



Ministerio de la Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia-Química

SECADO DE SULFURO DE NÍQUEL Y COBALTO CON AIRE DESHUMIDIFICADO

**Trabajo de diploma en opción al título de ingeniero
en Metalurgia y Materiales**

Jean Baptiste Koffi Kadjo

**Moa,
2014**



Ministerio de la Educación Superior
Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia-Química

SECADO DE SULFURO DE NÍQUEL Y COBALTO CON AIRE DESHUMIDIFICADO

**Trabajo de diploma en opción al título de ingeniero
en Metalurgia y Materiales**

Autor: Jean Baptiste Koffi Kadjo

**Tutores: Prof.Aux.ing. Amaury Palacios Rodríguez,
Dr.C.**

Ing. Omar Lobaina Oduardo

Moa,

2014

Declaración de autoridad

Jean Baptiste Koffi Kadjo, autor de este trabajo de diploma titulado: “Secado de sulfuro mixto de níquel y cobalto con aire deshumidificado” certifico su propiedad intelectual a favor del instituto superior minero metalúrgico de Moa “Dr. Antonio Nuñez Jiménez” el cual podrá hacer uso del mismo para fines docentes, e investigativo.

Pensamiento

Si buscas resultados distintos, no hagas siempre lo mismo."

"Quien nunca ha cometido un error nunca ha probado algo nuevo."

"La formulación de un problema, es más importante que su solución."

"Hay dos formas de ver la vida: una es creer que no existen milagros, la otra es creer que todo es un milagro."

El que no posee el don de maravillarse ni de entusiasmarse más le valdría estar muerto, porque sus ojos están cerrados."

Albert Einstein.

Agradecimientos

- *Agradezco a Dios por su misericordia y por su paciencia y fidelidad.*
- *Agradezco a la revolución Cubana, al comandante Fidel Castro Ruz y al comandante Raúl Castro Ruz.*
- *Agradezco a mi pastor Bedel, su esposa y sus hijos.*
- *Agradezco a mi familia por su ayuda y sus bendiciones.*
- *Agradezco a mis tutores, Amaury de Los Milagros Palacios Rodríguez y Omar Lobaina Oduardo, y a la profesora Evangelia García Peña.*
- *Un agradecimiento especial a mis profesores y al profesor Yoalvys de la facultad de mecánica que por sus esfuerzos y por su ayuda hoy pude realizar este trabajo.*
- *Agradezco a todos mis compañeros de clase por todos los tiempos buenos que hemos pasado. Aunque no lo crean han sido mi familia cercana durante todos los cinco años que he pasado.*
- *Un agradecimiento especial a mis compañeros extranjeros en general y en particular: Helio Dos Santos, Helder Vemba Mukuta, Isaya Faustin Kapela, Boubacar Yanangoré, Arsene levy Keya, Fabian Ojeda y a Louis dos Santos.*
- *Agradezco a Lorena y a su mamá Marta de Punta Porda.*

Dedicatoria

Este trabajo está dedicado primeramente a Dios y a su hijo amado Jesús-Cristo, a la Revolución Cubana por haberme otorgado esta beca para cumplir con mi sueño.

Por haberme cuidado durante éstos años, le estoy muy agradecido.

A mis tíos Kossi Kan Daniel y Kassi Djassi Roger por sus apoyos incondicional.

A mi pastor Bedel por sus oraciones y por su apoyo.

Resumen

La presente investigación tuvo como propósito determinar la influencia de la carga de zeolita (Cz), y de sulfuro de níquel y cobalto (Cs), granulometría de la zeolita (G) y el flujo de aire (F) en el proceso de secado con aire deshumidificado del sulfuro mixto, proveniente de la empresa comandante Ernesto Che Guevara, debido a que existe poco conocimiento de cómo éstas variables intervienen en el proceso. La experimentación se realizó a escala de laboratorio donde se utilizó un secador rotatorio de sulfuro mixto de níquel y cobalto y un sistema de deshumidificación de aire atmosférico con zeolita natural. Los resultados fueron procesados empleando el software profesional Statgraphics CENTURION. En las condiciones de estudio las variables de entrada tuvieron tendencias negativas, es decir, con el incremento de éstas disminuyó la humedad extraída de sulfuro mixto hacia el aire deshumidificado. Se comprobó que las variables carga de sulfuro (Cs), flujo de aire (F) y la interacción entre la granulometría y el flujo de aire (CsF) son las más significativas. El modelo estadístico obtenido: $He = 38,434 - 4,662 \cdot CS - 2,376 \cdot G - 1,091 \cdot F + 0,119 \cdot G \cdot F$ evidencia la influencia paramétrica de estudio, además se demostró que el proceso de secado de los sulfuros mixto secado con aire comprimido deshumidificado con zeolita natural ocurre en un período de tiempo inferior al actual realizado en la empresa Ernesto Che Guevara.

Palabras claves

Aire, cobalto, contaminación, deshumidificación, humedad, níquel, proceso de secado, sulfuro, zeolita.

Summary

The present investigation has the purpose of determining the influence of the zeolite load (Cz), and of sulfurate of nickel and cobalt (Cs), grain the zeolite (G) and the flow of air (F) in the drying process with air dehumidified of the mixed sulfurate, coming from the Comandante Ernesto Che Guevara Enterprise, because very little knowledge of this topic exists as of how these variables intervene in the process. The experimentation was carried out on a bank scale where a rotational dryer was used with mixed sulfurate of nickel and cobalt and a system of dehumidification of atmospheric air with natural zeolite. The results were processed using the professional software, Statgraphics CENTURION. Under the study conditions the entrance variables had negative tendencies, it's to say, with the increment of these the extracted humidity of a sulfurate mixed toward the air dehumidified is decreased. It was proven that the variable load of a sulfurate (Cs), flow of air (F) and the interaction between the particle dimension and the flow of air (CsF) they are the most significant. The obtained statistical pattern: $He = 38,434 - 4,662 \cdot CS - 2,376 \cdot G - 1,091 \cdot F + 0,119 \cdot G \cdot F$

is evidence that the parametric influence of study demonstrated also that the process of drying of the mixed sulfurate of drying with air atmospheric dehumidified with natural zeolite happens in an inferior period of time to the current one carried out in the Ernesto Che Guevara Enterprise.

Key words

Air, cobalt, contamination, dehumidification, humidity, nickel, drying process, sulfurate, zeolite.

Índice	pág.
Introducción	1
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE DEL PROCESO	4
DE SECADO DE MATERIALES	4
1.1 Revisión bibliográfica	4
1.1.1 Mecanismo de secado	4
1.1.2 Proceso de secado	5
1.1.3 Secado en atmósfera inerte	6
1.1.4 Secado estático con recirculación de aire caliente	6
1.1.5 Secado a presión reducida	7
1.1.6 Secado indirecto	8
1.1.7 Secado de minerales lateríticos	9
1.1.8 Oxidación de los sulfuros	9
1.1.9 Zeolitas naturales	10
1.1.9.1 Costo de las zeolitas	11
1.1.9.2 Zeolita del yacimiento de Caimanes	11
1.1.9.3 Estudio de la zeolita como agente adsorbedor y absorbedor	11
1.2 Teoría sobre el proceso de secado	12
1.2.1 Clasificación de los métodos de secado según el método de suministro del calor	13
1.2.2 Parámetros de Materiales Mojados	13
1.3 Equilibrio en el contenido de humedad	14
1.3.8 Movimiento de la humedad dentro del sólido	14
1.4 Mecanismos y cinética de secado	15
1.4.1 Curvas de régimen de secado	16
1.4.2 Tiempo de secado	17
1.5 Los procesos fundamentales que ocurren durante el proceso de secado	18
Conclusión del capítulo 1	18
CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS	19
2.1 Materiales	19
2.2 Equipos y Utensilios	21
2.4 Metodologías y Métodos	24
2.4.1 Método histórico	24
2.4.2 Método de la modelación estadística - matemática	24

2.4.3 Método empírico	25
2.4.4 Método del Diseño de experimento	25
2.4.5 Metodología para el muestreo del sulfuro de níquel más cobalto húmedo	27
2.4.6 Metodología para el muestreo y preparación de la zeolita	28
2.4.7 Metodología para la determinación de la humedad extraída	29
2.4.8 Metodología para la determinación del poder de absorción de agua y adsorción de humedad de la zeolita natural de caimanes	30
2.4.8.1 Capacidad de absorción de la toba zeolitizada	30
2.4.8.2 Determinación del poder de adsorción	30
2.4.9 Determinación del flujo de evaporación del agua hacia la zeolita	31
2.5 Software utilizado para el análisis de resultados	33
Conclusión del capítulo 2	33
CAPÍTULO 3 ANALISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS	34
3.1 Análisis tecnológico de los resultados	34
3.1.2 Comportamiento de la carga de zeolita	34
3.1.3 Comportamiento de la carga de sulfuro mixto	35
3.1.4 Comportamiento de la granulometría de la zeolita	36
3.1.5 Comportamiento del flujo de aire	37
3.1.6 Influencia de la interacción carga de zeolita (Cz) y la carga de sulfuro (Cs) sobre la humedad extraída, figura 3.6	38
3.1.7 Influencia de la interacción carga de zeolita (Cz) y la granulometría de la zeolita (G) en la humedad extraída	39
3.1.8 Influencia de la carga de zeolita (Cz) y el flujo de aire (F) sobre la humedad	39
3.1.9 Influencia de la carga de sulfuro (Cs) y la granulometría de la zeolita (G) sobre la humedad	40
3.1.10 Influencia de la carga de sulfuro (CS) y el flujo de aire (F) sobre la humedad	41
3.11 Influencia del flujo de aire (F) y la granulometría de la zeolita (G) sobre la humedad	42
3.5 Valoración Medioambiental	49
Conclusión del capítulo 3	52
Conclusión general	54
Recomendaciones	55
Bibliografía	56

Introducción

El níquel es ampliamente utilizado, ya que posee varias propiedades beneficiosas para distintos fines, países como Rusia, Canadá, Japón, China, Estados Unidos de América, Zambia, Australia, Noruega, Filipinas, India, y Cuba poseen grandes riquezas de minerales niquelíferos, en Cuba las reservas probadas son de 800 millones de toneladas y reservas probables de 2 000 millones de toneladas. La industria del níquel es uno de los principales pilares económicos del país, ya que la misma aporta anualmente un elevado porcentaje de los ingresos financieros.

En la isla la obtención del níquel a partir de minerales lateríticos, se lleva a cabo aplicando dos tecnologías fundamentales: la tecnología de lixiviación carbonato amoniacal y la tecnología de lixiviación a elevada temperatura.

El procesamiento de minerales ferruginosos de níquel en el país se inicia en el año 1943, cuando comienzan las primeras producciones en Nicaro, primera industria del mundo con tecnología carbonato amoniacal, que fue nacionalizada tras el triunfo de la revolución, adoptó el nombre de empresa “Comandante René Ramos Latour”. En Moa operan otras dos entidades productoras: “Pedro Soto Alba” con tecnología de lixiviación a elevada temperatura, puesta en operación en 1961 y “Ernesto Che Guevara”, proceso Caron, puesta en marcha desde 1986, con una producción total de alrededor 75 mil toneladas anuales.

El continuo incremento de los precios de los insumos principales, los bajos precios del níquel impuestos por procesos mucho más competitivos que el proceso Caron, el deterioro de las instalaciones, así como la obsolescencia tecnológica y los bajos índices de eficiencia metalúrgica han afectado en los últimos años la producción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, lo que ha provocado una situación crítica en términos de rentabilidad económica.

En la actualidad la operación de secado del sulfuro obtenido en las empresas con tecnología carbonato amoniacal se realiza mediante aireación natural, este procedimiento de secado, aunque económico por no necesitar consumo de energía externa, tiene como inconvenientes la contaminación del entorno y las difíciles condiciones de trabajo para los obreros y el largo período de secado.

Para mejorar esta situación se busca incansablemente alternativas para secar el producto sin dañar el medio ambiente ni la salud de los trabajadores, así como disminuir el período del

secado. Una de las posibles vías del secado es empleando el secado con aire deshumidificado en los reactores.

Situación problemática

Necesidad del secado de sulfuros de níquel y cobalto de forma ecológica y económicamente factible.

Problema científico

Poco conocimiento de la influencia de la carga de zeolita, flujo de aire, carga de sulfuro y la granulometría durante el secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto con aire deshumidificado con zeolita natural.

Objeto de estudio

El proceso de secado de sulfuros mixtos de níquel y cobalto.

Objetivo general

Determinar la influencia de la carga de zeolita, flujo de aire, la granulometría de la zeolita y la carga de sulfuro en el proceso de secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto con aire comprimido deshumidificado con zeolita natural.

Objetivos específicos

1. Caracterizar la zeolita y el material a secar.
2. Experimentar según diseño deseado.
3. Obtener modelos estadísticos que caractericen el proceso de secado.
4. Determinar el comportamiento de las variables de estudio.

Hipótesis

Si se determina la influencia de los parámetros tecnológicos del secado de sulfuros mixtos de níquel y cobalto, entonces se podrán obtener producto con la calidad deseada.

Tareas a desarrollar

1. Establecer el estado del arte del proceso y la situación actual del secado de materiales.
2. Modelación a través del diseño factorial completo y con el empleo del Statgraphic las variables de estudio.
3. Evaluación del comportamiento de los parámetros de estudio.
4. Valorar el impacto ambiental y el efecto económico del proceso de secado bajo las nuevas condiciones.

Campo de acción

Las transformaciones físicas del proceso de secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto.

Metodología de investigación

Obtenida la información bibliográfica, se aplica el diseño factorial completo de las principales variables que intervienen en el proceso de secado con aire deshumidificado del sulfuro proveniente de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. El análisis estadístico de correlación y regresión, auxiliados por métodos computacionales como el EXCEL y el STAGRAPHSICS, para analizar la influencia de las principales variables del proceso.

Los aportes de la investigación son:

En lo científico:

- Comportamiento de los principales parámetros tecnológicos del proceso de secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto con aire atmosférico deshumidificado con zeolita natural.

En lo económico:

- Disminución del costo de producción
- Obtención de mayores ingresos.

En lo social:

- Disminución de la contaminación ambiental.
- Aprovechamiento racional e integral de los recursos minerales.
- Mejoramiento de la condición de trabajo de los trabajadores.

CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO Y ESTADO DEL ARTE DEL PROCESO DE SECADO DE MATERIALES

En las plantas metalúrgicas el empleo del secado principalmente para materias primas incorporadas al proceso y a productos finales, usando combustibles es operacionalmente necesario y de mucha exquisitez en los resultados posteriores, ya sean de transformaciones físico-químicas y de transporte a bajo costos. En los últimos años, la escasez y elevados precios de éstos y de los portadores energéticos han despertado un nuevo interés en el secado con nuevos métodos más simples, cómo el aprovechamiento de la energía solar, el secado con aire deshumidificado y otros. De este modo se trata de desarrollar diversas técnicas que permitan solucionar los problemas relacionados con el secado.

El objetivo de este capítulo es: Mostrar los fundamentos técnicos necesarios para el estudio experimental del proceso de secado de materiales y la transferencia de masa que acompaña el mismo, mediante el desarrollo del marco teórico de la investigación.

