes procesos industriales. Este resulta un método más ventajoso atendiendo a su resistencia a las variaciones de temperatura, a su seguridad, simplicidad y viabilidad económica (Tapia, 2006).

La separación de las partículas en el seno de un fluido gaseoso, se realiza según los mismos principios generales utilizados en la clasificación hidráulica, con la salvedad de que las diferencias

de densidad entre las materias sólidas y el fluido portador o de arrastre, aquí son mucho más grandes (Fueyo, L 1999).

Este tipo de separación neumática se utiliza tanto en circuito abierto como en circuito cerrado o incluso en cascada. En circuito cerrado, se utiliza para regular la finura de un producto molido o para realizar una clasificación previa a la molienda de un producto fino, con el objetivo de reducir el tamaño de partículas en consecuencia se mejora su capacidad de ser suspendidas en el flujo de aire y separadas según su densidad o características aerodinámicas. En circuito abierto, se utiliza para la extracción de impurezas perjudiciales bajo formas de partículas ultrafinas de productos naturales como, por ejemplo, las arenas.

En cascada se utilizan para obtener fracciones granulométricas sucesivas del producto e incluso un mayor rendimiento de extracción. Los separadores de aire pueden trabajar por gravimetría, por efecto centrífugo o bien por una mezcla de los dos como en la mayoría de los aparatos (Benventa, José (1990).

La separación neumática tiene un campo limitado en preparación de minerales, pues exige que los productos estén muy secos para poder llevarse a cabo, siendo este campo: la industria del carbón, el cemento y aquellos minerales que no exigen etapas posteriores y/o previas por vía húmeda.

La importancia reciente proporcionada a los procedimientos de la separación neumática, ha conducido a los fabricantes y usuarios a reunir los datos relativos a sus campos de utilización y a sus comportamientos. Parece ser que la separación neumática viene en relación directa con la clasificación volumétrica en seco por tamiz, y permite obtener unas separaciones eficaces en el campo de los finos. Actualmente han podido ser alcanzados caudales del orden de 80 t/h sobre los aparatos neumáticos y en las instalaciones existentes; este modo de separación se aplica con éxito, notablemente en el tratamiento en seco de los minerales de hierro de hematites y para los fosfatos. La separación neumática es más segura que la hidráulica, las fugas son más fáciles de controlar, no derraman líquidos. Los componentes son más simples y de fácil comprensión. Uno de sus fuertes es la velocidad, es útil para esfuerzos que requieran precisión y velocidad.

Las mayores desventajas de la separación neumática es que debe pasar por unidades de mantenimiento antes de ser utilizados. No permite velocidades regulares y constantes debido a la compresión del gas. Los esfuerzos de trabajo son limitados, es ruidoso. Es una energía cara, que

en cierto punto es compensada por el buen rendimiento y la facilidad de implementación (José Mario García Moreno 2020) (ver figura 1).

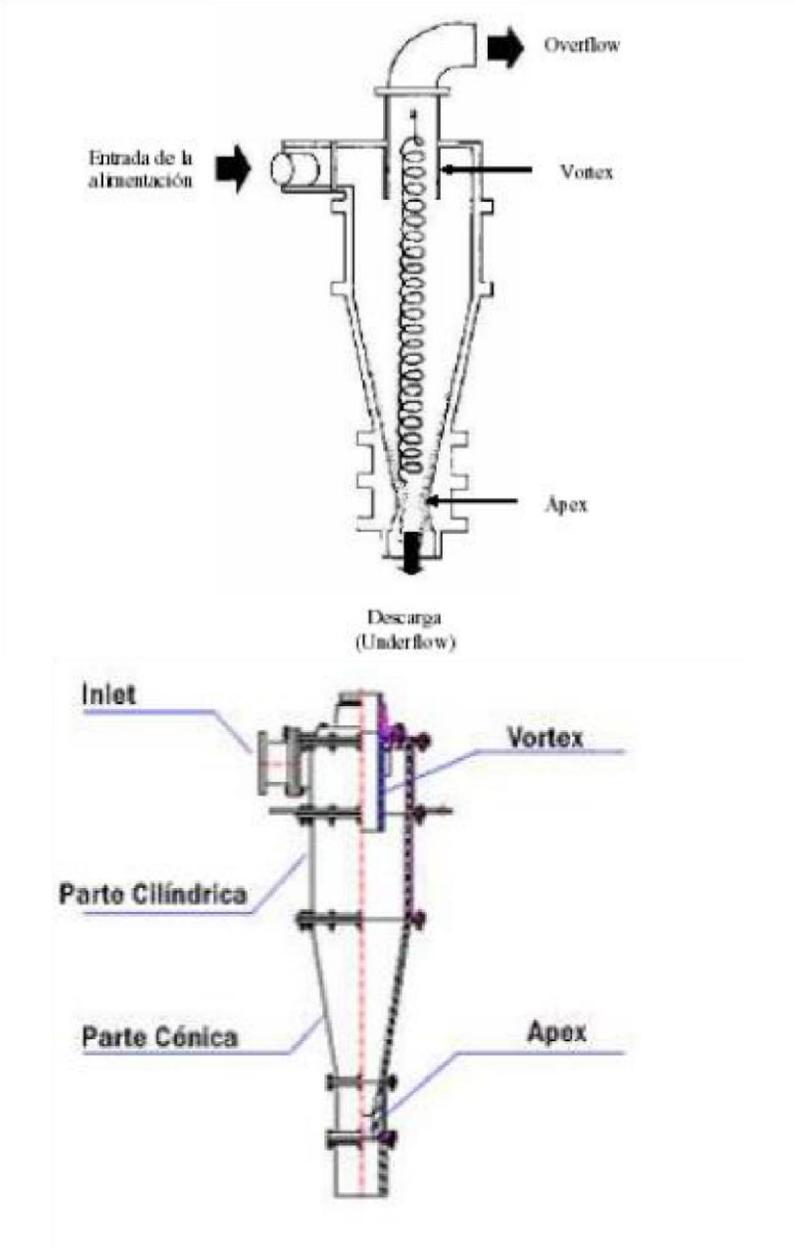


Figura 1. Separadores neumáticos. Zonas de trabajo de un separador neumático.

1.3.1 El ciclón neumático como instrumento para la separación de partículas

Es un clasificador centrífugo de minerales finos llevados en suspensión por un fluido gaseoso llevado en corriente, que entra tangencialmente en la parte superior del aparato. Un típico ciclón consiste de un depósito de forma de cilindro cónica con una válvula de control de descarga o una boquilla en su parte cónica por donde se hace la descarga inferior, y en su sección cilíndrica contiene una entrada tangencial de alimentación. El tope de la sección cilíndrica es cerrado con un plato a través del cual pasa axialmente la tubería de descarga superior. Dicha tubería es extendida dentro del cuerpo del ciclón, cuya sección se denomina “localizador del vórtice”, el cual previene el corto circuito de la alimentación directamente dentro de la descarga superior (Wills B 1997).

La alimentación es introducida tangencialmente a la parte cilíndrica bajo una cierta presión. La suspensión empieza a rotar alrededor del eje longitudinal del ciclón, formándose un torbellino primario descendente hacia el vértice de la parte cónica y que genera un vórtice con una zona de baja presión a lo largo del eje vertical.

Las partículas más gruesas, debido a la aceleración centrífuga, se adhieren a la pared, siendo finalmente evacuadas por la salida inferior. Debido a las reducidas dimensiones de este orificio, solamente se evacua una parte de la suspensión descarga inferior, la cual transporta las partículas gruesas (Fueyo, L. ,1999).

En dicha salida inferior se crea un segundo torbellino de trayectoria ascendente, el cual transporta la mayor parte del aire, junto con las partículas finas en suspensión que no han sido descargadas por la salida inferior. Finalmente, esta corriente abandona el ciclón a través del tubo central superior o localizador del vórtice. En el interior del torbellino secundario, se crea una depresión que recoge todo el aire existente en la suspensión, creándose una columna de aire central que asciende hasta el localizador del vórtice y sobre el cual gira realmente el torbellino secundario, en el cual vuelve a producirse una nueva separación de partículas.(Bouso, J.,s/f).

1.3.2 La clasificación en criba, ciclón, filtro de manga, ventilador

El cribado es un proceso mecánico que separa los minerales de acuerdo a su tamaño de partícula individual. Esto se cumple proporcionando un movimiento en particular, el cual es generalmente una malla o una placa perforada, esto provoca que las partículas más pequeñas pasen a través de

ellas como finos. La criba se construye con frecuencia abierta por un extremo, de manera, que el mineral de tamaño superior gira hacia él, mientras que el mineral pasa a través de una barra. Las barras son transversales. Las cribas se utilizan únicamente para la separación de bastas ((Kelly, E. 1990).