1.1 Revisión bibliográfica

1.1.1 Mecanismo de secado

Existen dos principales mecanismos de secado, dentro de los cuales se tiene el secado natural y el artificial. El secado natural es el proceso en el cual los materiales se exponen directamente a la radiación solar colocándolos sobre el suelo o en dispositivos específicos. Es uno de los usos más antiguos de la energía solar, siendo aún el proceso más utilizado en países en vías de desarrollo para el secado de diversos productos (Montero 2005).

La implementación del secado natural constituye un procedimiento de bajo costo económico y ambiental que, por sus múltiples ventajas y perspectivas, es ampliamente utilizado mundialmente (Rafiee et al. 2008; Ferreira y Costa 2009; Sandoval-Torres 2009).

En Cuba, su empleo se reduce a las industrias alimenticia, maderera y azucarera, fundamentalmente. En menor medida se emplea en la industria del níquel como alternativa

para racionalizar el proceso tecnológico de obtención de níquel y cobalto. Para ello, la mena laterítica se dispone en pilas a la intemperie (Retirado et al. 2009; Retirado & Legrá 2011).

1.1.2 Proceso de secado

Los primeros intentos realizados para tratar de explicar el proceso de secado y los mecanismos que intervienen en el mismo datan de la primera década del siglo XX. Desde entonces, se han publicado en la literatura científica diversas teorías que buscan describir la forma en que se desarrolla el secado (Hernández & Quinto 2005).

Las teorías actualmente usadas para explicar el proceso de secado en materiales porosos se pueden dividir en dos grandes grupos: en el primero se encuentran aquellas que consideran que el movimiento de la humedad en el material se debe a un solo mecanismo físico, aquí se pueden citar las teorías capilar y la de difusión líquida. El segundo grupo reúne a las teorías que consideran que el movimiento de la humedad se debe a más de un mecanismo; forman parte de este grupo las teorías de condensación-evaporación; de Philip y De Vries; de Krischer y Berger-Pei; de Likov; de Whitaker y la de Kowalski-Strumillo (Hernández & Quinto 2005).

Las teorías pertenecientes al segundo grupo tienen, como elemento común, el hecho de que consideran que la migración de la humedad está determinada por los gradientes de concentración de humedad y de temperatura.

En relación con lo anterior, resulta importante determinar la distribución de temperatura durante el proceso de secado de materiales porosos, en general, y el secado natural de la mena laterítica, en particular, porque los gradientes térmicos que se generan en el secado influyen en la distribución de humedad y la velocidad de secado en las pilas de minerales (Retirado et al. 2012b).

La determinación de la humedad de equilibrio, la constante de secado y el coeficiente de transferencia de masa, tiene importancia en la modelación del proceso de secado, lo que permite una mejor proyección y selección de los parámetros racionales de trabajo de los equipos. Varios autores han estudiado el proceso de secado, fundamentalmente para materiales como la zeolita, el bagazo y la sacarina.

Dentro de ellos se destacan los trabajos realizados por (Novoa y Meinardo 1992, 1994, 1995), quienes diseñan un equipo para el secado de zeolita en la provincia Santiago de Cuba. No menos importantes son los trabajos de (Murugesan y Seetharamu 1996), los cuales hacen un

análisis convectivo del secado de materiales porosos a partir de los modos de transferencia de calor y transferencia de masa presentes en el proceso.

1.1.3 Secado en atmósfera inerte

(Matson y Fritz 1975), refieren un proceso de secado en atmósfera inerte de los sulfuros de níquel y cobalto en forma de pulpa obtenida por precipitación a partir de una solución carbonato amoniacal. Los sulfuros mixtos de níquel y cobalto preparados por este procedimiento pueden ser expuestos a condiciones atmosféricas normales por prolongados períodos de tiempo sin que experimenten significativa oxidación o hidratación. Consecuentemente el peso de los sulfuros no sufre incrementos significativos, los mismos son secados, deshidratados, calentados a temperaturas alrededor de 540 °C en atmósfera sustancialmente inerte y posteriormente enfriados. Para el secado de los sulfuros mediante este procedimiento emplearon un secador spray, pero en la investigación no se consideran los gastos elevados por el alto consumo energético y del secador spray.

(Beatón 1998), realizó la caracterización de muestras de sulfuros de níquel y cobalto secados en atmósfera inerte y al aire libre a través de análisis químico, mineralográfico y difracción de Rayos X, comprobándose en el primer caso la presencia de varios sulfuros de níquel y cobalto, mientras que en el segundo caso como resultados de los análisis mineralográfico y difracción de Rayos X predominan las fases cristalinas de sales dobles hidratadas de níquel y cobalto, pero no se identifican las pérdidas del producto y los niveles de contaminación al medio ambiente por el secado al aire libre.

1.1.4 Secado estático con recirculación de aire caliente

(Caballero y Col. 1992), refieren la investigación realizada en la empresa Comandante René Ramos Latour sobre el secado estático de los sulfuros de níquel y cobalto con recirculación de aire caliente en un horno vertical con gas pobre, manteniéndose el piroforismo, más tarde se estudió en atmósfera oxidante teniendo lugar la oxidación de sulfuro hasta sulfato a altas temperaturas, para ello se realizan los ensayos a temperatura controlada para evitar la oxidación a temperaturas de los gases inferiores a los 250 °C en la zona de secado, utilizando sulfuros de las empresas Comandante René Ramos Latour y Comandante Ernesto Che Guevara de la Serna. En la investigación no se realiza la caracterización mineralógica de la materia prima ni del sólido seco. Estas conclusiones no se corresponden con el comportamiento a escala industrial pues se mantiene el carácter pirofórico del concentrado de sulfuros con la oxidación hasta sulfatos.

1.1.5 Secado a presión reducida

(Wraith y Harris 1992), realizaron experimentos a presión reducida y midieron la caída de presión característica, mientras observaron que el frente de fluidización avanza hacia la parte inferior al incrementar el flujo de gas. En esta investigación se determinaron las proporciones de gases relación gas/sólido que se requieren para una aceptable distribución del gas para el secado en la cama fluidizada, pero no se obtienen datos del tiempo de secado y los cambios de temperatura, ni se experimentó el secado con aire deshumidificado con vista a reducir los costos del proceso.

(Romero 1993), refiere las investigaciones sobre la descomposición térmica de los sulfuros de níquel y cobalto industrial, dirigida a la caracterización de la degradación térmica del sulfuro de níquel y cobalto de la empresa Comandante René Ramos Latour, al determinar los parámetros cinéticos y los modelos de la descomposición de los sulfuros hasta óxidos. Aplicó el método propuesto por Jerez que analiza los 25 modelos cinéticos para identificar la función $[f(oc)]$ y se utilizó el método de Achar para el cálculo de los parámetros cinéticos, pero la investigación se realizó en régimen no isotérmico hasta 1000 °C con velocidades de calentamiento entre 2,5 y 10 °C/min.

(Panadero 1993), refiere los trabajos realizados en horno rotatorio con calentamiento indirecto y atmósfera oxidante, logra secar los sulfuros mixtos de níquel y cobalto sin riesgo en la transportación ya que produjo un producto estable, las pruebas se realizaron a nivel de banco, pero en ellas no se muestra la velocidad de secado para poder escalar a nivel industrial y asegurar el funcionamiento a los niveles productivos de hoy.

Informe técnico del Departamento de Investigación de la empresa Comandante René Ramos Latour (1995), contiene el estudio de la posibilidad de realizar el secado atmosférico del sulfuro de níquel y cobalto aprovechando la oxidación parcial del azufre con un incremento significativo de la temperatura de todo el material, al disminuir la humedad. La temperatura inicial se incrementó desde 45 °C hasta valores entre 70 y 90 °C, posterior al envasado del material en big-bag disminuyó hasta 70 °C, al poner el producto en contacto con el aire las temperaturas fueron inferiores a 77 °C, la solubilidad del producto seco no sufrió alteraciones. Similar estudio fue realizado por Blet y Sánchez del CEINNIQ (1996), ellos analizaron los procesos de secado atmosférico de los sulfuros de níquel y cobalto obtenidos por la tecnología carbonato amoniacal y su posterior disolución. El secado se analizó tanto en big-bag como en

el suelo, se determinó la dependencia del contenido de humedad con el tiempo de secado y la altura óptima de los canteros.

La disolución del sulfuro seco se estudió a presión atmosférica y en autoclaves a temperaturas entre 90 y 100 °C , presión de 709,2 kPa y tiempo de 4 horas, se utilizó agua y licor fresco, se alcanzó extracciones superiores al 90 % , a presión atmosférica para el níquel y cobalto y 99,9 % cuando se empleó presión de oxígeno de 709,2 kPa. En estas investigaciones se estudia el efecto del piroforismo que se utiliza como medio fundamental de fuente de calor, pero no se propone la instalación que evite las pérdidas de sólidos al medio, así como la contaminación por la evaporación de los gases contaminantes.

Lobaina (1994), refiere los resultados del secado de una muestra de sulfuros de níquel y cobalto procedentes de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de la Serna en un Secador Spray. La alimentación del sulfuro al secador se realizó mediante un equipo que permitía la alimentación del producto en forma de torta, lo cual posibilita incrementar la cantidad de sólido en el sulfuro a secar y disminuir el consumo de energía. Las muestras fueron secadas a diferentes temperaturas de entrada y salida 230 a 250 °C y 105 a 150 °C, pero en las mismas no se consideran los gastos elevados por el alto consumo energético.

También el mismo autor (2005), refiere los resultados del secado de una muestra de sulfuros de níquel y cobalto en un secador directo en atmósfera oxidante. La alimentación al secador se realizó en forma de torta lo cual permitía incrementar la cantidad de sólido a secar. Las muestras fueron secadas entre 100 y 250 °C. En este mismo año refiere los resultados con la misma tecnología pero las muestras fueron secadas controlando los gases de salida entre 100 y 110 °C. En ellas se evidencia la necesidad de altas temperaturas por lo que implica la utilización de equipos robustos con una inversión costosa y con alto costo de operación.

1.1.6 Secado indirecto

Sagedahl y Ramírez (2003), refieren los resultados del secado de una muestra de sulfuros mixtos de níquel y cobalto en un secador indirecto “Multicoil”. La temperatura del vapor utilizado para el secado fue de 174 °C y el tiempo de retención de 2 horas. Como resultado del proceso de secado se obtuvo un producto seco con 0,76 % de humedad, que durante el proceso de secado y posterior al mismo mantuvo un comportamiento no activo. Esta tecnología fue ofertada por Kverner pero resultó tener un costo de inversión muy alto.

1.1.7 Secado de minerales lateríticos

El secado de minerales lateríticos es de gran importancia para las empresas cubanas de níquel. Varios autores han estudiado las influencias de variables tecnológicas sobre el proceso de secado de éstos minerales. Entre ellos se destacan los trabajos realizados por Torres, Galano y Efraín (2003), quienes analizaron la influencia de la humedad de equilibrio, la constante de secado y el coeficiente de transferencia de masa, durante el secado del mineral laterítico a escala de laboratorio. Obtuvieron una correlación y regresión de las variables antes mencionadas en función de la temperatura y el contenido de humedad del mineral. Confirmaron experimentalmente que para un rango de temperatura entre 80 y 120 °C, la de humedad de equilibrio del mineral laterítico se encuentra entre 0,022 y 0,039 g/g, la constante de secado entre 0,0198 y 0,0077 L/min, y el coeficiente de transferencia de masa entre 0,0044 y 0,0116 g/(m²·min). Concluyeron que el exceso de humedad en el mineral que sale de los secadores no está relacionado con el régimen de temperatura usado en el proceso.

Relacionado con el mineral laterítico existen pocos trabajos encaminados a lograr mayor eficiencia en el proceso de secado de este material, dentro de ellos se destaca el desarrollado por Miranda y otros (1996), en el que se realiza una comparación y conjugación de métodos para determinar el contenido de humedad inicial en las distintas menas de los yacimientos lateríticos, y se aplica el método de reflexión neutrónica. En los trabajos anteriores, aunque se establecen métodos de carácter general aplicables a algunos materiales, ninguno se adapta al estudio del secado del mineral laterítico con aire deshumidificado con el fin de ahorrar energía y tener un producto de calidad.

En el estudio desarrollado por Torres (1999), a partir de las variables más importantes involucradas en el proceso de secado, se establecen los valores óptimos de los parámetros temperatura, contenido de humedad y velocidad de los gases en el interior del cilindro. La deficiencia fundamental de este trabajo es que se realizó a escala industrial, por lo cual no se pudo obtener un modelo físico–matemático que caracterice el proceso. Además no se tuvo en cuenta el uso del secado con aire deshumidificado con el fin de disminuir el consumo del fuel oil, ni se analizó la influencia de las variables como la carga de zeolita, el flujo de aire, la granulometría de la zeolita, y la carga de sulfuro.

1.1.8 Oxidación de los sulfuros

Capote y otros del CEINNIQ (1998), refieren el análisis realizado sobre la oxidación de los sulfuros, el cual abarcó solamente los de níquel y cobalto y la formación de los sulfatos

anhidros e hidratados respectivamente de estos metales, comprobándose que las reacciones más probables son las de formación de los sulfatos hidratados. También estos autores en el 1998 refieren la caracterización realizada de sulfuros de níquel y cobalto industriales envejecidos y frescos, obtenidos a escala de laboratorio a partir de licores industriales realizándose análisis químico por espectrofotometría de absorción atómica, difracción de rayos X y análisis térmico diferencial, así se compró la no existencia de una relación fija de níquel y cobalto (Ni-Co) que alcanzan valores máximos de 20 y 6 % respectivamente y la presencia de hierro, cobre, zinc y manganeso como impurezas.

En los sulfuros recién precipitados las fases cristalinas principales son siegenita (Ni_2CoS_4) y el alfa sulfuro de níquel ($\alpha\text{-NiS}$), mientras en los sulfuros expuestos al aire son sulfatos hidratados de níquel y cobalto, así como sulfatos doble de níquel y amonio. Además se indica la posibilidad de compuestos similares de hierro y cobalto los que son isoformas con el níquel. En este estudio se analizaron los compuestos amorfos presentes en el concentrado, los que son predominantes en este producto, aspecto esencial para completar la caracterización. Pero en el estudio no se tuvo en cuenta la existencia de otras especies químicas en las soluciones amoniacaes y su precipitación en forma de sulfuros, tal como lo han demostrado los estudios de difracción de rayos X.

1.1.9 Zeolitas naturales

Las zeolitas se hallan en una variedad de regiones del mundo donde la actividad volcánica prehistórica ocurrió cerca del agua, o donde el agua ha estado presente por milenios desde las erupciones.

En 1756, el mineralogista sueco Baron Axel Fredrick Cronstedt descubrió la zeolita. Se relata que su perro sacó la piedra mientras escarbaba y el mineralogista la llamó zeolita debido a que significa “perro” en sueco. En otro relato, se dice que descubrió que cuando la zeolita (Stilbite) se calentaba, emitía vapor. Zeolita significa “piedra hirviente” en griego. Las zeolitas tienen una porosidad natural debido a que tienen estructuras cristalinas con ventanas, jaulas y superjaulas. Las zeolitas naturales tienen ventanas de tamaño limitado, tamaño de poro y todas son hidrofílicas, es decir, tienen afinidad por el agua. Algunas zeolitas sintéticas se parecen al carbón adsorbente, dado que ambas pueden considerarse hidrofóbicas, tienen afinidad por los compuestos orgánicos, con poca o ninguna afinidad por el agua y pueden adsorber vapores orgánicos con moléculas de tamaño más pequeño que el de sus poros.