Los ciclones son adecuados para separar partículas pequeñas. Este dispositivo como único elemento de limpieza de aire no alcanza a cubrir con los mínimos requerimientos legales, pero puede utilizarse para reducir la cantidad de polvo que entra al sistema final de depuración, con lo que alivia el trabajo. Por otra parte, es importante señalar que el desarrollo tecnológico de estos dispositivos los hace útiles como separadores de partículas por tamaño. Los ciclones tienen muy amplia aplicación en diferentes procesos industriales, la metalurgia, la minería, transporte neumático. Los ciclones son los equipos más comúnmente usados para la separación de una mezcla de gas y partículas sólidas. Para los sistemas de recolección de polvo de mayor capacidad, ciclones del mismo tamaño y capacidad se instalarán en una formación de batería en paralelo (Hoffmann y Stein, 2008).

Los filtro de manga son los equipos más representativos de la separación sólido gas consiste en uno o más hileras de mangas de tela, en forma de tubos redondos o mangas. El polvo transportado por la masa de aire pasa, por aspiración o depresión, a lo largo del área de las mangas y luego radialmente a través de la tela. El aire filtrado, una vez en el interior de las mangas, pasa a la cámara superior de aire limpio a través de la boquilla y posteriormente al exterior por medio del ventilador. El filtro es operado cíclicamente, alternando entre períodos de filtrado relativamente largo y períodos cortos de limpieza. Estos recolectan partículas con una eficiencia generalmente de un 99,9% (Ubilla Thompson, Patricio 2014).

1.4 La producción de zeolita en Cuba

Cuba posee una de las reservas de zeolitas naturales más grandes del mundo de alta calidad y los yacimientos se encuentran distribuidos en toda la geografía nacional, cuyos depósitos según Díaz Díaz (2021) aseguran la producción por más de 150 años. En consecuencia, en el país existen tres plantas operativas de las cuales destaca por el crecimiento sostenido de sus ventas y exportaciones a países como Brasil, Colombia, Venezuela, España e Italia, así como por su eficiencia económica y productiva, la Unidad Empresarial de Base (UEB) Holguín, ubicada en San Andrés, provincia Holguín (Geominsal 2023).

El yacimiento de zeolita San Andrés, ubicado a unos 23 km de la ciudad de Holguín, está compuesto mineralógicamente por una secuencia interestratificada variablemente inclinada de tobas vitroclásticas y vitrocrystaloclasticas zeolitizadas, de la formación en Loma Blanca. El yacimiento se extiende aproximadamente 1 200 m en la dirección noroeste a lo largo del eje de un pliegue suave y su ancho varía de 50 a 220 m. La zeolita del tipo Clinoptilolita- Heulandita resulta ser el mineral predominante acompañado de Mordenita, en general el contenido promedio de zeolita en el depósito es de 75 %, donde más del 80 % de los recursos calculados pertenecen al tipo natural, lo que denota una excelente calidad del yacimiento (Rizo, 1998).

Como es conocido, las zeolitas del tipo Clinoptilolita-Heulandita tienen una capacidad de intercambio elevado, lo que le da su amplio uso en más de un proceso industrial, en la agricultura, en usos ambientales estos yacimiento mantiene un intercambio catiónico total que oscila entre 120 a 140 meq/100g, lo que ha provocado el uso no solo en frontera sino también en otros países. Atendiendo a esto se ha llevado un monitoreo constante del yacimiento realizándose ensayos que corroboran la calidad de esta zeolita en correspondencia a la NC 625:2014 zeolita natural requisitos de calidad.

En el año 1990 se comienza la explotación y procesamiento de esta materia prima y su introducción en el mercado nacional en diferentes usos y posteriormente en el año 2012 se convierte en fondo exportable introduciéndose en el mercado internacional con su uso en varios países y en la sustitución de importaciones así como caracterizarse como producto ecológico. Esto ha conllevado a mantener una evaluación exhaustiva del yacimiento y de los diferentes productos que se obtienen en la planta de procesamiento comprobando el mantenimiento de la calidad, química, físico- mecánico y mineralógico (Romero, Ortega, García. 1998).

La composición mineralógica de la zeolita se presenta en tobas vitro y vitrocrystaloclasticas con colores verde claros o verde, siendo la Clinoptilolita, Heulandita, Mordenita con un 71-85% y el Cuarzo, Calcita, Montmorillonita con un 5-10%

Los valores medios obtenidos de las propiedades físico-químicas de la materia prima del yacimiento de San Andrés son la humedad natural promedio con 11,72%, peso volumétrico húmedo 1,97t/m³, peso volumétrico seco 1,73 t/m³, valor medio de la relación del vacío 0,35, valor medio de la saturación 76,04%, peso específico 2,53g/cm³y absorción 2,1%.

1.5 El proceso tecnológico en la UEB Geominera Holguín

La planta de procesamiento de minerales no metálicos de la Unidad Geominera Holguín fue diseñada originalmente para procesar minerales de zeolita del yacimiento San Andrés. En la actualidad se emplea para procesar además de zeolita, vidrio volcánico y bentonita.

El mineral transportado de la mina se alimenta a la tolva de recepción de 12 m³ que posee una parrilla fija de 350 x 650 mm, el mineral sobre tamaño se rompe con mandarría para evitar irregularidades en el proceso. La alimentación se realiza por medio de un alimentador de placa, con velocidad regulable que oscila entre 0.006 y 0.12 m/s, por medio de correas y poleas, alcanzando una productividad de 25 a 45 m³/h, el mineral se alimenta a la primera etapa de trituración gruesa triturador de quijada con abertura de descarga de 50 mm, para obtener un rendimiento de 25 m³/h y tamaño de descarga por debajo de 75 mm, de ahí el mineral es trasladado por bandas transportadoras a la criba vibratoria, en la cual el mineral se clasifica en cuatro fracciones (ver tabla 1), que en dependencia del sistema de compuerta que posee en el sistema de descarga, todo el triturado con tamaño de 0 –25 mm puede sacarse por un solo punto. La clase 25 – 70 mm, cae por gravedad al triturador de cono, donde el mineral es reducido a –25 mm. Del triturador es devuelto a la criba vibratoria por la banda 740-1, cerrándose el circuito.

Tabla 1: Clases de fracciones

Clases de fracciones (mm)	25 - 70	12 – 25	5 - 12	0 -5
----------------------------------	---------	---------	--------	------

La clase –25+12 mm puede remolarse en una segunda etapa en el triturador de impacto, con una abertura de 6 mm, que trabaja en circuito cerrado en la criba vibratoria, incrementando así las clases –12+5 y –5+0 mm. Una parte de esta producción, por medio de bandas transportadoras (12+5 y –5+0) se alimenta al elevador de cubo y por gravedad a la tolva de 120 m³.

De acuerdo a las características de la planta, se produjeron de la clase –25+12 mm unas 15.15 T/h, de la clase –12+5 mm 13.6 T/h y de la clase –5+0 mm unas 13.6 t/h aproximadamente.

En la segunda etapa de la planta secado, trituración fina y clasificación, la humedad máxima del mineral pasado a proceso es del 10% con una productividad de 15 T/h, primeramente el mineral se alimenta al horno por la banda transportadora, con una granulometría de entrada de 0-25 mm ó 0-12 mm, secándose hasta un 2% de humedad, por gravedad pasa a un transportador sinfín y ahí al elevador de cubos que por medio de una canal alimenta al triturador de martillo, con abertura de descarga de la parrilla de 8 mm, una vez triturado, se clasifica en una criba electromagnética obteniéndose tres productos finales (-8+3 mm, -3+1 mm, -1+0 mm).

Tabla 2: Caracterización de las fracciones de los productos finales

Clases de fracciones (mm)	Peso (g)	Peso (%)
-8+3	9,8	1,9
-3+1	191,8	38,4
-1+0	212,5	42,5

Estos tres productos pueden almacenarse en tolvas de 14 m³ por medio de transportadores sin fines o ser envasados en sacos de polipropileno o extraídos a granel, para posteriormente ser trasladados hasta los puntos de ventas los cuales pueden ser el almacén de la planta, el punto de carga de ferrocarriles o el punto de carga en el puerto si está destinado a la exportación en dependencia de las necesidades de los clientes.

La planta cuenta además con un sistema de despolveración por vía húmeda para la parte de la trituración primaria y un sistema de despolveración por vía seca para la parte del secado, con vista a la descontaminación del polvo y evacuación de los gases de la combustión.

El producto triturado a – 8 mm es también la materia prima para la alimentación a la sección de micronización la cual cuenta con un triturador y un separador neumático dinámico que tiene la función fundamental de realizar el control de la granulometría del producto del molino el cual se clasifica y recolecta posteriormente en el ciclón colector. Las partículas muy finas no captadas por el ciclón se transportan hasta el filtro de mangas Este sistema colector de polvos, ciclón filtro garantiza un 99 % de eficiencia

En esencia la tecnología de producción de micronizados se compone de las siguientes operaciones:

1. Molienda seca en el molino pendular
2. Clasificación de control de tamaño de partículas en el separador dinámico
3. Colección del producto clasificado mediante el ciclón y el filtro de mangas
4. Envase y almacenaje del producto

Con esta instalación se obtiene un producto a una productividad de 2,5 ton/hora. Con las exigencias de tamaño deseadas con composición granulométrica de menos 325 Mesh. Las características de los productos finales se ofrecen a continuación, es necesario señalar que no siempre se producen todas las clases granulométricas aquí enumeradas, si no que esto depende del tipo de mineral a procesar y de la exigencia del cliente.