Tanto el carbón como las zeolitas pueden adsorber agua y moléculas orgánicas; sin embargo, aquello por lo que tenga mayor afinidad, desplazará las demás moléculas. Las zeolitas tienen un tamaño de poro uniforme, lo cual hace que se les denomine como tamiz molecular. Las zeolitas hidrofóbicas tienen que ser sintetizadas, ya que no se encuentran en la naturaleza. Y son aluminosilicatos cristalinos microporosos, con estructuras bien definidas formado por tetraedros de $[\text{SiO}_4]^{4-}$ y $[\text{AlO}_4]^{5-}$, unidos a través de los átomos de oxígeno en los vértices (Dyer, 1988).

1.1.9.1 Costo de las zeolitas

Los costos de los productos de la zeolita dependen en su mayor parte del tipo y grado de procesamiento que deben de hacerse para satisfacer las especificaciones del mercado. Los costos son equivalentemente bajos, generalmente de tres a seis dólares por tonelada.

Muchas zeolitas son vendidas a bajo valor industrial o al mercado de la agricultura, usualmente se vende de \$ 30 a 70/t de producto granular bajo 40 mallas, y de \$ 50 a 120/t de material molido en un rango de 40-325 mallas. (Batista R, 2004).

1.1.9.2 Zeolita del yacimiento de Caimanes

Las zeolitas naturales son aluminosilicatos con una estructura tridimensional de tetraedros de tetróxido de silicio (SiO_4), cuyo núcleo queda cargado negativamente al sustituirse algunos de los átomos de sílice por aluminio trivalente. De esta manera se forma el esqueleto estructural de las zeolitas, la molécula de la zeolita equilibra su carga iónica con iones mono, bi y trivalentes. Una de las características principales de la estructura de las zeolitas, que no la poseen otros aluminosilicatos es que su almacén es abierta, siendo en algunas especies hasta de un 50 % con anchas cavidades que pueden estar interconectadas en una, dos o tres dimensiones. Estas se rellenan de agua a través de la cual viajan los cationes para ocupar distintas posiciones.

Estas particularidades condicionan sus propiedades como intercambiador iónico natural, su habilidad por adsorber y desorber agua y gases (Orozco, 1996).

1.1.9.3 Estudio de la zeolita como agente adsorbedor y absorbedor

Desde 1970 las investigaciones sobre zeolitas naturales han despertado un especial interés como resultado del descubrimiento de importantes yacimientos, sus propiedades físico - químicas y sus potenciales aplicaciones en la industria, la agricultura y la acuicultura. El uso y aplicaciones industriales de las zeolitas naturales se han estado expandiendo continuamente y cientos de toneladas son extraídas anualmente en Estados Unidos de América, Japón, Italia,

Bulgaria, México, Corea y Alemania. En los últimos años, el consumo de zeolitas naturales ha crecido debido a la demanda de materiales baratos para aplicaciones como intercambiadores iónicos y adsorbentes.

También la aplicación de zeolitas naturales para la remoción de metales pesados en solución acuosa ha sido reportada en varios trabajos de Leyva y Col. (2001).

Se ha demostrado que la capacidad de intercambio de las zeolitas naturales depende de su tipo y origen, así como del tratamiento que reciban. La zeolita se puede modificar tratándola por intercambio catiónico y su capacidad de intercambio depende del catión que se use en el tratamiento (Loizidou y Townsend, 1987). Pero en estas investigaciones no se analiza el poder de adsorción de este mineral con el vapor de agua presente en el aire.

Hasta la fecha se han identificado más de 40 especies de zeolitas naturales y más de 100 artificiales pero solamente las siete siguientes: chabazita, clinoptilolita, erionita, ferrierita, filipsita, mordenita y analcima, se encuentran en la cantidad suficiente y pureza requerida para ser explotadas comercialmente. En las investigaciones realizadas se reportan estos minerales como excelentes adsorbentes, pero no se han realizado estudios de adsorción de humedad del aire a bajas presiones.

Orozco (1996), realizó un estudio de adsorción de gases contaminantes y humedad en las zeolitas naturales cubanas, en este trabajo se empleó como tamaño de partículas entre 1,4 y 4 mm. Las rocas zeolitizadas trituradas con esta granulometría mostraron un excelente poder de adsorción, pero no se identificaron los valores máximos de humedad depositados en los intersticios del sólido.

Rodríguez Ricardo (2009), Durante el estudio del secado de sulfuros mixtos de níquel y cobalto empleando zeolitas naturales para disminuir la humedad relativa del aire, se comprobó que las variables de estudio son significativas con respecto a la variable relación humedad sólido, siendo en orden decreciente: tiempo, carga de zeolita y presión de vacío y a consecuencia una mayor velocidad de los sulfuro, pero se realizó el estudio a escala de laboratorio por lo que resulta importante realizar estudios a escala de banco o superiores a esta, en aras de lograr mayor representatividad.

1.2 Teoría sobre el proceso de secado

El secado es la extracción de la humedad de un material. (Treybal, 1965)

El exceso de humedad contenido en un material puede eliminarse por métodos mecánicos, tales como: el escurrimiento, la sedimentación, la filtración y la centrifugación. No obstante, la deshidratación más completa se obtiene al evaporar la humedad y al eliminar los vapores formados, es decir, mediante el secado térmico.

Por su esencia física el secado es un proceso difusivo complicado, cuya velocidad por la velocidad de difusión de la humedad desde el interior del material a secar hacia el medio ambiente. Así pues, el secado es la combinación de los procedimientos de intercambio de calor y transferencia de masa vinculados uno con el otro. (Kasatkin, 1985).

1.2.1 Clasificación de los métodos de secado según el método de suministro del calor

Según el método de suministro de calor hacia el material a secar los procedimientos pueden clasificarse en:

1. Secado por convección, o sea, mediante el contacto directo del material con el agente secador, en calidad del cual se emplea aire caliente o gases de combustión.
2. Secado por contacto, es decir, la transmisión de calor se hace desde el caloportador hacia el material a través de una pared que los separa.
3. Secado por radiación, se realiza mediante la transmisión de calor por rayos infrarrojos.
4. Secado dieléctrico, se realiza mediante el calentamiento en in campo de corriente eléctrica de alta frecuencia.
5. Secado por sublimación, se llama al secado en estado de congelación al vacío profundo. Según el método de transmisión de calor este procedimiento es similar al secado por contacto. (Kasatkin, 1985).

1.2.2 Parámetros de Materiales Mojados

El primer parámetro es el contenido de humedad la cual puede ser definida de dos maneras como explica Strumillo y Kudra.

$$\text{Base seca: } X = \frac{m_A}{m_S} \cdot \frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg de material seco}}$$

$$\text{Base húmeda: } X' = \frac{m_A}{m} = \frac{m_A}{m_A + m_S} \cdot \frac{\text{kg de humedad}}{\text{kg de material mojado}}$$

En el secado existen algunos valores característicos que identifican estados en el contenido de humedad.

1.3 Equilibrio en el contenido de humedad

La humedad que está en equilibrio con el vapor contenido en el agente de secado. Este es el mínimo contenido de humedad en la cual un material puede teóricamente ser secado.

También es llamado: Contenido mínimo de humedad higroscópica.

1.3.1 Contenido crítico de humedad

Es una humedad característica ocurre un cambio en las condiciones de secado en las cuales pasa del secado a velocidad constante a la velocidad decreciente de secado.

1.3.2 Contenido máximo de humedad

Esta es el contenido máximo de humedad en el cual todos los vacíos están llenos de humedad.

1.3.3 Contenido inicial de humedad

El contenido de humedad al comienzo del secado.

1.3.4 Contenido máximo de humedad higroscópica

Esta es el equilibrio en el contenido de humedad del sólido cuando la humedad del ambiente está saturada.

1.3.5 Humedad libre

Es el exceso de humedad de un sólido, respecto a la humedad de equilibrio, en contacto con una determinada masa de aire. Es la humedad que puede perder un sólido después de un contacto prolongado con el aire.

1.3.6 Humedad ligada

Es la humedad de equilibrio de un sólido en contacto con una masa de aire de humedad relativa del 100 %. También, la humedad mínima necesaria para que el sólido deje de comportarse como higroscópico.

1.3.7 Humedad desligada

Es la diferencia entre la humedad del sólido y la humedad ligada, o la humedad libre del sólido en contacto con aire saturado. El sólido se comporta como sólido húmedo.

1.3.8 Movimiento de la humedad dentro del sólido

Cuando se produce la evaporación superficial debe haber un movimiento de humedad desde las profundidades del sólido hacia la superficie. La naturaleza del movimiento influye en el secado en los períodos de caída del régimen (Menon & Mujundar, 1992). A continuación se explican brevemente algunas de las teorías del movimiento de la humedad y la relación de esta con las curvas de régimen.

- ❖ Difusión líquida: se puede producir la difusión de la humedad debido a los gradientes de concentración entre las profundidades del sólido, donde la concentración es alta y la superficie donde ésta es baja (Treybal, 1965).
- ❖ Movimiento capilar: el valor de la humedad no límite en sólidos granulares y porosos tales como arcillas, pigmentos de pinturas y otros semejantes; se traslada a través de capilares e intersticios de los sólidos mediante un mecanismo que implica tensión superficial. Los capilares se extienden desde pequeños receptáculos de humedad dentro del sólido hasta la superficie de secado. A medida que se lleva a cabo el secado, la humedad al principio se traslada por capilaridad hacia la superficie con suficiente rapidez, siendo constante el régimen de secado.
- ❖ Difusión de vapor: especialmente, si se suministra calor a una superficie de un sólido, mientras en otra el secado continúa, se puede evaporar la humedad debajo de la superficie, difundiéndola hacia afuera como vapor. También se pueden evaporar debajo de la superficie, las partículas de agua existentes en sólidos granulares en forma aislada de la porción mayor de humedad que fluye a través de los capilares.
- ❖ Presión: durante el secado debido a la concentración de las capas externas de un sólido, se puede compeler la humedad hacia la superficie.

1.4 Mecanismos y cinética de secado

Un elemento fundamental en el proceso de secado es el estudio de la intensidad de la transferencia de masa en el mismo. Para esto es necesario conocer los elementos más útiles de la transferencia de calor y masa que funcionan en los secaderos de contacto directo. Según Madariaga (1995), la intensidad depende de una serie de factores que van desde condiciones internas a externas.

Las condiciones externas están definidas por la resistencia a la transferencia de calor y de masa de la capa límite del gas, y en el caso que predominen, el secado no dependerá de las características del sólido, sino de las condiciones del gas, y estará controlado por la transferencia de masa y calor entre el gas y la superficie del sólido, empleándose en la evaporación todo el calor que se recibe del gas, la cual se comporta como una superficie libre de agua.

Las condiciones internas están definidas, por la transferencia de calor y de masa a través del sólido. En el caso que predominen, es decir, que la resistencia a la transferencia de masa a través del material sea muy superior a la de la capa límite del gas, la difusión interna controlará el proceso y lo más importante serán las propiedades del sólido.

1.4.1 Curvas de régimen de secado

Este tipo de curva nos muestra el contenido de humedad a través del tiempo en el proceso de secado. En el período inicial de secado, el cambio de humedad en el material está ilustrada en el tramo A-B. Al terminar el primer período de secado toma la forma lineal del tipo $X = f(t)$, en este período la velocidad de secado es constante, recta B-C. El secado se mantiene igual por un período de tiempo hasta que llega a un punto crítico, el punto C, donde la lineal recta tiende a curvarse y a formar una asíntota con el contenido de humedad X_{eq} que es el valor mínimo de humedad en el proceso de secado, es decir, que el punto E nunca es tocado.

La recta B-C es llamado período de velocidad de secado constante, y al siguiente período de secado se conoce como el período de caída de velocidad del secado.

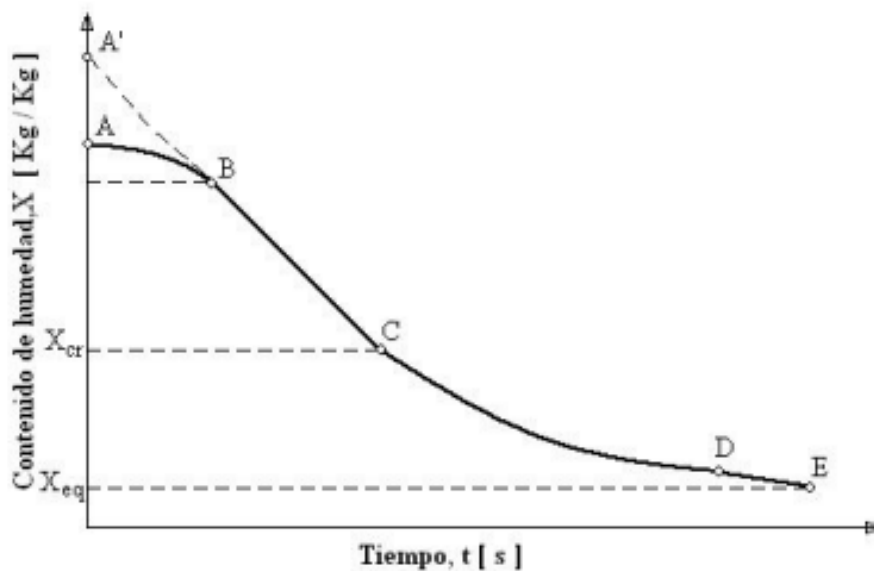


Figura 1.1 Curva de secado

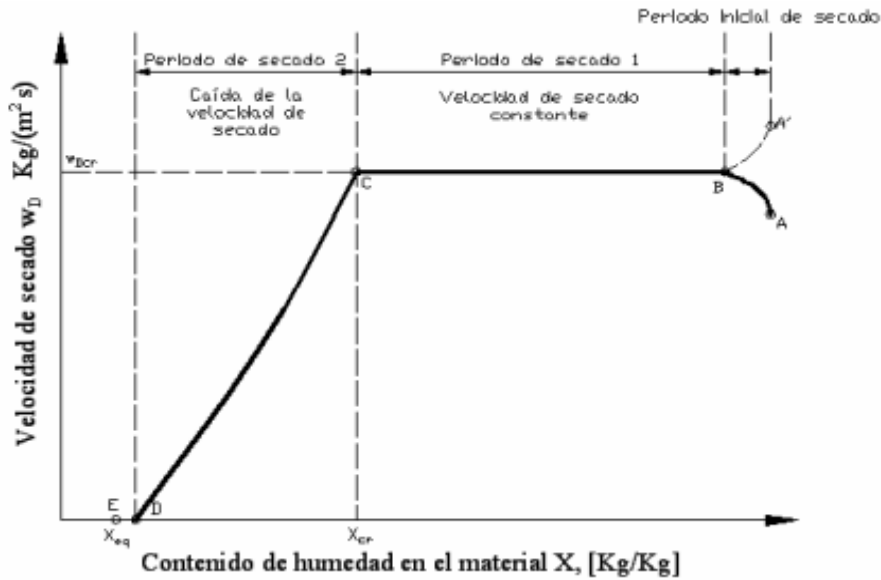


Figura 1.1 Curva de velocidad secado

Este tipo de curva indica con que velocidad se seca el material. Este diagrama es muy útil para diferentes propósitos. Tiene la función $w_D = f(X)$, y muestra la cantidad de humedad removida desde el material secado por unidad de tiempo por unidad de superficie secada.

$$w_D = \frac{m}{A} \frac{d}{dt}(X) \quad (1.1)$$

$$N = \frac{d}{dt}(X) \quad (1.2)$$

En esta gráfica también puede verse los períodos de velocidad constante y caída en la velocidad de secado.