Características del producto final

En la planta de trituración gruesa se obtienen las siguientes clases granulométricas o productos finales.

Clase $-25+12$ mm.

Clase $-12+5$ mm

Clase $-5+0$ mm.

En la planta de trituración fina las clases:

Clase $-8+3$ mm.

Clase $-3+1$ mm. Clase
 $-1+0$ mm.

En la planta de zeolita de la UEB Geominera Holguín, se ha mantenido la calidad del producto final en cuanto a la granulometría establecida en NC 625: 2014 zeolitas naturales requisitos y especificaciones del cliente lo que mantiene en el mercado nacional y extranjero. Respecto a la materia prima la humedad máxima del mineral a pasar a proceso no puede exceder de un 13 %, y

los análisis granulométricos de todos los productos finales no pueden exceder a un 15%. Lo que permite que cada producto se obtenga con la calidad requerida.

1.6 Conclusiones parciales

En los trabajos realizados los científicos Paulo, Elortegui y Barbosa logran su objetivo al obtener las partículas deseadas utilizando solo el ciclón y filtro de manga sin analizar sus parámetros, pueden surgir desventajas.

Existen insuficiencias en los principales parámetros que afectan al sistema como la temperatura de operación y el caudal del aire al tratar la partícula fina. Los costos al procesar el material se deben analizar como un todo y no de forma aislada.

Debido a la insuficiencia de trabajos investigativos acerca de la separación neumática se realizó la evaluación de los parámetros para obtener el mineral zeolita.

CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS

La fase experimental se desarrolló en el laboratorio Elio Trincado de la UEB Geominera Holguín con el objetivo de evaluar el régimen de trabajo en la separación neumática de la zeolita para mejorar la calidad de los productos obtenidos en la UEB Geominera Holguín se aplicó el método de separación neumática. Se definió el procedimiento para el desarrollo del experimento y los mecanismos para el procesamiento estadístico y análisis y discusión de los resultados, así como los métodos de investigación empleados.

2.1 Procedimiento

La fase experimental inició con la selección del mineral. La selección de la muestra se realizó a partir de un muestreo no probabilístico o dirigido, teniendo en cuenta las características de la investigación. En consecuencia, la muestra fue sometida a un proceso de reducción de tamaño utilizando el método de muestreo por puntos, se tomó una muestra inicial de 50 kg de mineral zeolita del yacimiento explotado por la UEB Geominera Holguín,

La muestra bruta pasó por un triturador de mandíbula de 5 mm de abertura de salida hasta que toda la muestra pasó a través del tamiz de 5 mm; la cual se homogenizó y dividió utilizando el divisor de Jhons de canales divisorias de 15 mm, hasta obtener de 2 kg a 4 kg de muestra. Posteriormente, esta muestra fue pasada por un triturador de mandíbula de 3 mm de abertura y fue tamizada por un tamiz de 3,15 mm, de la cual se seleccionó 1 kg de mineral, siendo este pasado por un triturador de rodillos hasta que toda la muestra pasó a través de un tamiz de 1 mm.

Concluido este proceso, se homogenizó y se cuarteó hasta obtener 10 muestras de 20 g cada una, las que se trituraron manualmente a 0,1 mm, siendo estas las muestras utilizadas para la realización de los ensayos, las cuales fueron empaquetadas en bolsas de plástico. En adición, debe señalarse que el proceso de preparación de las muestras se realizó de acuerdo a lo establecido en la norma cubana NC 627: 2014 Preparación de las muestras para ensayos de laboratorio, que es el marco regulatorio para este proceso empleado en la UEB Geominera Holguín.

El análisis granulométrico se realizó según lo establecido por NC 631: 2014. Minerales. Análisis granulométrico por tamizado, específicamente de acuerdo a lo regulado en el Requisito 5.3 Tamizado por vía seca para el tamaño de abertura menor de 1mm, tome el tamiz o juego de tamices con una mano y golpee aproximadamente 60 veces en un minuto contra la otra mano con una inclinación de 10 grados a 20 grados después de 30 golpes ponga el tamiz en posición horizontal,

gire 90 grados y de un golpe fuerte con la mano contra el marco del tamiz. Si las partículas son difíciles de tamizar o cuando está usando tamices finos, tamice ligeramente el material.

En adición, la determinación de la composición granulométrica se basó en la metodología clásica para este tipo de análisis (Andreiev et al, 1980). Se tomaron un total de 8 tamices, con orificios cuadrados. El proceso de tamizado de las muestras se realizó de forma manual siempre realizando un pesaje del retenido en cada tamiz.

Las pruebas de laboratorio fueron realizadas con el objetivo de comprobar que era posible realizar la clasificación neumática de los finos contenidos en la fracción granulométrica menor de 1 mm determinando la respuesta de estos a la fluidización y la eficiencia de su separación desde el mineral que se clasifica en la criba considerándolo un lecho fluidizado estático determinando la velocidad mínima de fluidización y la velocidad de arrastre de esta fracción que permita su extracción y transporte hasta el equipamiento clasificador colector propuesto.

El lecho fluidizado consiste en la aplicación de un fluido en forma ascendente a través del lecho de partículas este puede ser estático o dinámico, en nuestro caso simulamos un lecho estático o fijo pues no se necesita fluidizar todas las partículas sino solamente la fracción menor de 1 mm con el objetivo de separarla del resto del mineral cribado.

Basados en la literatura revisada se utilizó una columna de fluidización experimental consistente en un reactor cilíndrico de acero níquel, (ver figura 1, anexo 1) al cual se le insufló aire en forma ascendente producido por un compresor con un caudal de 500 L/min y una presión máxima de 20 bar, utilizando un sistema de distribución de plato perforado teniendo en cuenta la entrada de flujo por el lado inferior. Este diseño es el más común, económico y fácil de modificar y escalar, y por tanto se utiliza en la gran mayoría de procesos donde se requiere una buena fluidización de las partículas sólidas (Basu, Zhi-Gang., 2013). Las pruebas se realizaron en forma batch durante 10 minutos y en condiciones ambientales.

El reactor de lecho fluidizado utiliza un flujo de gas removible encargado de fluidizar un medio heterogéneo conformado por partículas sólidas. El fenómeno de fluidización que se presenta dentro del reactor (ver figura 2, anexo 2).

Al inicio, con una velocidad baja de gas, el reactor se encuentra con lecho fijo donde las partículas se encuentran asentadas. A medida que se incrementa la velocidad del gas, el lecho comienza a expandirse y a elevarse un poco, iniciando así una mínima fluidización. Aumentando el flujo del gas, las partículas se agitan y se inicia la formación de burbujas; seguidamente las burbujas crecen y se expanden por el reactor suavemente. Finalmente, con una velocidad alta del gas, las partículas de sólido se dispersan y son transportadas por el gas.

La caída de presión a través del lecho de partículas sólidas es una medida del régimen de fluidización en el que se encuentra el sistema. La caída de presión en el lecho fijo aumenta ante el incremento de la velocidad del gas.

La velocidad mínima de fluidización se alcanza en el momento donde la caída de presión comienza a ser constante a lo largo del reactor, obteniendo de esta manera un lecho fluidizado. Las propiedades de las partículas, tales como distribución de tamaño, forma y densidad, son un factor que afecta significativamente la calidad de la fluidización. Por tanto se realiza una clasificación de las partículas, contexto dentro del cual se les da el nombre de partículas de Geldart.

La clasificación de densidad se realiza de la siguiente manera:

Grupo A: Partículas sólidas con un tamaño de partícula pequeño y baja densidad ($<1400 \text{ kg/m}^3$), cuya fluidización se logra con una velocidad baja del gas. Se produce una gran expansión del lecho después que inicia el burbujeo, además se obtiene una excelente mezcla del gas con el sólido.

Grupo B: Sólidos con un tamaño de partícula de $40 \mu\text{m} < d_P < 500 \mu\text{m}$ y una densidad entre ($1400 \text{ kg/m}^3, < \rho_c < 4000 \text{ kg/m}^3$). Estas partículas sólidas fluidizan vigorosamente formando burbujas. La tasa de recirculación de los sólidos es baja y la mezcla del gas con el sólido no es tan alta.

Grupo C: Este grupo incluye partículas muy finas y con altos poderes cohesivos, donde una fluidización es bastante difícil ya que las fuerzas entre las partículas son más fuertes que las resultantes por la acción del gas.

Grupo D: Partículas sólidas largas con alta densidad, las cuales son difíciles de fluidizar. Estas partículas forman burbujas, las cuales colisionan fuertemente entre sí y la fase densa tiene una fracción de vacío baja.

Para la realización de los ensayos de separación neumática se prepararon por duplicado las fracciones de tamaño D_1, D_2, D_3 y D_4 correspondientes a los monotamaños de 1.0 a 0.4 mm, 0.4 a 0.25 mm, 0.25 a 0.18 mm y la fracción menor de 0.18 mm para determinar la velocidad mínima de fluidización y las curvas de elutriación.