Antes del secado la superficie del material está cubierta con una capa delgada de líquido la cual puede ser tratada como humedad desatada, libre o capilar. La evaporación empieza con el contacto con el aire (Treybal, 1965).

1.4.2 Tiempo de secado

El tiempo de secado depende del material, esto define las características que tendrán la curva de secado. El mismo debe ser determinado separadamente para el primer y segundo periodo de

secado. A partir de la ecuación de la velocidad de secado (1.1) se puede reacomodar para obtener el tiempo de secado.

$$\int_0^t dt = \frac{m}{A} \int_{x_1}^{x_2} \frac{dX}{w_D} \quad (1.3)$$

donde X_1 y X_2 son los contenidos de humedad desde el tiempo cero hasta t , respectivamente.

1.5 Los procesos fundamentales que ocurren durante el proceso de secado

Transferencia del calor para evaporar el líquido.

Transferencia de masa en humedad interna y líquido evaporado. Independientemente del mecanismo de transmisión de calor el cual puede ser por conducción, convección, radiación o una combinación de cualquiera de estos, el calor tiene que pasar primero a la superficie exterior y desde esta al interior del sólido. Excepto el secado por electricidad de alta frecuencia, que genera el calor intercambiante, esto conduce a la circulación de calor desde el interior hasta la superficie exterior (Menon and Mujundar, 1992) (Treybal, 1965).

En el secado por convección el calor necesario para la evaporación del líquido se transmite por un agente gaseoso o un vapor que pasa por encima del sólido o lo atraviesa. En el secado por conducción el producto que debe secarse se encuentra en recipientes calentados o se desplaza por encima de estos. El calor también se difunde en el sólido a través de la conductividad del propio sólido.

En el secado por radiación el calor se transmite por las superficies radiantes próximas. En el secado dieléctrico la energía es generada en el interior del propio material mediante un campo electromagnético de alta frecuencia en la zona de microondas.

También se reporta en la literatura el secado por sublimación, denominando así al secado en estado de congelación al vacío profundo. Según el método de transmisión del calor este procedimiento es análogo al secado por conducción; pero debido a sus peculiaridades el secado por sublimación se destaca como un grupo especial (Kasatkin, 1985).

Conclusión del capítulo 1

El marco teórico de la investigación permitió establecer los fundamentos teóricos y la importancia de realizar la presente investigación y la comprensión y el estudio experimental del proceso de secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto con aire atmosférico deshumidificado con zeolita natural.

CAPÍTULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS

El desarrollo y éxito de toda investigación se basada en la fiabilidad de los resultados y es la herramienta fundamental para su validación. Una adecuada selección de los materiales y métodos es de vital importancia para lograr el éxito. En el estudio del secado de sulfuros de níquel y cobalto con el aire deshumidificado como agente secante es necesario determinar las propiedades físicas de la materia prima utilizada, describir la instalación experimental, los utensilios y las metodologías aplicadas, así como el diseño de experimento y los procedimientos desarrollados, lo que constituye el objetivo del capítulo.

2.1 Materiales

Para la realización de la investigación se emplearon los materiales siguientes:

Sulfuro de níquel y cobalto con la composición física y química que se muestra a continuación:

Composición física

Color: Negro, Granulometría: entre 8 a 15 μm ;

Densidad del sólido: 3 500 kg.m^{-3} ; Humedad de la torta filtrada: entre 50 y 60 %

Composición química

Tabla 2.1 Composición química del sulfuro de níquel más cobalto de la empresa ECG, %

Ni	Co	Fe	Cu	Zn	Mn	Mg	H ₂ O
21-22	8,8-9,2	0,48-0,52	1,6	0,02	0,02	0,09	48

Zeolita, con granulometría de 10 y 6,3 mm proveniente del yacimiento de caimanes.

Propiedades físicas

Tobas zeolitizadas.

Color: verde claro;

Granulometría: 6,3 y 10 mm;

Densidad: $2\,131\text{ kg.m}^{-3}$;

Densidad aparente: $1\,021\text{ kg.m}^{-3}$;

Diámetro del poro 2-2 Å;

Capacidad de adsorción $< 0,35\text{ cm}^3.\text{g}^{-1}$ (la zeolita es capaz de adsorber la tercera parte de su masa). (Orozco, 1996).

En la figura 2.1 se presenta una muestra de las tobas zeolitizadas de la zona de Caimanes

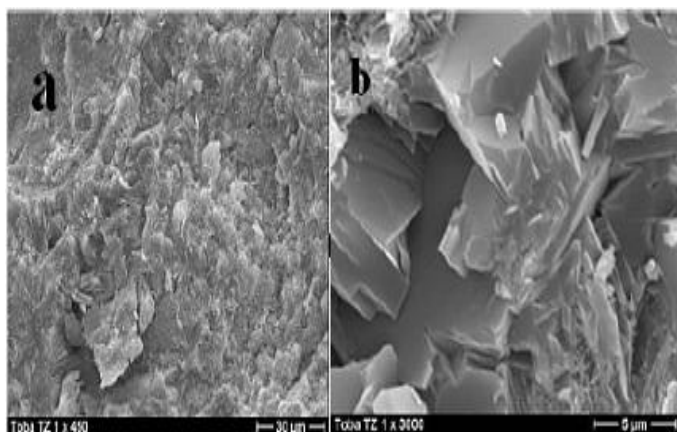


Figura 2.1 Tobas zeolitizada de la zona de Caimanes.

Cristales tabulares de heulandita bien desarrollados dentro de la masa vitroclástica.

a) Detalles de los cristales de heulandita.

En la figura 2.2 se expone una muestra de tobas zeolitizadas de la zona de Caimanes con una granulometría de 10,0 y 6,3 mm.



Figura 2.2 Tobas zeolitizada de caimanes con una granulometría de 10 y 6,3 mm.

Aire atmosférico

El aire atmosférico usado durante las pruebas experimentales presenta las características físicas siguientes:

Temperatura bulbo seco: 25 a 32 °C

Temperatura bulbo húmedo: 26 a 27 °C

Humedad relativa: 73 a 77 %

Densidad a 25 °C: 1,34 kg.m⁻³

Viscosidad: 0,0172 cP.

Aire deshumidificado

Para obtener el aire deshumidificado se necesitó un medio absorbente que fue la zeolita natural que tiene como función eliminar el agua o los gases contaminantes producto del secado.

2.2 Equipos y Utensilios

Equipos y utensilios son empleados para el análisis de humedad, el secado de la zeolita, el pesaje de la zeolita y del sulfuro de níquel más cobalto, preparación de la zeolita y para el desarrollo de la experimentación. Los mismos se exponen a continuación:

Termómetro digital. Se utilizó para la determinación de las características físicas del aire atmosférico.

Triturador de mandíbula con diámetro de alimentación de 25 mm y de descarga de 4,76 mm, respectivamente según se muestra en la figura 2.3.



Figura 2.3 Triturador de mandíbula (150x75) Boca de alimentación. Ancho: 25 mm

Tamices utilizados para obtener las fracciones de 10 y 6,3 mm.

Analizador de humedad, se utilizó para analizar la humedad inicial y final después de cada prueba de secado de la muestra. El mismo tiene las características técnicas siguientes:

Tipo: Max 50/1 y Max 50;

Unidad de lectura: 0,1 mg y 1 mg;

Capacidad máxima: 50 g;

La exactitud de lectura de humedad: 0,01/ 0,001 para muestra de 1,5 g;

El rango de la tara: -50 g;

Masa máxima de la muestra: 50 g;

Rango de temperatura de secado: máx. 160 °C (opcional 250 °C);

Temperatura de operación: +15 °C +- 40 °C;

Potencia suministrada: adaptador 230 V 50Hz AC/ 420 W;

Dimensiones de la cámara del secador: 120 x 120 x 20 mm. (RADWAG, 2010);

En la figura 2.4 se muestra el analizador de humedad.

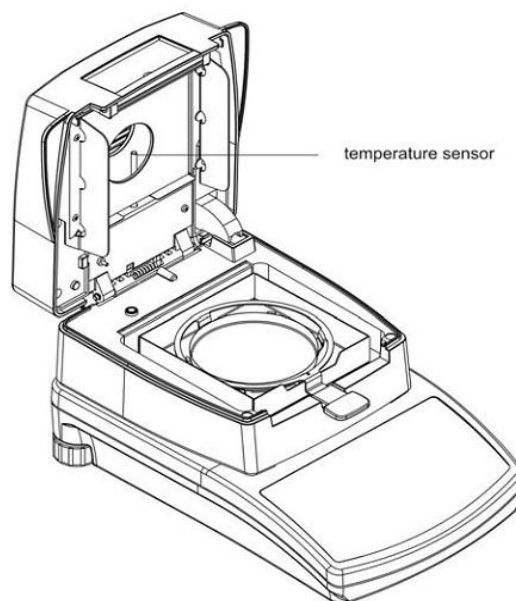


Figura 2.4 Analizador de humedad (Moisture analyzer MAX SERIES)

Estufa Ecocell, se empleó en el secado de las muestras de zeolita. Se expone en la figura 2.5.



Figura 2.6 Estufa Ecocell para el secado de la zeolita

Balanza digital KERN, utilizada para el pesaje de las muestras de zeolita que se utilizaron en la experimentación. Figura 2.7



Figura 2.7 Balanza digital Kern con zeolita natural

2.3 Instalación experimental

Para el desarrollo de la experimentación se construyó una instalación que tiene acoplado una fuente de aire proveniente de la empresa Ernesto Che Guevara (1), la cual proporcionó

el aire del medio al sistema; flujómetro (2) para regular el flujo de aire según el diseño (10 y 30 m³/h); deshumidificador de aire formado por un tambor cilíndrico y una cama de zeolitas natural (3) para pasar el aire que sale del flujómetro; tambor cilíndrico rotatorio (4) que contiene la muestra húmeda de sulfuros de níquel y cobalto. La instalación experimental se muestra en la figura 2.8.

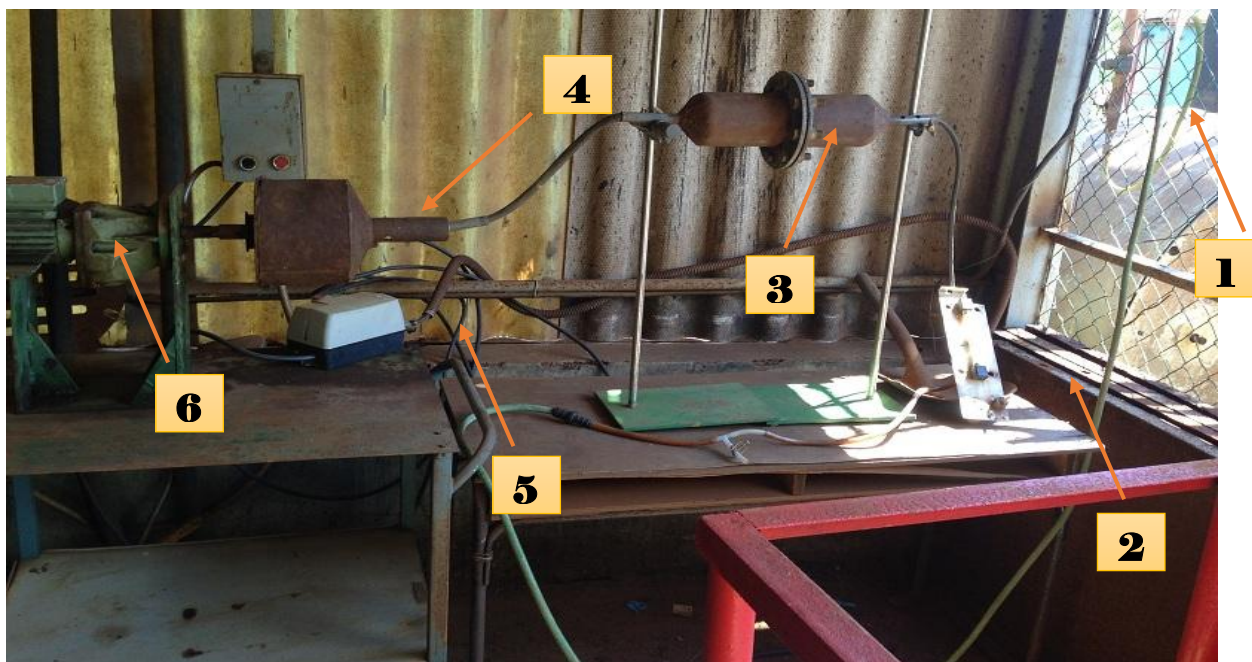


Figura 2.8 Instalación experimental a escala de laboratorio para la deshumidificación de la zeolita y el secado de sulfuro de níquel más cobalto

Leyenda: 1-Fuente de aire proveniente de la empresa Ernesto Che Guevara; 2- Flujómetro; 3- Deshumidificador de aire; 4-Tambor rotatorio para el secado; 5-Arraque digital; 6-Motor del tambor.

2.4 Metodologías y Métodos

2.4.1 Método histórico

A partir del método histórico se analizó la trayectoria concreta de la teoría relacionada con la investigación, basada en las operaciones del proceso de secado, las propiedades de las zeolitas y los antecedentes que dieron lugar al desarrollo de dicha investigación.

2.4.2 Método de la modelación estadística - matemática

El método constituye la base para demostrar con resultados concretos la influencia de los parámetros que se experimentaron durante el proceso de secado y con dichos resultados probar la efectividad del mismo.

2.4.3 Método empírico

El método consistió en hacer ensayos a escala de laboratorio para verificar el comportamiento del proceso de deshumidificación de la zeolita natural y secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto.

2.4.4 Método del Diseño de experimento

Se realizaron pruebas exploratorias para evaluar el comportamiento del régimen de secado y para ello se utilizó el método tradicional donde se mantuvo fijo el tiempo de secado a treinta minutos y se variaron los demás parámetros. De este modo se puede graficar la relación humedad - sólido y contenido de humedad respecto a los demás parámetros. En el análisis estadístico para evaluar la influencia de los parámetros se procedió a desarrollar un diseño factorial completo.

En el proceso de secado se vincula la transferencia de masa. De esta manera se evita el uso de las altas temperaturas en el secado por el alto costo de operación que esto provocaría, para lo que se requirió del uso de un adsorbente de humedad del aire, la zeolita natural y en condiciones controladas que se estiman como variables que permiten el transporte de la cantidad de masa de aire teóricamente necesaria para el contacto aire - sólido. La fuerza impulsora es el gradiente de humedad entre el producto húmedo y el aire, se requiere obtener aire con baja humedad, capaz de incorporar el agua contenida de los sulfuros hasta su saturación.

En la tabla 2.1 se muestran las variables de entrada con sus respectivos niveles y la variable de salida.

Tabla 2.1 Variables de entrada y de salida

Nº	Variables de entrada	Nivel de experimentos		Variables de salida
1	Carga de sulfuros (CS), kg/m ²	1	0,5	Humedad extraída (HE), %
2	Carga de Zeolita (CZ), kg/m ²	1	0,5	
3	Granulometría de la zeolita (G),mm	10	6,3	
4	Flujo de aire (F), m ³ /h	30	10	

A continuación se determina el número de experimento.

Para determinar el número de experimentos se emplea la fórmula:

$N = 0^n = 2^4 = 16$ pruebas experimentales.