Los ensayos se realizaron en un equipo experimental consistente en un reactor cilíndrico de 10 cm de diámetro interno y 140 cm de altura al cual se le insufló aire en forma ascendente producido por un compresor con un caudal de 500 L/min y una presión máxima de 20 bar en forma batch durante 10 minutos y en condiciones ambientales. Al concluir este proceso, en las muestras analizadas se determinó para las clases granulométricas desde 1 mm hasta 0.02 mm, los valores de peso en g y los valores porcentuales para cada fracción analizada.

2.2 Procesamiento estadístico y análisis de los resultados

Para el procesamiento estadístico de los datos y la confección de tablas y gráficos se empleó el software Microsoft Excel 2017. Se utilizó la estadística descriptiva para analizar peso específico para cada fracción granulométrica, utilizándose la media como medida de tendencia central.

2.3 Métodos de investigación

Para el desarrollo de la investigación fue necesario el empleo de varios métodos. En el orden teórico se utilizó el método histórico-lógico para el análisis de la evolución de la zeolita, así como los métodos inductivo-deductivos, para diagnosticar el estado actual de la producción de zeolita en Cuba.

Además se empleó el método de análisis y síntesis para realizar reflexiones de manera lógica sobre el problema que se investiga, interpretar el procesamiento de la información obtenida a partir de la revisión de la literatura y documentación especializada sobre la separación neumática. Como métodos empíricos se empleó la observación directa y la revisión documental, para la recopilación de la información. En adición, se utilizaron como métodos estadísticos en el procesamiento de la información, la estadística descriptiva.

2. 4 Conclusiones parciales

Se analizó la muestra de zeolita proveniente desde la mena para luego ser sometida a la reducción de tamaño aplicándose el método por puntos.

En la fase experimental se utilizó un reactor cilíndrico aplicando la clasificación de partículas llamado partículas de Geldart en los grupos, A, B, C, D

Se empleó la estadística descriptiva para analizar peso específico para cada fracción granulométrica, utilizándose la media como medida de tendencia central.

CAPITULO 3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Resultados de los ensayos

Se realizaron pruebas experimentales con cada tamaño de partícula y variando la velocidad del gas hasta encontrar el punto de fluidización o velocidad mínima de fluidización para cada rango granulométrico cuyos resultados promedios se muestran a continuación.

Tabla 3 :Velocidad mínima de fluidización

Fracción	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
V _{mf} (cm/seg)	30	24	18	15

Determinar la velocidad máxima con la cual el 100 % de estas son arrastradas fuera de la torre de ensayos lo que se muestra en la (tabla 4).

Tabla 4 : Velocidad máxima de fluidización.

Velocidad (cm/seg)	D ₁	D ₂	D ₃	D ₄
10	0	0	0	0
20	0	5	50	80
30	5	80	90	100
40	80	100	100	
50	100			

A partir de estos resultados para cada clase granulométrica se continuó aumentando la velocidad del gas con el objetivo de elaborar la curva de elutriación (ver figura 2) Las partículas finas fueron elutriadas en todas las muestras ensayadas.

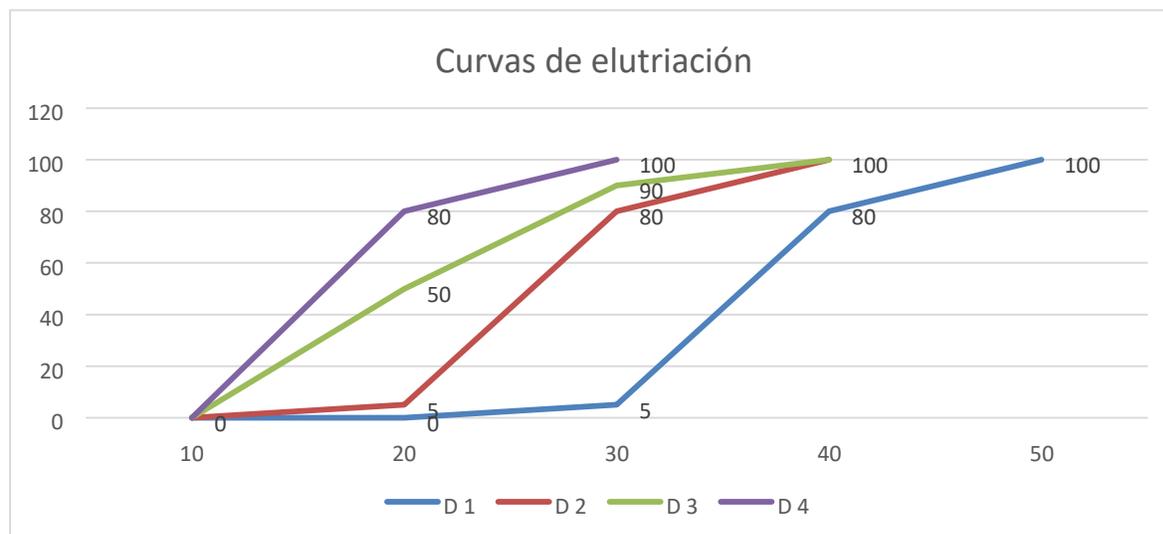


Figura 2. Curva de elutriación

3.1 Resultados de la aplicación del método de clasificación neumática en la muestra estudiada

El producto tiene contenidos significativos de fracciones importantes para diversos usos y la necesidad de lograr la separación por fracciones para obtener productos de alto valor para su empleo en diferentes ramas de la economía, sustituir importaciones e incluso crear productos exportables. Por ejemplo tiene por debajo de 50 mm (50 micras, tamiz 325 μ m) un rendimiento de 30 %. Esta fracción que constituye un micronizado de zeolita, se pudiera obtener después de secado el mineral fino, por medio de clasificación neumática, sin necesidad de los costosos equipos de micronización. La fracción - 1,0 + 0,4 mm tiene un rendimiento superior al 23 %, la misma tiene posibilidades de exportación como lecho para filtros de agua domésticos (ver tabla 5)

Tabla 5 : Análisis granulométrico

	Análisis Granulométrico (mm)	Peso (%)	Peso (%) Acu.
1	+ 1,0	2,19	2,19
2	- 1 + 0,8	4,81	7,00
3	- 0,8 + 0,6	6,80	13,80
4	- 0,6 + 0,5	4,10	17,90
5	- 0,5 + 0,4	5,70	23,60
6	- 0,4 + 0,3	6,40	30,00
7	- 0,3 + 0,2	9,00	39,00
8	-0,2 + 0,1	15,53	54,53
9	- 0,1 + 0,05	15,47	70,00
10	-0,05 + 0,02	6,50	76,50
11	- 0,02	23,50	100,00
TOTAL		100,00	

Conociendo las dificultades que presenta el cribado de minerales por vía seca a partir de tamaños de 1.0 mm y la imposibilidad de utilizar la clasificación húmeda por los requerimientos de los productos a obtener y el alto costo del secado indirecto se realizó la propuesta y valoración de la clasificación neumática avalados por los resultados experimentales

Ensayos de Clasificación neumática en el equipamiento industrial

Aprovechando el equipamiento tecnológico de criba, ciclón, filtro manga, ventilador (ver figura 3) que existente en la entidad para el sistema de despolveración se utilizó para la clasificación para corroborar los resultados en los ensayos experimentales, se realizaron un total de 5 ensayos en los cuales se modificó solamente el caudal de aire variando la abertura del Dámper del ventilador lo que propicia el cambio de velocidad del flujo de gas y se realizó un análisis granulométrico a las arenas del ciclón y al mineral por debajo de 1 mm que sale de la criba (ver tabla 6).

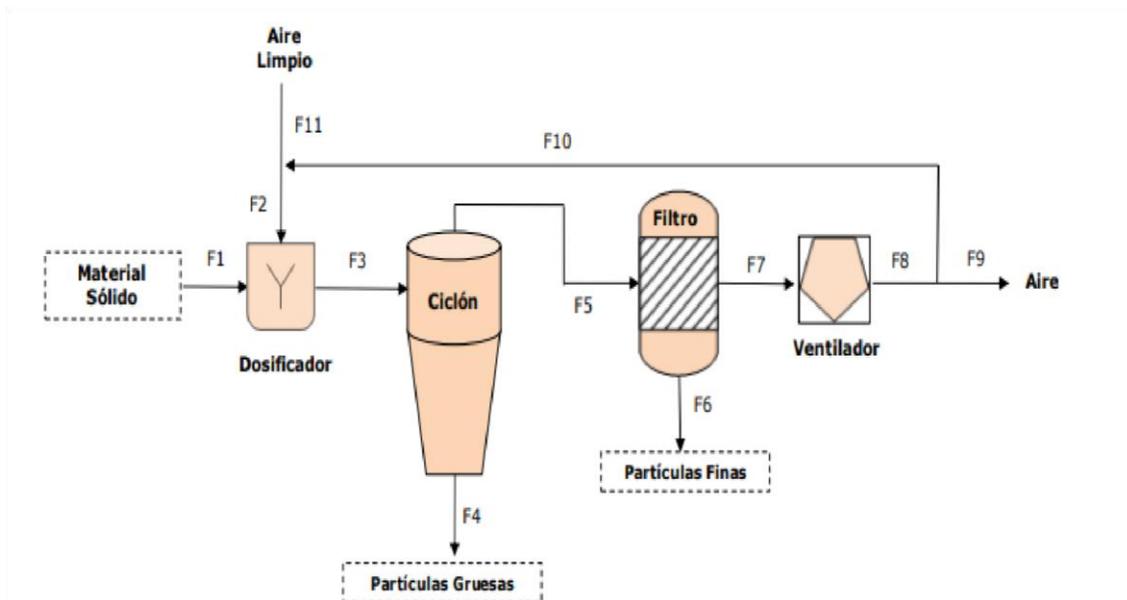


Figura 3. Diagrama tecnológico de un circuito de ciclón, criba, filtro manga, ventilador