En las tablas 2.2 y 2.3 se exponen la matriz codificada y decodificada de la cantidad de experimentos a realizar.

Tabla 2.2 Matriz codificada de la cantidad de pruebas a realizar

Nº	Carga zeolita, kg	Carga (Ni+Co)S, kg	Granulometría, mm	Flujo de aire, m³/h
1	+	+	+	+
2	-	+	+	+
3	+	-	+	+
4	-	-	+	+
5	+	+	-	+
6	-	+	-	+
7	+	-	-	+
8	-	-	-	+
9	+	+	+	-
10	-	+	+	-
11	+	-	+	-
12	-	-	+	-
13	+	+	-	-
14	-	+	-	-
15	+	-	-	-
16	-	-	-	-

donde: + es el máximo nivel y – es el mínimo nivel

Tabla 2.3 Matriz decodificada de la cantidad de prueba a realizar

Nº	Carga zeolita, kg	Carga (Ni+Co)S, kg	Granulometría, mm	Flujo de aire, m³/h
1	1	1	10	30
2	0,5	1	10	30
3	1	0,5	10	30
4	0,5	0,5	10	30
5	1	1	6,3	30
6	0,5	1	6,3	30
7	1	0,5	6,3	30
8	0,5	0,5	6,3	30
9	1	1	10	10
10	0,5	1	10	10
11	1	0,5	10	10
12	0,5	0,5	10	10
13	1	1	6,3	10
14	0,5	1	6,3	10
15	1	0,5	6,3	10
16	0,5	0,5	6,3	10

2.4.5 Metodología para el muestreo del sulfuro de níquel más cobalto húmedo

Para el proceso experimental se tomaron muestras de sulfuros de níquel y cobalto procedente del área de filtración en la planta de precipitación de cobalto de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de la Serna. Las muestras se tomaron en los contenedores según se observa en la figura 2.9, los cuales se transportan hasta el área de secado.

En la selección de la muestra representativa para la determinación de humedad de la torta, se preparó tres grupos, dos de 6 kg y uno de 8 kg tomados de cuatro contenedores de sulfuros de níquel y cobalto de la planta de cobalto. Se homogenizaron manualmente de 1 a 2 min. Se realizó un cuarteo a cada grupo y se tomó de 1 a 2 kg, se unieron todas las muestras de los diferentes grupos, formándose una nueva muestra de 4 a 6 kg, luego se homogenizó y de la misma se tomaron de 2 a 5 kg. Para determinar la humedad se escogieron tres muestras de 12 a 13 g, que se enviaron al laboratorio analítico del CEDINIQ.



Figura 2.9 Contenedores con el sulfuro mixto de níquel más cobalto

2.4.6 Metodología para el muestreo y preparación de la zeolita

Para la realización de la investigación, las muestras de zeolita natural fueron tomadas en los Yacimientos Caimanes en la región de Farallones, las mismas se tomaron mediante el método por puntos, el cual consistió en la toma de trozos de zeolita natural, con la ayuda de un martillo geológico, el método empleado en la toma de las tobas es sencillo y confiable, las muestras seleccionadas en el yacimiento Caimanes fueron sometidas a un proceso de reducción de tamaño en dos etapas, primeramente de forma manual utilizando un mazo hasta obtener fragmentos de aproximadamente 100 mm; la segunda etapa se llevó a cabo en la trituradora de mandíbula que se muestra en la figura 2.3. Luego del proceso de trituración se usó la operación de cribado de control con dos tamices, superior a 10 mm y superior a 6,3 mm para el retenido.

La zeolita se sometió a un proceso de secado en la estufa que se muestra en la figura 2.6 a una temperatura de 105 °C para absorber la humedad dicha zeolita.

La metodología para determinar el contenido de humedad molar absoluta y másica se expone a continuación:

Se determinó los valores de la humedad absoluta molar del aire Y_s' (ecuación 2.1), con este valor, se multiplicó por la fracción de la masa molar del agua y la del aire. Se obtiene de este modo la humedad absoluta másica Y_s , según la expresión 2.2.

$$Y_s' = \frac{P_v(H_2O)}{(P_t - P_v(H_2O))}, \frac{kmol}{kmol} \quad (2.1)$$

$$Y_s = Y_s' \cdot \frac{M(H_2O)}{M(aire)}, \quad \frac{kg}{kg}$$

(2.2)

donde:

$P_v(H_2O)$ – presión de vapor del agua, Pa;

P_t – presión total del aire, Pa;

$M(H_2O)$ – masa molar del agua, $\frac{kg}{mol}$;

$M(aire)$ – masa molar del aire, $\frac{kg}{mol}$.

2.4.7 Metodología para la determinación de la humedad extraída

Para la determinación de la relación humedad-sólido se procedió con los siguientes pasos:

1. Se montó el deshumidificador con una cama de zeolita de 0,5 y 1 kg.
2. Se taró la muestra de sulfuro de níquel más cobalto a 0,5 y 1 kg en la balanza digital de la figura 2.7 y se cargó el secador de tambor rotatorio en la instalación experimental de la figura 2.8.
3. Se arrancó la fuente de aire y el motor del tambor del secador.
4. Cada 30 minutos se tomó una muestra de 12 a 13 g, se llevó al laboratorio y se determinó la humedad con el analizador de humedad que se muestra en la figura 2.4.

De este modo se obtuvo la humedad de la muestra y a partir de la relación 2.3 se determinó el contenido de sólido, luego se determinó la masa del sólido seco y la masa de agua evaporada mediante la expresión 2.4 y 2.5, una vez obtenidos los valores se determinó la relación humedad del sólido por la expresión 2.7.

$$\%S = 100\% - \%H \quad (2.3)$$

$$ms = \%S \cdot mi \quad (2.4)$$

$$ma = \%H \cdot mi \quad (2.5)$$

$$RHS = \frac{ma}{ms} \text{ o } RHS = \frac{\%H \cdot mi}{\%S \cdot mi} \quad (2.6)$$

Al simplificar el segundo miembro de la ecuación 2.6 se tiene que:

$$RHS = \frac{\%H}{\%S} = \frac{\%H}{100 - \%S} \quad (2.7)$$

donde:

$\%S$ – contenido de sólido, %;

$\%H$ – contenido de humedad, %;

ms – masa de sólido, g;

mi – masa inicial de la muestra, g;

ma – masa del agua, g.

$$RHS_1 = \frac{43,390}{100 - 43,390} \cdot \frac{\%}{\% - \%} \quad RHS_2 = \frac{42,410}{100 - 42,410} \cdot \frac{\%}{\% - \%}$$
$$RHS_1 = 0,766 \quad RHS_2 = 0,736$$

Del mismo modo se realizan los cálculos de la relación humedad-sólido.

2.4.8 Metodología para la determinación del poder de absorción de agua y adsorción de humedad de la zeolita natural de caimanes

2.4.8.1 Capacidad de absorción de la toba zeolitizada

Según estudio realizado (Batista Rubio.L, 2004), las máximas capacidades de absorción de agua de las tobas zeolitizadas del yacimiento de caimanes se lograron a una temperatura de 200 °C y su valor es de 26,17 %.

2.4.8.2 Determinación del poder de adsorción

Según la masa de zeolitas empleada se toma como base seca, con respecto a los estudios realizados (Cooney, 1998) el poder de adsorción de las zeolitas es de hasta el 25 % de su masa. De la misma forma se calcula, una vez agotada la zeolita, el poder de adsorción. Se pesaron en una balanza analítica digital las zeolitas agotadas y por la diferencia de pesadas se calculó aproximadamente la masa de agua retenida la que al dividirse por la masa de zeolita seca y multiplicada por 100 se obtuvo el valor buscado en %.

$$ma = mza - mzs \quad (2.8)$$

$$P_{AD} = \frac{ma}{mzs} \cdot 100 \quad (2.9)$$

donde:

ma – masa de agua, kg;

mza – masa de zeolita agotada, kg;

mzs – masa de zeolita seca, kg;

P_{AD} – poder de adsorción, %.

La transferencia de masa es la tendencia de uno o más componentes de una mezcla a transportarse desde una zona de alta concentración del o de los componentes a otra zona donde la concentración es menor.

2.4.9 Determinación del flujo de evaporación del agua hacia la zeolita

Según Castaño (2009), el flujo de evaporación se determina mediante la siguiente expresión:

$$W = V_{\text{evaporación}} \cdot M_s \quad (2.10)$$

donde

W – flujo de agua evaporada, $\frac{kg}{s}$;

$V_{\text{evaporación}}$ – velocidad de evaporación, $\frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ de sól seco} \cdot s}$;

M_s – masa de sólido contenido en el elemento de volumen, kg .

La velocidad de evaporación depende de cuatro variables: por una parte la velocidad y la temperatura y por otra la geometría del sólido y la humedad. Así se tiene que:

$V_{\text{evaporación}} = f(v_g, T, d, H)$ Al introducir las variables velocidad del gas y humedad

Se tiene:

$$M_s = t_{\text{retención}} \cdot F_s \quad (2.11)$$

donde

$t_{\text{retención}}$ – tiempo de retención del material en el tambor cilíndrico, s ;

F_s – flujo de sólido seco que atraviesa la sección, $\frac{kg}{s}$.

Se determina el tiempo de retención del material en el tambor

$$t_{\text{retención}} = \frac{0,23}{S \cdot N^{0,9}} \cdot \left[\left(\frac{L}{D} \right) \right] - 9,84 \cdot D_p^{-0,5} \cdot L \cdot \left[\left(\frac{G}{F} \right) \right] \quad (2.12)$$

donde

$t_{retención}$ – tiempo de evaporación, s;

S – pendiente del cilindro, adimensional;

N – velocidad de rotación del tambor cilíndrico, *r.p.m*;

D_p – diámetro de la partícula, en encaso nuestro del sulfuro, μm ;

G – flujo de gas, $\frac{kg}{s}$;

F – flujo de material sólido, $\frac{kg}{s}$

Se determina el flujo de gas

Se determina el flujo de sólido en el tambor

Se tiene:

$$F_s = w \cdot f$$

donde:

F_s – flujo de material sólido, $\frac{kg}{s}$;

w – velocidad lineal del sólido en el tambor, $\frac{m}{s}$; $4 < w < 8 \text{ m/s}$

f – área de la sección transversal, m^2 .

Se determina el área de la sección transversal

$$f = 0,785 \cdot d_{int}^2$$

donde

$$d_{int} = D_{ext} - 2 \cdot \delta_{cubierta}$$

Se determina la velocidad de evaporación

La velocidad de evaporación se determina mediante la siguiente expresión:

$$V_{\text{evaporación}} = (5,7 \cdot 10^{-6} \cdot H + 2,3110^{-7}) \cdot T_{gi} - (2,14 \cdot 10^{-5} \cdot H + 2,55 \cdot 10^{-6}) + [(1,49 \cdot 10^{-6} \cdot H + 6,37 \cdot 10^{-8}) \cdot T_{si} - (6,97 \cdot 10^{-5} \cdot H + 4,47 \cdot 10^{-6})] \cdot \sqrt{(v_g - 2)} \quad (2.13)$$

donde

H – humedad del sólido, $\frac{kg \text{ agua}}{kg \text{ sól} \cdot sec o}$;

v_g – velocidad del gas, $\frac{m}{s}$; $2 < v_g < 3 \frac{m}{s}$

T_g – temperatura de la corriente gaseosa (aire seco), $^{\circ}C$;

T_s – temperatura del sólido, $^{\circ}C$.

Durante el período de pruebas experimentales la humedad relativa del aire se mantuvo de 73 a 77 % y la temperatura del bulbo seco de 25 a 36 $^{\circ}C$ y la del bulbo húmedo de 26 a 27

2.5 Software utilizado para el análisis de resultados

Para el análisis estadístico de los resultados obtenidos en las pruebas experimentales, se utilizó el software STATGRAPHICS. El mismo se empleó para determinar la influencia de las variables en la investigación y el modelo estadístico matemático. El Excel, se empleó como hoja de cálculo de las expresiones necesarias para determinar la relación humedad sólido y para realizar los gráficos. El Microsoft encarta matemática, 2009 se empleó para realizar algunos cálculos.

Conclusión del capítulo 2

- ✚ Se expusieron los materiales, métodos y metodologías empleadas en la investigación
- ✚ Se realizó el diseño de experimentos susceptible de procesar estadísticamente los resultados.
- ✚ Se describió la instalación realizada para llevar a cabo la investigación.
- ✚ Se describió las propiedades físicas de los materiales, utensilios y herramientas empleados durante la investigación.

CAPÍTULO 3 ANALISIS Y DISCUCIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Análisis tecnológico de los resultados

En la figura 3.1 se muestra el gráfico obtenido del régimen de secado de la torta de sulfuro mixto de níquel y cobalto.

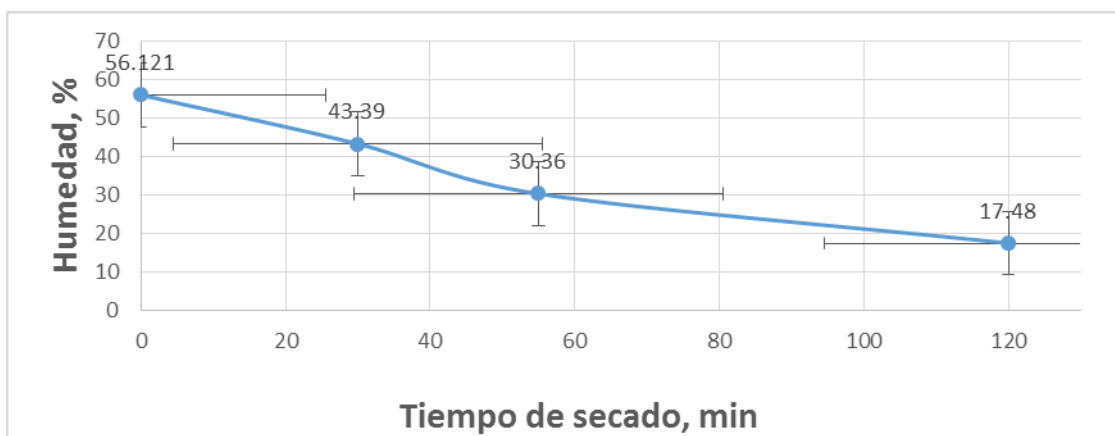


Figura 3.1 Régimen de secado de la torta de sulfuro de níquel y cobalto

Se evidencia que a partir de dos horas de exposición al secado se logra disminuir la humedad de la torta hasta el 17,48 %, y posterior a ese tiempo las tendencias sugieren que la humedad del material permanecerá prácticamente constante e inferior al 10 %. Este último valor es la referencia que determina la calidad del producto para ser comercializado.

De esta gráfica se evidencia que las zonas dónde el secado ocurre más rápidamente es en el primer período desde 0 a 55 min, donde se elimina el 25,761 % de humedad, mientras que a tiempos superiores y hasta 120 min solo se reduce la humedad en 12,88 %. Estos comportamientos son congruentes con las pendientes de la curva en los dos periodos antes mencionados, la cual es mayor para el primer periodo.

3.1.2 Comportamiento de la carga de zeolita

En la figura 3.2 se muestra la influencia de la carga de zeolita en el proceso de secado.