Tabla 6 :Resultados del análisis de tamices

Posición Dámper	% + 1.0mm	% -1.0+0.6 mm	% -0.6+0.4 mm	% -0.4 mm
1	0	20.4	12.6	67.0
2	0	28.6	14.2	57.2
3	0	35.3	16.8	48.7
4	0	42.8	20.3	36.9
5	0	50.4	25.0	24.6

Como se puede apreciar en las (tablas 6 y 7) con el aumento del caudal de aire comienza a disminuir la cantidad de la fracción menor de 0.4 mm en el mineral de la criba lográndose con la posición 5 del Dámper un producto con más de 75 % de la fracción entre 1.0 y 0.4 mm valores que pueden mejorarse con algunos ajustes en el equipamiento existente.

Tabla 7: Resultados del análisis de tamices

Posición Dámper	% + 1.0mm	% -1.0+0.6 mm	% -0.6+0.4 mm	% -0.4 mm
1	0	0.2	0.8	99.0
2	0	0.2	1.0	98.8
3	0	0.4	1.0	98.6
4	0	0.6	1.2	98.2
5	0	0.8	1.2	98.0

En cuanto a los resultados obtenidos en los análisis de tamices se hizo una evaluación de cada clase granulométrica aplicando el diagrama de Pareto lo que deja más claro qué aspectos deben resolverse primero, el 80% de las consecuencias son el resultado del 20% de las causas. Este tiene como objetivo separar los pocos vitales de los muchos triviales donde se separa la clase que tiene la mayor representatividad. Se ordenaron desde los que tienen mayor fracción hasta la menor, se obtiene el porciento de las fracciones para luego hallar el acumulado y su porciento acumulado para cada clase.

Tabla 8: Resultados de la clase granulométrica.

Posición Dámper	%+1,0 mm	% - 1.0+0.6 mm	%	Acumulado	%Acumulado
5	0	0.8	0.3636364	0.8	36%
4	0	0.6	0.2727273	1.4	64%
3	0	0.4	0.1818182	1.8	82%
2	0	0.2	0.0909091	2	91%
1	0	0.2	0.0909091	2.2	100%
total	0	2.2	100%		

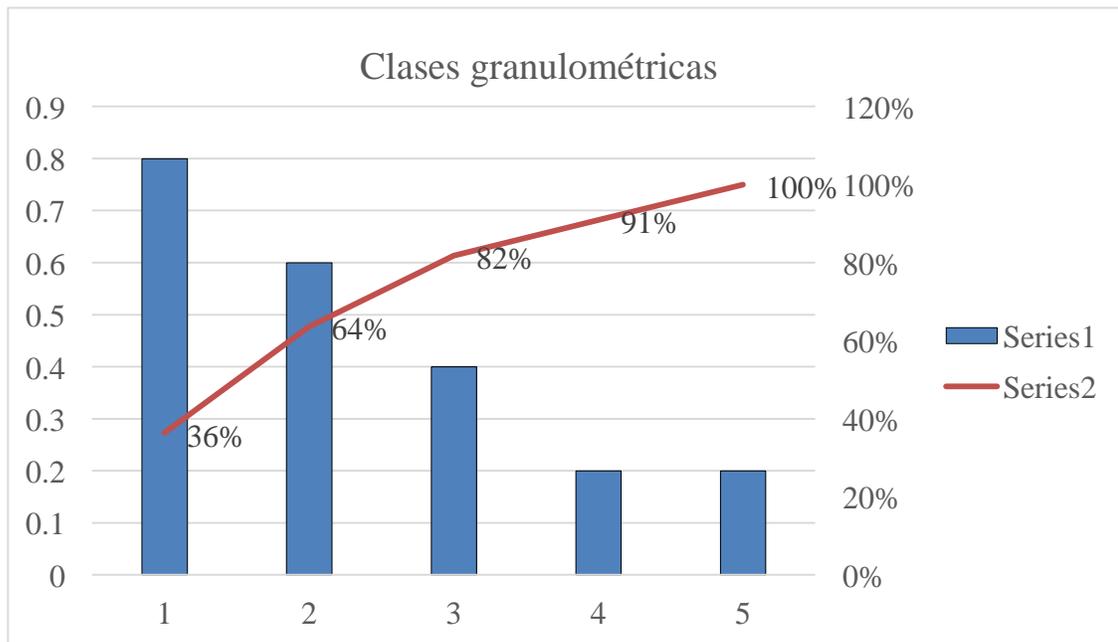


Figura 4. Evaluación de la clase de % -1+0,6 mm

Tabla 9:: Resultados de la clase granulométrica

Posición Dámper	%- 0.6+0.4 mm	%	Acumulado	%Acumulado
5	1.2	0.2307692	1.2	23%
4	1.2	0.2307692	2.4	46%
3	1	0.1923077	3.4	65%
2	1	0.1923077	4.4	85%
1	0.8	0.1538462	5.2	100%
total	5.2	100%		

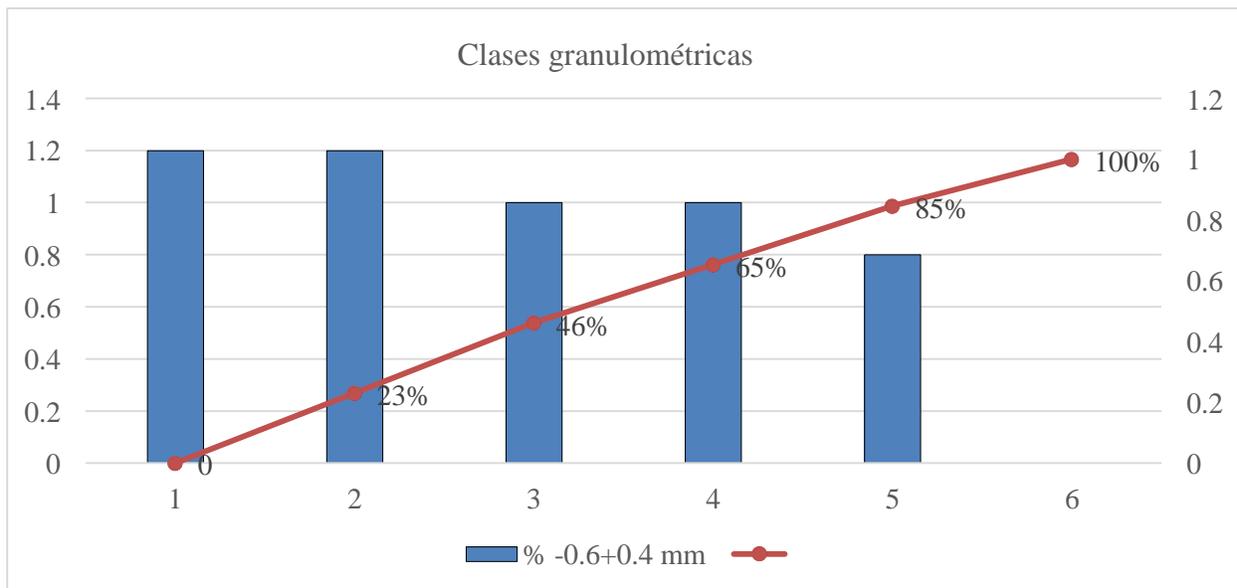


Figura 5. Evaluación de la clase % -0,6+0,4 mm

Tabla 10: Resultados de la clase granulométrica

Posición Dámper	% -0.4 mm	%	Acumulado	%Acumulado
5	99	19.038462	99	1904%
4	98.8	19	197.8	3804%
3	98.6	18.961538	296.4	5700%
2	98.2	18.884615	394.6	7588%
1	98	18.846154	492.6	9473%
total	492.6	100%		