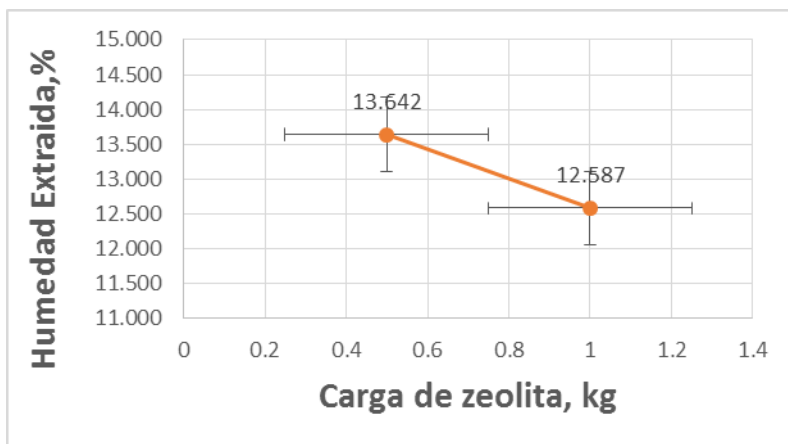


Figura 3.2 Influencia de la carga de zeolita en el secado

La figura muestra que al cargar el tambor de deshumidificación con 0,5 kg de zeolita natural, se extrae una humedad de 13,646 % y al cargar con 1 kg se obtiene 12,587 %, queriendo decir que a medida que se incrementa la carga de zeolita no hay una influencia significativa en la deshumidificación del aire, debido entre otros factores al poco tiempo de permanencia del aire en el interior del deshumidificador. Además, el comportamiento anterior puede ser atribuido al hecho de que el incremento de la carga de zeolita no necesariamente incrementa la superficie de intercambio de masa en el deshumidificador dadas las características específicas de la instalación. Lo que conlleva a plantearse que en condiciones mínimas de carga de zeolita es posible un secado adecuado desde los puntos de vista técnico y también económico, todo ello para las condiciones investigadas.

Desde el punto de vista industrial el gasto energético es menor puesto que se utilizó 12 kg de zeolita, un flujo de aire y una carga de sulfuro como materiales. Estos minerales con virtudes de adsorción de gases, se pudo corroborar que el grado de adsorción es superior al 30 % de su masa, es decir para las muestras de 12 kg de tobas zeolitizadas se logró adsorber 3,6 kg de agua.

3.1.3 Comportamiento de la carga de sulfuro mixto

En la figura 3.3 se muestra la influencia de la carga de sulfuro en el proceso de secado.

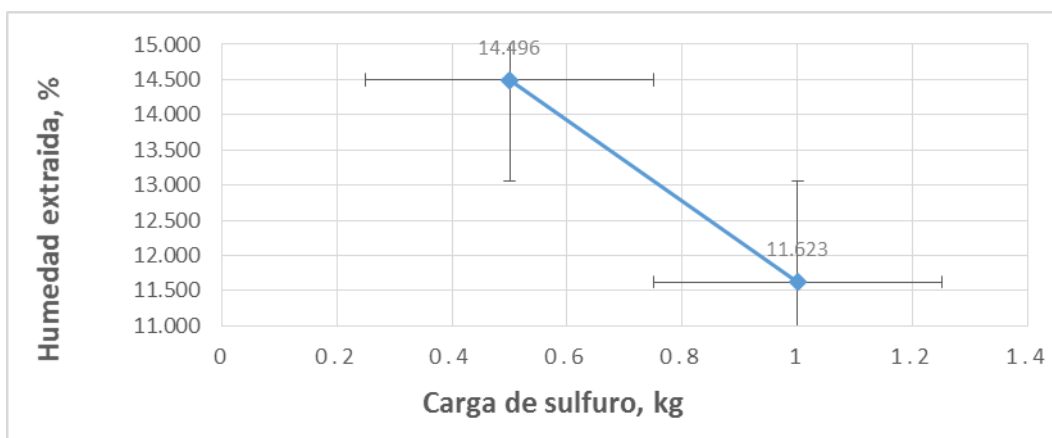


Figura 3.3 Influencia de la carga de sulfuro en el secado

Como se observa en la figura, con cargas de sulfuro de 0,5 y 1 kg, se logra extraer cantidades de humedad de 14,496 y 11,623 %, respectivamente. Además, a medida que se incrementa la carga de sulfuro en el tambor rotatorio de secado, se disminuye considerablemente la cantidad de humedad extraída, debido a que se incrementa el espesor de la capa de material expuesta a secado y, por consiguiente, se reduce la velocidad de secado.

3.1.4 Comportamiento de la granulometría de la zeolita

En la figura 3.4 se muestra la influencia de la granulometría de la zeolita en el proceso de secado.

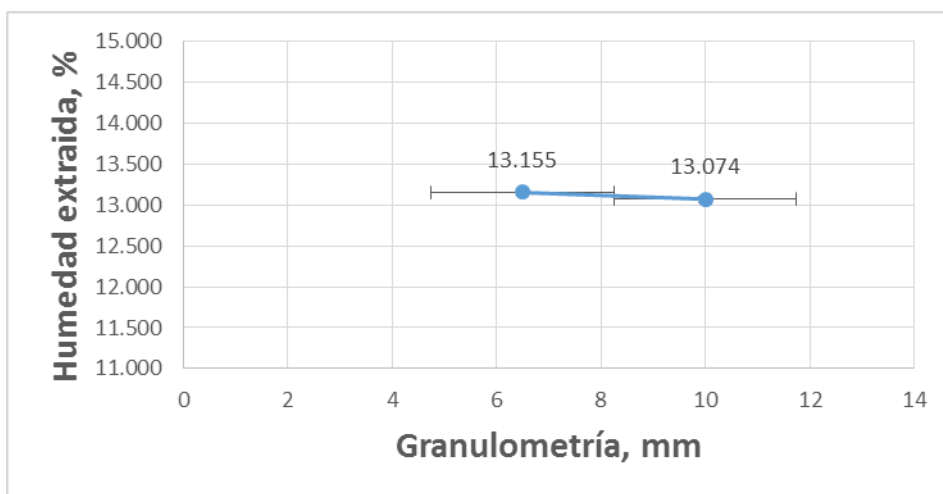


Figura 3.4 Influencia de la granulometría de la zeolita en el secado

En la figura se puede observar la influencia de la granulometría sobre el secado del sulfuro de níquel y cobalto. Al utilizar las granulometrías de 6,3 y 10 mm se extrae 13,155 y 13,074 % de

humedad respectivamente. Al variar la granulometría de la zeolita, el secado se mantiene prácticamente constante, pues se tiene una diferencia de 0,081 % de humedad extraída, lo que puede considerarse poco significativo en los rangos de estudio.

3.1.5 Comportamiento del flujo de aire

En la figura 3.5 se expone la influencia del flujo de aire en el proceso de secado.

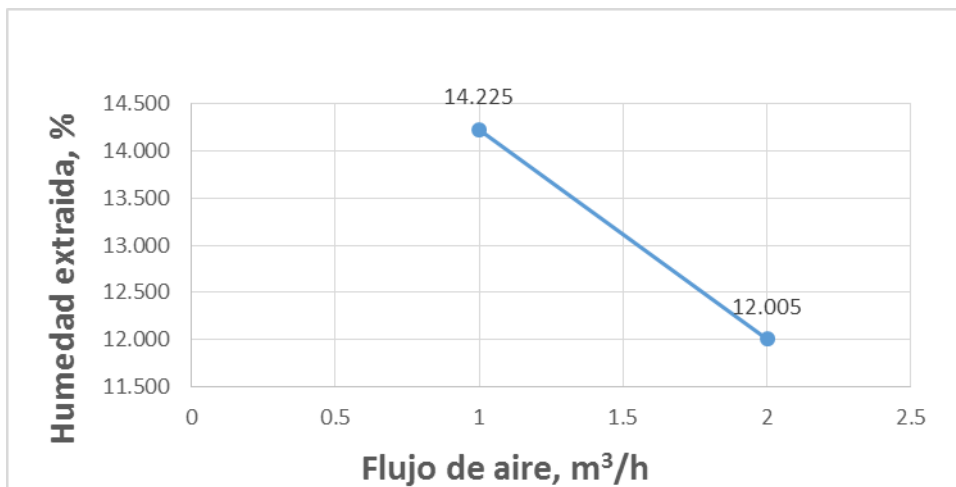
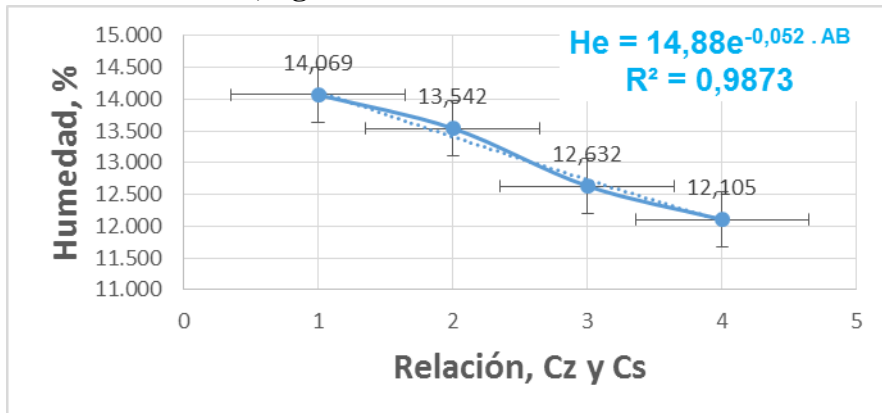


Fig. 3.5 Influencia del flujo de aire en el secado.

Se observa que el flujo de aire tiene una influencia significativa en el proceso de secado. Puesto que con un flujo de 10 y 30 m³/h se logra extraer unos 14,225 y 12,005 % de humedad respectivamente sin embargo el incremento del flujo de aire tiene un efecto negativo en el proceso, pues tiende a reducir la humedad extraída, debido a que no existe una adecuada difusión de la fase gaseosa en el sulfuro mixto de níquel y cobalto.

Tecnológicamente el tambor secador no presenta elementos elevadores lo que impide la buena difusión del aire deshumidificado.

3.1.6 Influencia de la interacción carga de zeolita (Cz) y la carga de sulfuro (Cs) sobre la humedad extraída, figura 3.6



Nota: 1-mínimo y mínimo, 2-máximo y mínimo, 3-mínimo y máximo, 4-máximo y máximo.

Figura 3.6 Interacción de la humedad contra la relación Carga de zeolita y Carga de sulfuro

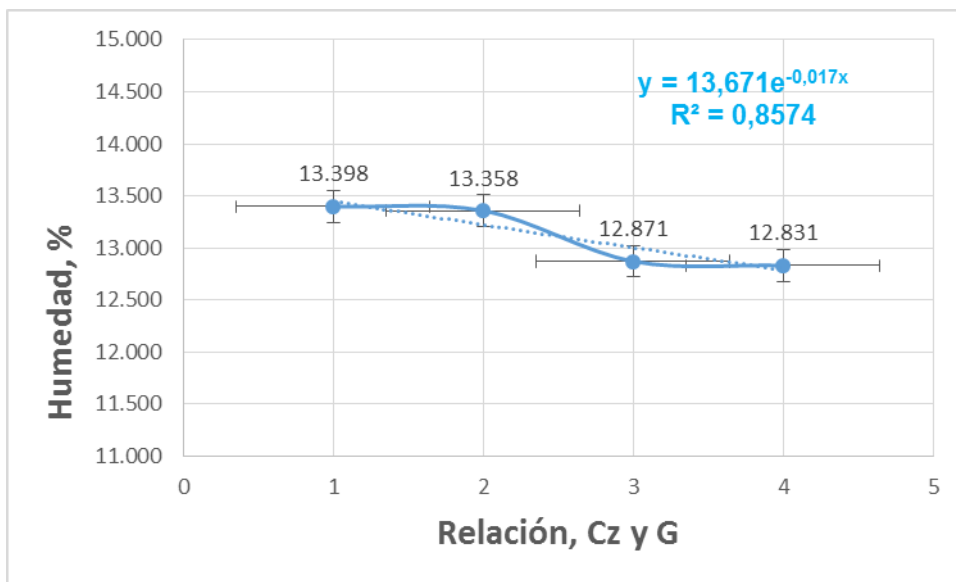
Según se observa, cuando la carga de zeolita y de sulfuro es mínima, se extrae una humedad de 14,069 %, cuando la carga de zeolita es máxima y la carga de sulfuro es mínima se extrae una humedad de 13,542 %, cuando la carga de zeolita es mínima y la carga de sulfuro es máxima se extrae una humedad de 12,632 % y cuando ambas cargas son máximas se extrae una humedad de 12,105 %. A menor carga hay mayor extracción de humedad porque hay mayor superficie de contacto entre el aire y el sulfuro.

En el proceso de secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto con aire atmosférico deshumidificado previamente, existe un elemento común entre ambas etapas “el flujo de aire”, donde el proceso principal depende en gran medida de su flujo, es decir, aunque exista una elevada carga de zeolita, si el flujo es alto el tiempo de retención del aire en la capa zeolitica es bajo por lo que también sería baja la deshumidificación y el secado posterior, mientras que a flujos donde aumente su tiempo de retención la deshumidificación es mayor aunque la carga de zeolita sea pequeña.

Como producto de la experimentación se demostró que la variabilidad de la carga de zeolita desde 0,5 a 1 kg no influye significativamente en la deshumidificación y posteriormente en el secado.

3.1.7 Influencia de la interacción carga de zeolita (Cz) y la granulometría de la zeolita (G) en la humedad extraída

En la figura 3.7 se muestra la influencia de la humedad con la relación carga de zeolita y la granulometría de la zeolita.



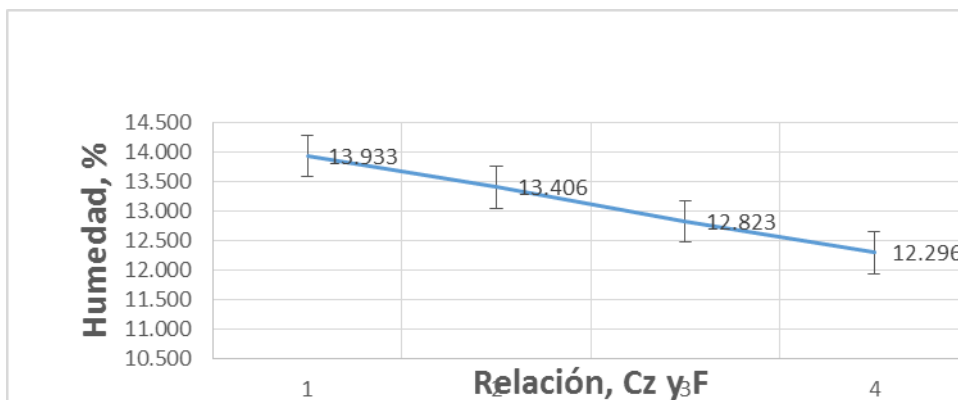
Nota: 1-mínimo y mínimo, 2-máximo y mínimo, 3-mínimo y máximo, 4-máximo y máximo.

Figura 3.7 Influencia de la humedad y la relación Carga de zeolita y Granulometría de la zeolita

Se observa la influencia de la relación Carga de zeolita y la granulometría sobre la humedad extraída. Como se puede ver, cuando la carga de zeolita y sulfuro es mínima, se extrae una humedad de 13,358 % y cuando ambas cargas son máximas se extrae una humedad de 12,831 %. Aquí la diferencia en el secado es mínima por lo que muestra que la interacción entre la granulometría y la carga de zeolita no influye considerablemente en el proceso de secado, porque la variabilidad de humedad entre los puntos máximos y mínimos es de 1,148 %.

3.1.8 Influencia de la carga de zeolita (Cz) y el flujo de aire (F) sobre la humedad

En la figura 3.8 se muestra la influencia de la relación entre la carga de zeolita y el flujo de aire sobre la humedad.



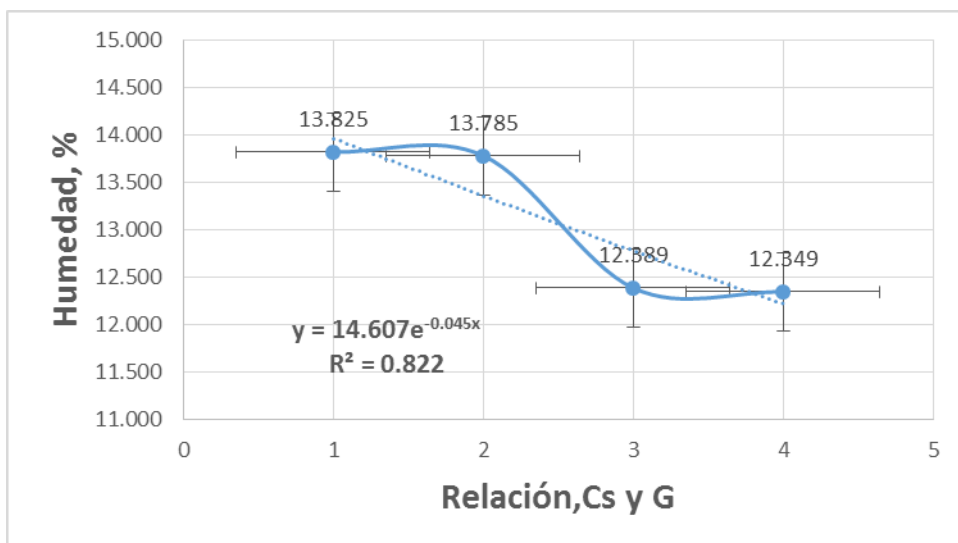
Nota: 1-mínimo y mínimo, 2-máximo y mínimo, 3-mínimo y máximo, 4-máximo y máximo.

Figura 3.8 Influencia de la relación carga de zeolita y flujo de aire en la humedad

Cuando ambos parámetros son mínimos se extrae el 13,933 % de humedad y cuando ambos son máximos se extrae el 12,296 %. Como se puede observar hay una tendencia lineal decreciente, ya que con el aumento de ambos parámetros disminuye la humedad extraída queriendo estos decir que existe una mayor interacción del aire y la zeolita cuando existe un mayor tiempo de residencia de éste, aumentando la interacción entre ambas fases.

3.1.9 Influencia de la carga de sulfuro (Cs) y la granulometría de la zeolita (G) sobre la humedad

En la figura 3.9 se muestra la influencia de la carga de sulfuro y la granulometría de la zeolita en la humedad.



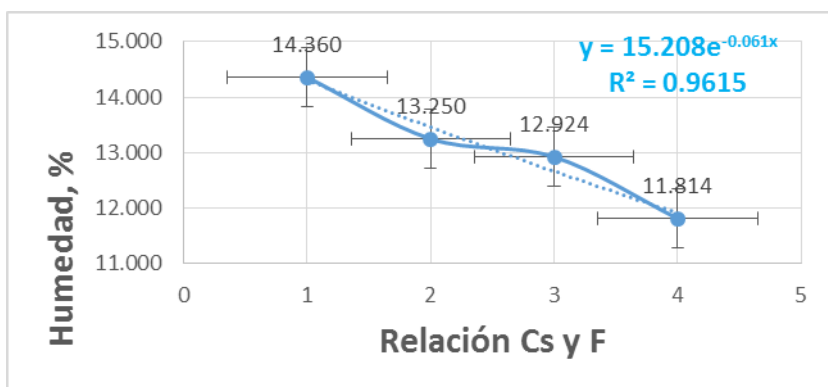
Nota: 1-mínimo y mínimo, 2-máximo y mínimo, 3-mínimo y máximo, 4-máximo y máximo.

Figura 3.9 Influencia de la relación carga de sulfuro y la granulometría en la humedad

Se observa la influencia de la relación Carga de sulfuro y la granulometría sobre la humedad extraída. Como se puede ver, cuando la carga de sulfuro y la granulometría son mínimas, se extrae una humedad de 13,825 % y cuando ambos parámetros son máximas se extrae una humedad de 12,349 %. Aquí la diferencia en el secado es significativa por lo que muestra que la interacción entre la granulometría y la carga de sulfuro influye considerablemente en el proceso de secado, porque la variabilidad de humedad entre los puntos máximos y mínimos es de 1,5 %.

3.1.10 Influencia de la carga de sulfuro (Cs) y el flujo de aire (F) sobre la humedad

En la figura 3.10 se muestra la influencia de la relación carga de sulfuro y flujo de aire sobre la humedad.



Nota: 1-mínimo y mínimo, 2-máximo y mínimo, 3-mínimo y máximo, 4-máximo y máximo.

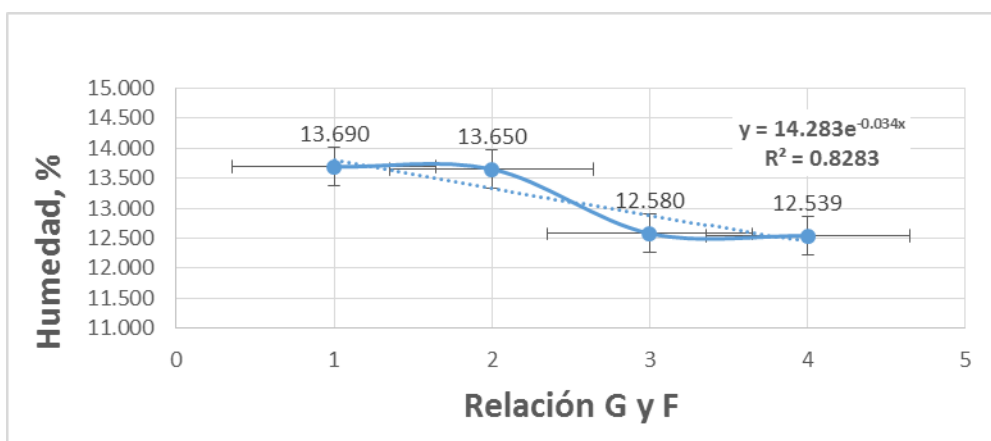
Figura 3.10 Influencia de la relación carga de sulfuro y flujo de aire sobre la humedad

Se evidencia en esta figura la influencia de la relación Carga de sulfuro y flujo de aire sobre la humedad extraída. Como se puede observar, cuando la carga de sulfuro y el flujo son mínimas, se extrae una humedad de 14,360 %, y cuando ambos parámetros son máximos se extrae una humedad de 11,814 %. Aquí la diferencia en el secado es la máxima entre todas las interacciones estudiadas. Esto se debe a que a menor flujo de aire y a menor carga de zeolita hay mayor tiempo de retención del aire en el deshumidificador, lo que aumenta la interacción entre el aire y el agente deshumidificador, por consiguiente hay mayor transferencia de masa entre el aire y la zeolita, lo que aumenta la deshumidificación del aire y la humedad extraída,

por también existir una mayor superficie de contacto y retención del aire, además de que la capa del sulfuro es pequeña y con ello aumenta la difusión del agente gaseoso.

3.11 Influencia del flujo de aire (F) y la granulometría de la zeolita (G) sobre la humedad

En la figura 3.11 se expone la influencia del flujo de aire y la granulometría de la zeolita sobre la humedad.



Nota: 1-mínimo y mínimo, 2-máximo y mínimo, 3-mínimo y máximo, 4-máximo y máximo.

Figura 3.11 Influencia de la relación granulometría y flujo de aire sobre la humedad

Se observa la influencia de la relación granulometría y flujo de aire sobre la humedad extraída. Como se puede observar, cuando la granulometría y el flujo de aire son mínimos, se extrae el 13,690 % de humedad en el sulfuro y cuando ambos parámetros son máximas se extrae una humedad de 12,539 %. Aquí la diferencia en el secado es mínima por lo que muestra que la interacción entre la granulometría y el flujo de aire no influye considerablemente en el proceso de secado, porque la variabilidad de humedad entre los puntos máximos y mínimos es de 1,2 %.

Para el análisis estadísticos se consideró primeramente la valoración integral de todas las variables de estudio en el rango analizado, mostrándose en el gráfico de Pareto (figura 3.12) que las variables e interacciones influyentes en el proceso de secado son: la carga de sulfuro, el flujo de aire y la interacción flujo:granulometría.

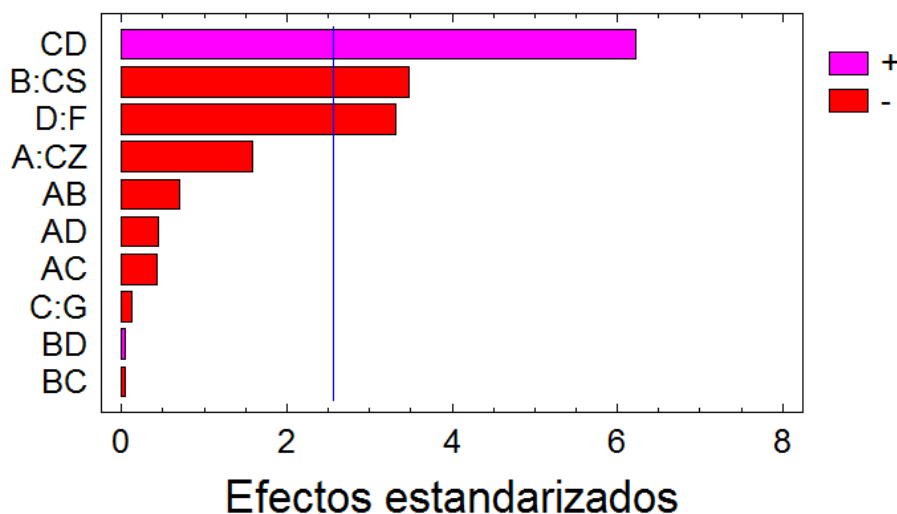


Figura:3.12 Gráfico de Pareto estandarizado para He.

También se demuestra lo antes expuesto según el análisis de probabilidad normal mostrado en la figura 3.13, donde las variables más cercanas a la curva no son representativa, siendo las significativas el flujo de aire, la carga de sulfuros y la interacción Granulometría:Flujo.

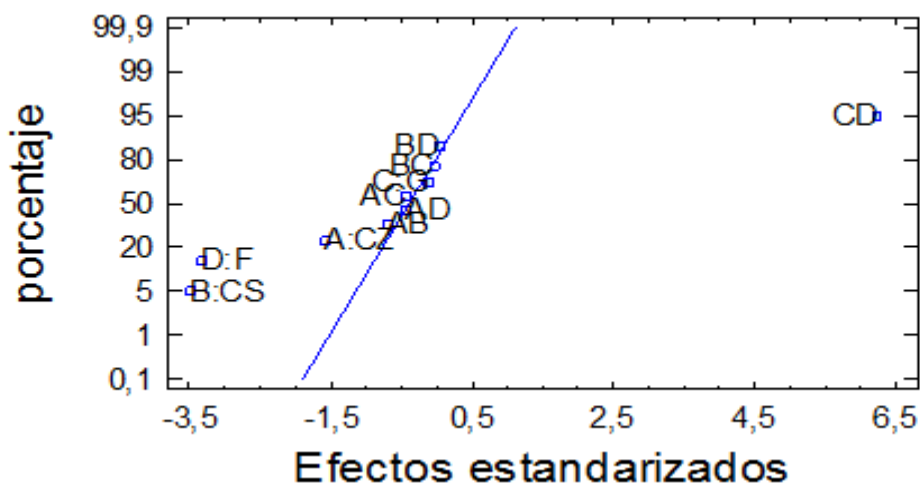


Figura:3.13 Grafico de probabilidad normal

Para un trabajo con mayor exactitud se excluye del análisis todas las variables de entrada no significativas, por lo que los resultados se muestran a continuación.

Tabla 2.4: Efectos estimados para He

Variablese interacciones	Efecto	Error
promedio	13,1149	+/- 0,279522
B:CS	2,33075	+/- 0,559044
D:F	2,22025	+/- 0,559044
Granulometría :Flujo (CD)	4,15825	+/- 0,559044

La tabla muestra cada uno de los efectos estimados e interacciones, también se muestra el error normal de cada uno de los efectos, el cual mide su error de muestreo.

La figura 3.14 se muestra el análisis de Pareto, totalmente relacionado con la tabla 2.4.

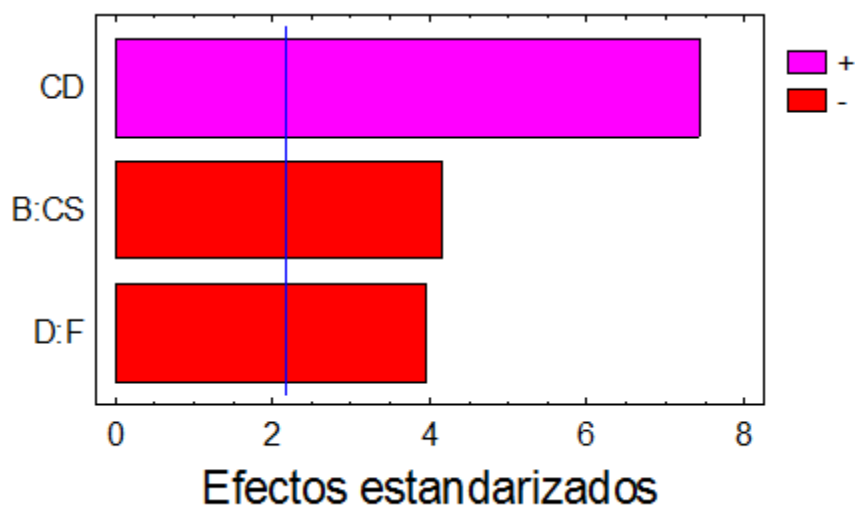


Figura 3.14: Gráfico de Pareto estandarizado para He.

Donde se observa gráficamente los principales efectos e interacciones del proceso de secado, donde de manera decreciente; la interacción Granulometría:Flujo, es el término más influyente de manera positiva, ya que existe una variabilidad en la humedad perdida al variar en sus niveles el Flujo y la Granulometría (cruce de las rectas) como se muestra en la figura 3.15.

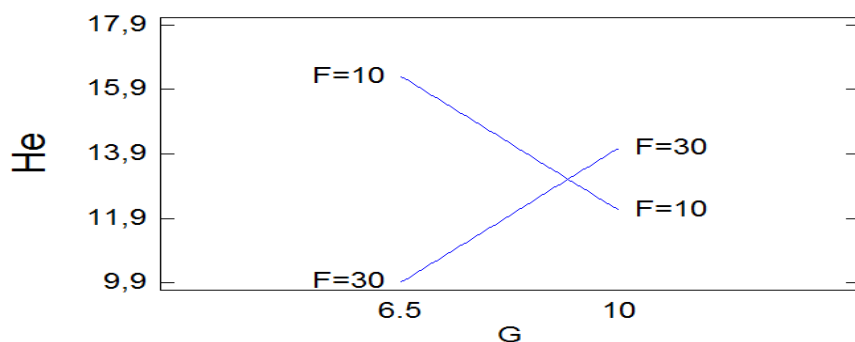


Figura 3.15: Gráfico de interacciones para He.

mientras que la carga de sulfuros y el flujo son los siguientes parámetros pero lo hacen de manera negativa, como se muestra en la figura 3.16, es decir, cuando hay un incremento de la carga del sulfuro o del flujo de aire, hay una disminución de la humedad extraída.