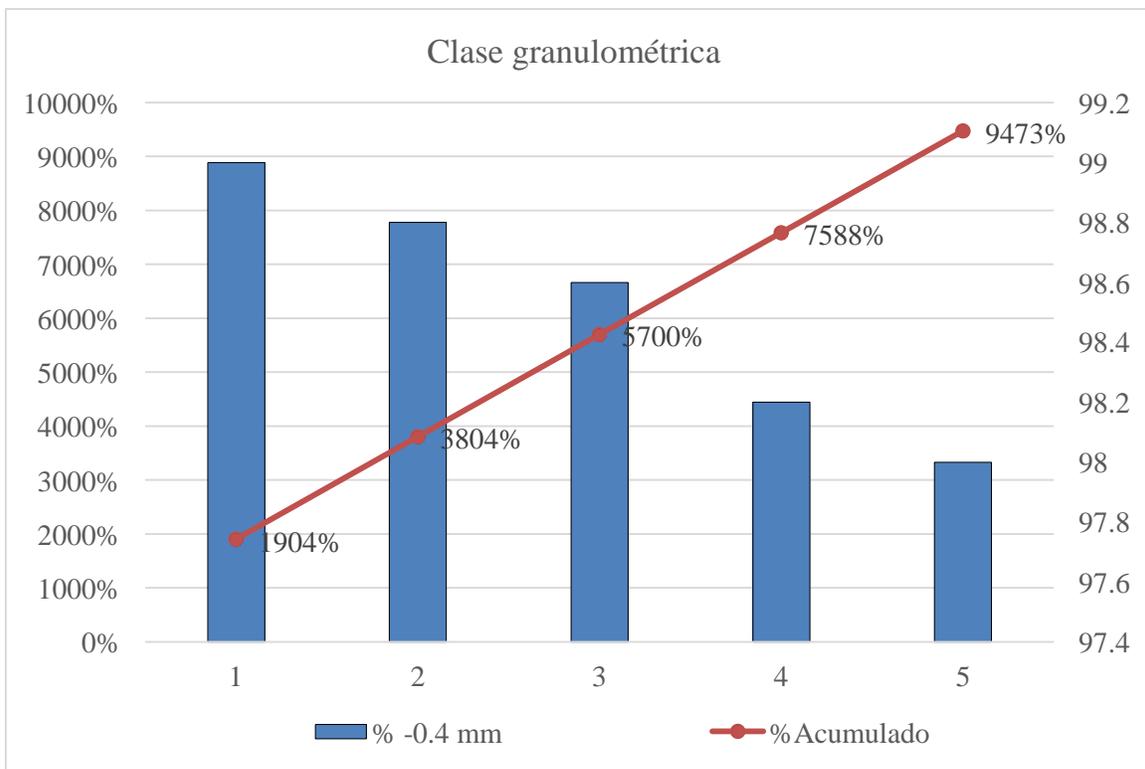


Figura 6.: Evaluación de la clase % -0,4 mm

Tabla 11: Resultados de la clase granulométrica

Posición Dámper	% + 1.0mm	% - 1.0+0.6 mm	%	Acumulado	%Acumulado
5	0	50.4	0.28394366	50.4	28%
4	0	42.8	0.24112676	93.2	53%
3	0	35.3	0.19887324	128.5	72%
2	0	28.6	0.16112676	157.1	89%
1	0	20.4	0.11492958	177.5	100%
		177,5	100,00%		

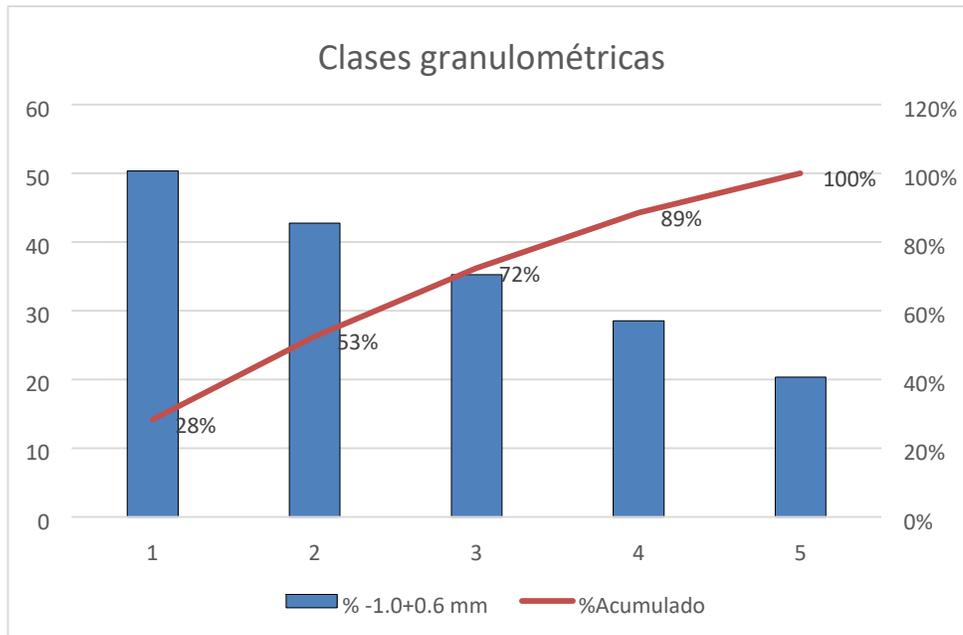


Figura 7. Evaluación de la clase de % -1+0,6 mm

Tabla12 : Resultados de la clase granulométrico

Posición Dámper	% - 0.6+0.4 mm	%	Acumulado	%Acumulado
5	12.6	0.0709859	12.6	7%
4	14.2	0.08	26.8	15%
3	16.8	0.0946479	43.6	25%
2	20.3	0.1143662	63.9	36%
1	25	0.1408451	88.9	50%
	88.9	100,0%		

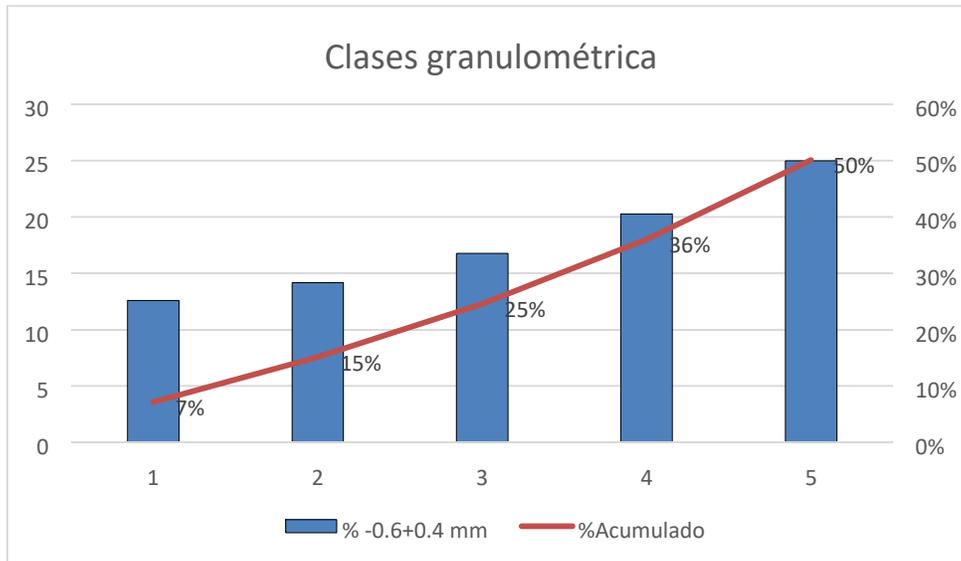


Figura 8. Evaluación de la clase % -0,6+0,4 mm

Tabla13 : Resultados de la clase granulométrico

Posición Dámper	% -0.4 mm	%	Acumulado	%Acumulado
5	67	0.377464789	67	38%
4	57.2	0.322253521	124.2	70%
3	48.7	0.274366197	172.9	97%
2	36.9	0.207887324	209.8	118%
1	24.6	0.138591549	234.4	132%
	234.4	100,0%		

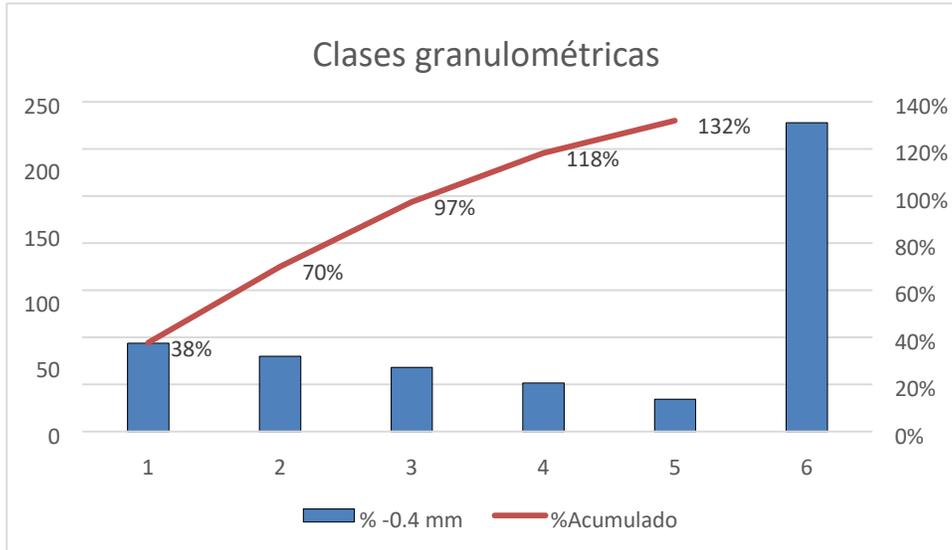


Figura 9. Evaluación de la clase % -0,4 mm

3.2 Estimación económica

Se realizó la evaluación económica, comparándose los resultados actuales y los proyectados en cuanto a ingresos, costos, beneficios y relación beneficio/costo. Se calcularon los ingresos teniendo en cuenta los rendimientos actuales y un incremento productivo estimado del 20%, según precio de la zeolita de 20€/t aplicando la tasa de cambio oficial para personas jurídicas.

Los gastos se determinaron a partir de la revisión del registro de las partidas de gastos en el sistema contable de la organización estudiada. Como principales partidas de gastos se consideraron: gastos de salario, que incluye salario escala más 9.09% por concepto de acumulado de vacaciones, gastos por impuestos y contribuciones, gastos de administración, gastos de materias primas y materiales y gastos portuarios. Una vez determinados los ingresos, costos y beneficios actuales y futuros se determinó la relación beneficio/costo (ver figura 10 y anexo 3)

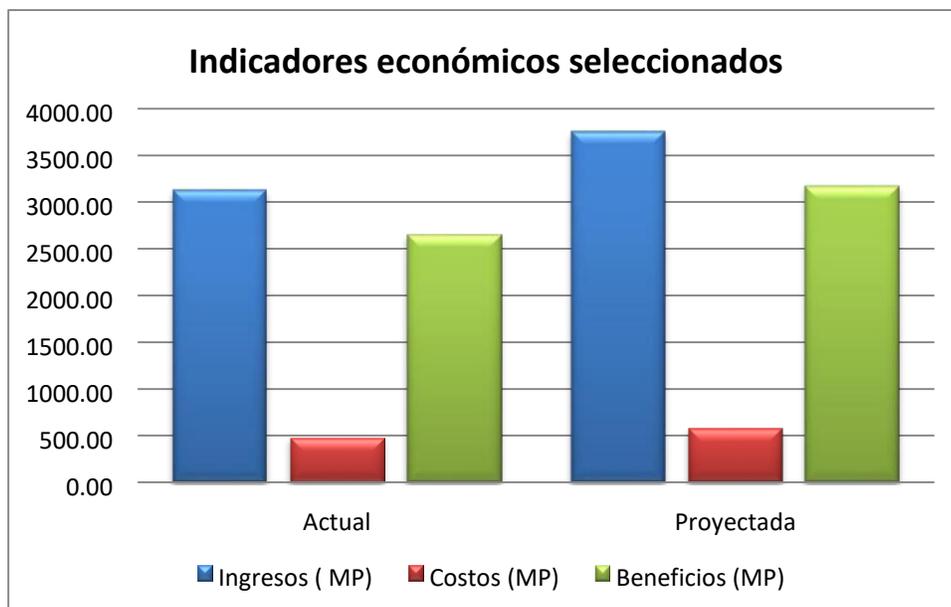


Figura 10. Indicadores económicos seleccionados. Ingresos, costos y beneficios

Al respecto, los ingresos proyectados para la alternativa propuesta ascienden a 3749.07 MP, superiores en 624.84 MP a los ingresos actuales. Asimismo los costos proyectados ascienden hasta 575.88 MP, superiores en 95.98 MP a los actuales, lo cual se asocia con el incremento esperado del nivel de actividad en un 20%. En consecuencia, los beneficios esperados ascienden a 3173.19 MP, superiores en 528.26 CUP a los actuales. Asimismo, la relación beneficio costo es de 5.51

para la alternativa evaluada, lo cual indica que por cada peso invertido, se generaran 5.51 pesos de beneficios o utilidad.

De lo anterior destaca que la alternativa propuesta impacta favorablemente en los resultados económicos de este sistema productivo, lo cual influye de manera positiva en los resultados económico-financieros de la organización.

3.3 Conclusiones parciales

Se obtuvieron los resultados deseados en la prueba experimental con cada tamaño de partícula y variando la velocidad del gas hasta encontrar el punto de fluidización o velocidad mínima de fluidización para cada rango granulométrico.

Se creó una curva de elutriación con el aumento del caudal del aire a partir de aquí se crearon las gráficas de Pareto con el objetivo de separar la clase que tiene mayor representatividad.

Se realizó la evaluación económica, comparándose los resultados actuales y los proyectados en cuanto a ingresos, costos, beneficios y relación beneficio/costo.

Conclusiones generales

1. Las partículas finas menores de 1.0 mm son elutriadas en todas las muestras ensayadas.
2. El arrastre de las partículas finas aumentó con la velocidad del flujo de aire alcanzándose el 100% para una velocidad de 50 cm/seg para la granulometría más gruesa.
3. Los ensayos validan la alternativa de separar las partículas menores de 1.0 mm desde la criba vibratoria por medio de un flujo de aire ascendente.
4. La separación neumática en la extracción de finos, para la obtención de las granulometrías de interés comercial.

Recomendaciones

1. Continuar con la aplicación del método de clasificación neumática en fracciones finas de estrecho rango del mineral zeolita en la UEB Geominera Holguín y trabajar para su implementación en un futuro
2. Desarrollar estudios para la evaluación de otra alternativa tecnológica con el objetivo de garantizar la calidad de producción y la sustentabilidad del sistema actual
3. Socializar los resultados del trabajo mediante publicaciones en revistas y eventos científicos, así como en actividades de capacitación sobre la temática, lo cual contribuirá al proceso de extensión de los resultados a otras formas productivas del territorio
4. Incorporar los resultados de la investigación a la enseñanza de pregrado y posgrado, así como a la actividad investigativa, de forma tal que pueda servir de base para otras investigaciones que se decidan realizar en este campo

Referencias bibliográficas

1. Norma cubana. NC 627: 2014. Zeolitas Naturales. Preparación de muestras para ensayos de laboratorio.
2. Andreiev, S. E., Perov, V. A. & Zverievich, V. V. 1980. Trituración, Desmenuzamiento y Cribado de Minerales. Editorial Mir, Moscú
3. Blanco, E. 2011. Tecnología Mineralógica. Bloque II. Capítulo 9. Clasificación.
4. Días Días, T. (2021). Cuba por Incrementar la producción de fertilizantes zeolítico. Prensa Latina Ciencia y Tecnología disponible <http://www.cuba.cu>
5. Falcón, J.; Echavarría, T; Quintana, J. & Vázquez, Y. 2000: Estudio de la clasificación de partículas en condiciones trifásicas. Tecnología Química 20(2): 17.
6. Flores, S.; Romero, A. & Martínez, D. 2009: Tecnología de clasificación fina de mineral metálico y no metálico. Revista de la Facultad de Ingeniería Industrial 12(1): 27-31.
7. Geominsal 2023. Zeolitas. Disponible en: <http://www.geominsal.cu>
8. Milioli, F.E., Foster, P.J., —Entrainment and Elutriation Modelling in Bubbling Fluidized Beds, Powder Technology 83(3), 233-244. 1995
9. Mordor inteligent (2023).
10. Norma cubana. NC 631: 2014 Minerales □ Análisis granulométrico por tamizado □ requisitos generales
11. Pavlov, K. F. 1981: Problemas y ejemplos para el curso de operaciones básicas y aparatos en tecnología química. Moscú, MIR. 340 p.
12. Perry. 1984: “Perry’s Chemical Engineers’ Handbook”. New York, McGraw-Hill. 6th Ed.
13. Richardson, J.F., Zaki, W.N., —Sedimentation and Fluidization, Part I., Transactions of the Institution of Chemical Engineers. Inst. Chem. Eng., 32, 35–53. 1954.
14. Santana, D. J. 1999: Simulación y experimentación de un generador de partículas usando un lecho fluidizado. Resumen Tesis Doctoral. España.

15. Tapia, J. M. 2004: Separación Neumática de Finos desde Corrientes de Mineral Chancado. Tesis Doctoral. Universidad de Chile.
16. Tapia, J.M. 2006 Separación neumática de Finos de corrientes de Mineral Chancado. Revista información Tecnológica, 17(6):157-164 disponible en : <http://scielo.es//scielophp>
17. Toomey, R.D., Johns tone, H.F, —Gaseous Fluidization of Solid Particlesl, Chem. Eng. Progress, 48, 220. 1952.
18. Wen, C. Y., Yu, Y.H., —A Generalized Method for Predicting Minimum Fluidization Velocityll, AIChE Journal, 12, 610. 1966.
19. Wills, B. A. & Napier-Munn, T. 2006. Mineral Processing Technology. An Introduction to the Practical Aspects of Ore Treatment and Mineral Recovery. 7th Edition ed. s.l.: Elsevier Science & Technology Books.
20. Wood Ford, 2009 Mejías Rodríguez, Separación Neumática de Finos.
21. Rizo Beira, R., M. Moreira, J.C. Romero, M. Ortega, M. García. (1998) Informe sobre los trabajos de exploración orientativa y detallada de zeolita en el sector Loma Blanca del yacimiento San Andrés provincia Holguín escala 1: 1000.
22. NC 625: 2019 Zeolita Natural- Requisitos de Calidad.
23. Neumática. Ventajas e inconvenientes. (s.f). Recuperado 6 de noviembre de 2020, de <http://tecnologiapiroreos.blogspot.com/2013/01/neumatica-ventajas-e-inconvenientes.html>
24. E.(2019, 4 octubre).Circuito neumático .Recuperado 6 de noviembre de 2020, de <https://entaban.es/blog/post/115-circuito-neumatico>
25. Xu, R., Pang, W., Yu, J., Huo, Q., & Chen, J. (2007). Chemistry of Zeolites and Related Porous Materials. Chemistry of Zeolites and Related Porous Materials: Synthesis and Structure Ruren (Vol. 4). <https://doi.org/10.1002/9780470822371>
26. Dey, K. P., Ghosh, S., & Naskar, M. K. (2013).Organic template-free synthesis of ZSM-5 zeolite particles using rice husk ash as silica source. Ceramics International, 39(2), 2153–2157. <https://doi.org/10.1016/j.ceramint.2012.07.083>

27. Burkett, S. L., & Davis, M. E. (1995). Mechanisms of Structure Direction in the Synthesis of PureSilica Zeolites. 1. Synthesis of TPA/Si-ZSM-5. *Chemistry of Materials*, 7(5), 920– 928. <https://doi.org/10.1021/cm00053a017>
28. Kulkarni, S. B., Shiralkar, V. P., Kotasthane, A. N., & Borade, R. B. (1982). Studies in the synthesis of ZSM-5 zeolites, 2(April), 313–318.
29. Moshoeshoe, M., Nadiye-Tabbiruka, M. S., & Obuseng, V. (2017). A review of the Chemistry, Structure, Properties and Applications of Zeolites. *American Journal of Materials Science*. <https://doi.org/10.5923/j.materials.20170705.12>
30. Auerbach, S., Carrado, K., & Dutta, P. (2010). Handbook of Zeolite Science and Technology. Handbook of Zeolite Science and Technology. <https://doi.org/10.1201/9780203911167>
31. Jha, B., & Singh, D. N. (2016). Fly Ash Zeolites. <https://doi.org/10.1007/978-981-10-1404-8>
32. Kokotailo, G. T., Lawton, S. L., Olson, D. H., & Meier, W. M. (1978). Structure of synthetic zeolite ZSM-5. *Nature*. <https://doi.org/10.1038/272437a0>
33. Liu, C., Go, W., Kong, D., & Go, H. (2014). The significant effects of the alkali-metal cations on ZSM-5 zeolite synthesis: From mechanism to morphology. *Microporous and Mesoporous Materials*, 183, 30–36. <https://doi.org/10.1016/j.micromeso.2013.08.037>
34. Benvindo da Luz, A. (1995). Zeolitas: Propiedades e usos industriales. Serie tecnología mineral N° 68. CETEM - CNPQ Río de Janeiro. 35 p.
35. Bosch, P. y Shifter, I. (1997). La zeolita una piedra que hierve. Fondo de Cultura Económica de México. 73 p
36. Castellanos, J. y Soca, M. (2002). Zeolita, contribución al desarrollo sostenible. Curso internacional de zeolita y sus aplicaciones. Ecuador. 10 p
37. Febles, J., Escobar, L. y Carreau, J. (2007). Empleo de la zeolita natural en el tratamiento de residuales orgánicos. Segunda Convención-Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2007. 8 p.
38. Gottardi, G. (1989). The genesis of zeolites. *Eur. J. Mineral.* 1,4. pp. 477-487.
39. Jordán, R., Rodríguez-Fuentes, G. y Rodríguez, Y. (2007). Aportes de la zeolita (ClinoptilolitaHeulandita) del yacimiento "Tasajeras" a la química de los vidrios sódicos cálcicos. Segunda Convención-Cubana de Ciencias de la Tierra. Geociencias 2007. 10 p

40. Lobo, R. F. (2003). Introduction to the structural chemistry of zeolites. En: Handbook of Zeolite science and technology. pp. 65-89
41. Benvenga, José (1990). “Concentración de Moscovita – Biotita por el Ciclón Neumático a partir de la Mena Esquisto – Micácea del Páramo Peñas Blancas. Estado Mérida”. Departamento de Minas, Universidad Central de Venezuela. T.E.G. 92 pp.
42. WILLS, B.A. (1997). Mineral Processing Technology. 6th Edition. Butterworth Heinemann Edition. Oxford. 486 pp.
43. C.I. Paulo * a, M.S. Diaz b, M.R. Barbosa a Facultad de Ingeniería, CIFICEN, Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires, Av. Del Valle 5737 Olavarría (7400), Argentina. b Planta Piloto de Ingeniería Química (PLAPIQUI) - Universidad Nacional del Sur, Camino de La Carrindanga km. 7 Bahía Blanca (8000), Argentina. E-mail (cecipaulo@gmail.com
44. Diseño y optimización de un sistema ciclón-filtro para desempolvado de ambientes industriales. Elortegui y M. R. Barbosa Facultad de Ingeniería. Universidad Nacional del Centro de la Provincia de Buenos Aires. Avda. A. del Valle 5737. 7400 – Olavarría. Argentina. E-mail: elorteguiignacio@gmail.com,

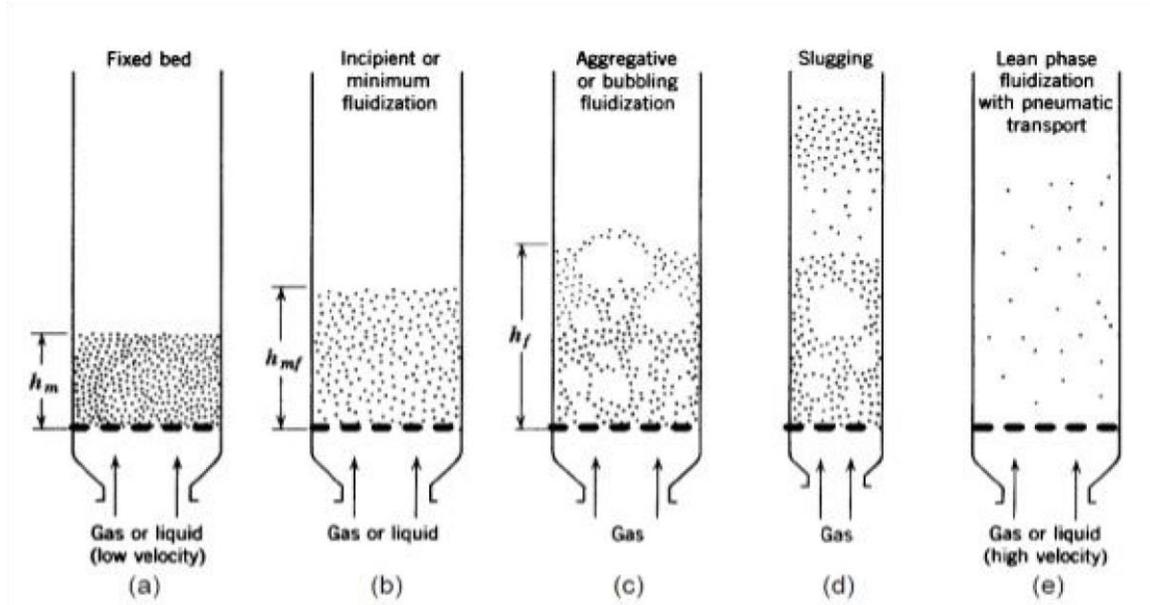
ANEXO 1

Reactor cilíndrico



ANEXO 2

Reactor de lecho fluidizado con diferentes formas de contacto entre el sólido y la fase fluidizante (Kunii, D., Levenspiel, O., 1991).



ANEXO 3

Tabla 11. Resultados económicos del sistema productivo

Alternativas	Actual	Proyectada
Rendimiento (t/a)	6000.00	7200.00
Precio (CUP/t)	520.70	520.70
Ingresos (CUP)	3124224.00	3749068.80
Salario (CUP)	15240.00	18288.00
Acumulado vacaciones 9.09% (CUP)	1385.32	1662.38
Salario complementario (CUP)	16625.32	19950.38
Contribución Seguridad Social 12.5% (CUP)	1995.04	2394.05
Provisión Seguridad Social Corto Plazo 1.5% (CUP)	249.38	299.26
Impuesto por utilización de la fuerza de trabajo 5 % (CUP)	831.27	997.52
Total impuestos y contribuciones (CUP)	3075.68	3690.82
Gastos de administración (CUP)	4500.00	5400.00
Gastos de materias primas y materiales (CUP)	256980.00	308376.00
Gastos portuarios (CUP)	198720.00	238464.00
Costos totales (CUP)	479901.00	575881.20
Estado de resultado en MP		
Alternativas	Actual	Proyectada
Ingresos (MP)	3124.22	3749.07
Costos (MP)	479.90	575.88
Beneficios (MP)	2644.32	3173.19
Relación beneficio/costo	5.51	5.51

ANEXO 4

Diagrama tecnológico de la planta de zeolita en la UEB Geominera Holguín.