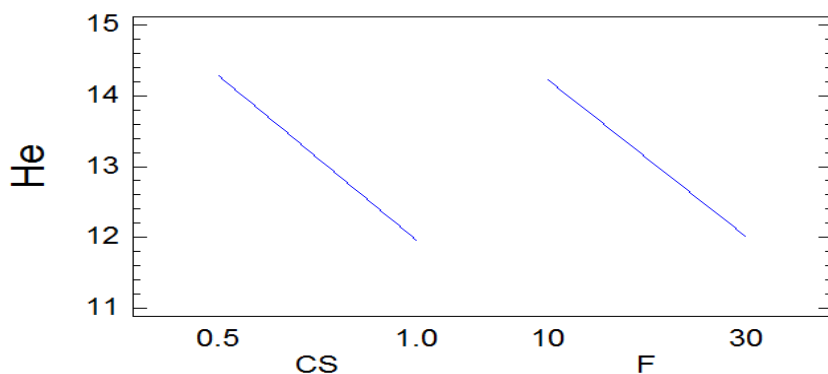


Figura 3.16: Gráfico de efectos principales para He

Análisis de la Varianza para He

Tabla:2.5 Análisis de la varianza y los errores posibles

Variables	Suma de Cuadrados	Cuadrado medio	F-Ratio	P-Valor
Cs	21,7296	21,7296	17,38	0,0013
F	19,718	19,718	15,77	0,0019
CD	69,1642	69,1642	55,33	0,0000
Error Total	15,0014	1,25012		

R-cuadrado = 88,0574 %

R-cuadrado (ajustado) = 85,0718 %

Error Estándar de Est. = 1,11809

Error absoluto de la media = 0,797031

Estadístico Durbin-Watson = 3,1582 (P=0,0007)

La tabla de ANOVA divide la variabilidad en Hp en distintos segmentos separados para cada uno de los efectos. Probada la significación estadística de cada efecto comparando la media al cuadrado contra una estimación del error experimental. En este caso, los tres efectos tienen los p-valores inferiores a 0,05; indicando que son significativamente diferentes de cero al 95,0 % de nivel de confianza.

El estadístico R-cuadrado indica que el modelo así ajustado explica el 88,0574 % de la variabilidad en He. El estadístico R-cuadrado ajustado, el cual es más adecuado para la comparación de números diferentes de variables independientes, es 85,0718 %. El error estándar de la estimación muestra la desviación normal de los residuos para ser 1,11809. El error absoluto de la media (MAE) de 0,797031 es el promedio del valor de los residuos. El estadístico Durbin-Watson (DW) examina los residuos para determinar si hay cualquier correlación significativa basada en el orden en el que se suceden en el fichero de datos. Puesto que el p-valor es inferior a 0,05; hay indicios de una posible correlación de serie.

A continuación se muestra la ecuación de la regresión que se ha ajustado a los datos. La ecuación del modelo ajustado es:

$$He = 38,434 - 4,662 \cdot CS - 2,376 \cdot G - 1,091 \cdot F + 0,119 \cdot G \cdot F$$

siendo los valores de las variables especificados en sus unidades originales.

Tabla:2.6 Resultado de la humedad extraída luego del ajuste del modelo estadístico

Fila	Valor observado	Valor ajustado	Inf. 95,0 % CL para la Media	Sup. 95,0 % CL para la Media
1	16,221	17,4695	16,2514	18,6876
2	18,121	17,4695	16,2514	18,6876
3	15,911	15,1388	13,9207	16,3568
4	15,125	15,1388	13,9207	16,3568
5	14,155	13,3113	12,0932	14,5293
6	13,122	13,3113	12,0932	14,5293
7	12,131	10,9805	9,76245	12,1986
8	9,014	10,9805	9,76245	12,1986
9	12,920	11,091	9,87295	12,3091
10	9,971	11,091	9,87295	12,3091
11	9,097	8,76025	7,5422	9,9783
12	7,876	8,76025	7,5422	9,9783
13	14,991	15,2493	14,0312	16,4673
14	14,741	15,2493	14,0312	16,4673
15	13,711	12,9185	11,7004	14,1366

16	12,731	12,9185	11,7004	14,1366
----	--------	---------	---------	---------

En la tabla se muestran los resultados luego de haber sido simulado sobre el modelo ajustado, lo que permite predecir el comportamiento del proceso de secado por valores puntuales.

La tabla contiene información sobre los valores de He que se han generado usando el modelo ajustado. La tabla incluye:

- (1) el valor observado de He
- (2) el valor pronosticado de Hp utilizando el modelo ajustado
- (3) 95,0 % limites de confianza para la respuesta media

Cada item corresponde a los valores de los factores experimentales en una fila específica de su fichero de datos del diseño de experimentos.

Empleando el modelo estadístico ajustado, en las condiciones de estudio se logra optimizar en valores máximos de 17,4695 %, donde los valores óptimos de las variables son:

$C_z = 0,5$ kg; $C_s = 0,5$ kg; $G = 6,3$ mm y de un $F = 10,0$ m³/h .

Para tener una percepción mayor de los valores más aceptables del secado en la siguiente figura se muestra una superficie de respuesta del proceso.

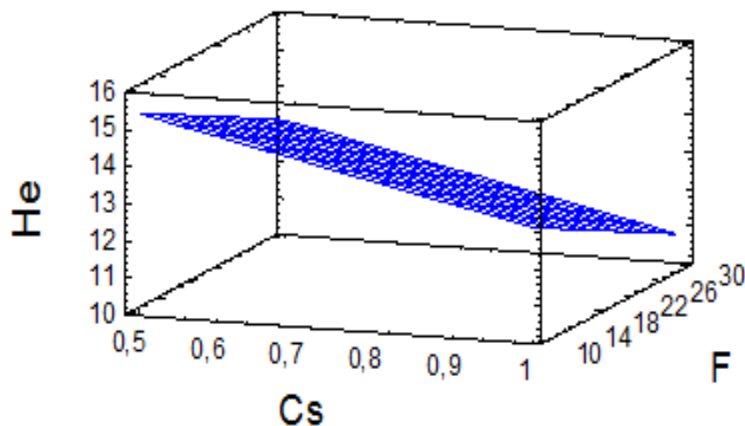


Figura 3.17: superficie de respuesta estimada.

3.4 Valoración Económica

En la actualidad la empresa tiene una pérdida de 235 a 250 t/años de sulfuro de níquel y cobalto, al implementar el secado natural.

Según el precio del níquel del boletín de precio diario del mercado del ministerio de comercio y la inversión extranjera el precio del níquel es de 15 674,86 USD/t y 7,11 USD/t

Al multiplicar las 235 t de sulfuro que se pierden por el precio de la tonelada se obtiene: 3 683 592,1 USD. Al multiplicar este valor por 0,98 se tiene una ganancia de 3 609 920,258 CUC y al multiplicar el mismo por 24 se obtiene un ahorro de 86 638 086,19 CUP.

3.5 Valoración Medioambiental



Figura 3.18 Área de secado de sulfuros de níquel y cobalto

El área principal de la planta metalúrgica Ernesto Guevara de la Serna, se localiza al Noroeste de la provincia de Holguín, a 6 km al este - sureste de la ciudad de Moa, en la margen oriental del río del mismo nombre, a menos de 400 m del litoral Atlántico. Otros objetos de obra de la planta se localizan en su periferia.

El hecho de formar parte toda la concesión minera de las cuencas de los ríos Moa, Yagrumaje, Punta Gorda y Cayo Guam, establece una distribución hipsométrica bastante homogénea, con alturas por encima de los 200 y hasta 365 m , que descienden abruptamente hacia el este, en dirección al cañón del Río Moa, y más gradualmente, hacia el oeste y el norte, lo que propicia el predominio de relativamente buenas condiciones de humedecimiento y la fuerte y persistente influencia de los vientos del primer cuadrante.

La mayoría de los geosistemas presentes en el área de la concesión (geosistemas tecnógenos mineros) muestran un alto grado de modificaciones antropogénicas originadas por la explotación minera, que eliminó en su totalidad los componentes bióticos (vegetación y suelos) y alteró profundamente los componentes abióticos (relieve y corteza de intemperismo), por lo que los geosistemas seminaturales están restringidos a las áreas periféricas a la explotación, con fuertes pendientes y los valles fluviales. Se definen además algunas áreas con geosistemas seminaturales revegetados con especies forestales y herbáceas, producto de la rehabilitación parcial de algunas áreas minadas. En el área de la Planta predominan los geosistemas antrópicos - tecnógenos industriales y civiles.

En la periferia, de la Planta, predominan los geosistemas seminaturales terrestres y marinos, fundamentalmente las llanuras costeras con restos de vegetación de bosques y matorrales secundarios, las áreas de llanuras bajas transformadas por la construcción de los diques, donde la vegetación original de manglar ha sido sustituida por plantas acuáticas, típicas de humedales costeros y especies introducidas, los pianos aluviales bajos con vegetación ribereña e influencia de las mareas, los ambientes deltaicos, en las desembocaduras de los ríos Moa, Yagrumaje, Punta Gorda y Cayo Guam con vegetación de manglar y por último, la bahía de Cayo Moa y al norte, la barrera arrecifes. En resumen, la instalación de secado de sulfuros estará ubicada en el área industrial asociada a una actividad antrópica periódica dentro del geosistema tecnógeno Industrial por lo que desde el punto de vista de la flora y fauna, no posee ningún valor natural. Dentro. Se debe señalar que las residencias más cercanas se encuentran a 6 km de distancia en dirección este y oeste.

Tipo de actividad a ejecutar al aplicar el secado con aire deshumidificado

Es un Proyecto de Inversión consistente en el montaje de un secador industrial para el secado de Sulfuros mixtos de Ni y Co. El proyecto forma parte del Programa para incrementar la producción de cobalto de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Esta nueva tecnología asegura calidad de deposición de materiales dañinos al medio, sin pérdidas de sólidos y gases purificados con menos de 20 mg/m^3 de NH_3 en 8 horas de exposición. Durante la operación de la instalación de secado de sulfuros no se generan residuos sólidos de ningún tipo.

Principales impactos ambientales previstos, tanto positivos como negativos. Riesgos ambientales posibles. Sistemas a emplear para su monitoreo.

Se realizó la identificación de las actividades o acciones que se realizarán durante las distintas fases de ejecución del proyecto, susceptibles de provocar impactos, los cuales fueron resumidos, para la confección de la matriz de identificación y evaluación de impactos.

Componentes ambientales e impactos que afectan:

A. AIRE.

- Aumento del nivel de ruido, por el tráfico y la operación de equipos.
- Disminución de los niveles de emisiones del polvo y gases anhidros a la atmósfera y ruido a partir de la conclusión de los trabajos.

B. CALIDAD DE LAS AGUAS

- Cambios de la composición físico-geológica de las aguas de escurrimiento superficial debido a la contaminación por aumento de sólidos en suspensión durante la fase de limpieza.
- Disminución del área de infiltración de las aguas subterráneas en la zona de distribución.

C. SUELOS

- Aumento de la erosión por remoción del suelo.
- Disminución de la erosión por compactación y rehabilitación del terreno.

D. SOCIOECONÓMICO

- Aumento de la producción.
- Disminución de la afectación a la calidad del aire a la población en los alrededores de la actual instalación de la nave de secado de sulfuros.

Las componentes ambientales de vegetación, fauna y paisaje no se analizan porque la obra no provoca en ellos afectación alguna, debido al deterioro actual que existe en estas componentes ambientales: el área es industrial y está afectada por los años de explotación de la fábrica, las áreas aledañas a la instalación se encuentran deforestadas.

Programa de monitoreo

Se incluirá en el gráfico de monitoreo de la empresa las actividades de seguimiento siguientes:

- a) Monitoreo periódico de la calidad del aire en los puestos de trabajo de NH_3 y SO_2 .
Frecuencia mensual.
- b) Monitoreo periódico de la concentración de NH_3 y SO_2 en los gases de salida del secador.
Frecuencia mensual.

En la tabla 2.7 se muestran los valores establecidos de concentración de los gases en la instalación industrial por las norma cubanas NC: 93-02-202 y la NC-19-01-63 aire en la zona de trabajo, límite admisible de sustancias nocivas y concentración promedio admisible de estos gases para la jornada laboral de 8 horas los siguientes valores, NC 39 calidad del aire, requisitos higiénicos sanitarios.

Tabla 2.7 Valores establecidos por las norma cubanas NC 10-01-02 de concentración de los gases en el lugar de trabajo

Sustancia	U/M	Norma	Valor máx.
SO_2	mg.m^{-3}	10	1,0
NH_3	mg.m^{-3}	20	25,2
H_2S	mg.m^{-3}	10	2,8
NC 10-01-02 Aire de la zona de trabajo - requisitos higiénicos sanitarios			
Generales.			

Al implementar el secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto con el aire atmosférico deshumidificado con zeolita natural, se logra disminuir las emisiones de gases amoniacales y otros contaminantes al medio ambiente y la humanización del trabajo.

Conclusión del capítulo 3

- Se caracterizó físicamente el sulfuro de níquel y cobalto con una humedad promedia de 56,121 %.
- Se realizó el análisis estadístico de las variables de entrada y de salida. El mismo mostró que la relación humedad extraída y la carga de sulfuro, el flujo de aire y la interacción entre la granulometría y el flujo de aire son los más significativos, y son los que influyen

en el modelo estadístico. El modelo matemático estadístico ajustado que representa el proceso se muestra a continuación:

$$HE = 38,434 - 4,662 \cdot CS - 2,376 \cdot G - 1,091 \cdot F + 0,119 \cdot G \cdot F.$$

- Al eliminar las pérdidas de sulfuro de níquel y cobalto al emplear la tecnología usada en esta investigación se obtiene un ahorro de 86 638 086,19 CUP, es decir, 3 609 920,258 CUC.
- Al implementar el secado con el aire deshumidificado se logra disminuir las emisiones de gases amoniacales y otros contaminantes al medio ambiente.
- La tecnología de la investigación es limpia, económicamente factible y mejora las condiciones del trabajador.

Conclusión general

Al finalizar el proyecto se arrojan las siguientes conclusiones:

- ✚ Se realizó el análisis tecnológico y estadístico del proceso de secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto con aire deshumidificado con zeolita natural y se demostró que las variables de entradas significativas de manera decreciente en proceso fueron la interacción granulometría flujo, la que posee un carácter positivo sobre la humedad extraída, mientras que la carga de sulfuro (B) y flujo de aire (D) inciden negativamente, es decir, a medida que aumentan estos parámetros existe una disminución de la cantidad de humedad extraída, mostrándose según el siguiente modelo estadístico ajustado:

$$He = 38,434 - 4,662 \cdot CS - 2,376 \cdot G - 1,091 \cdot F + 0,119 \cdot G \cdot F .$$

Recomendaciones

- ✚ Experimentar el tiempo de saturación de las Zeolitas y su reactivación.
- ✚ Llevar a escala piloto la investigación y experimentar en otras condiciones paramétricos.

Bibliografía

1. Batista Rubio, L, 2004. Empleo de las tobas zeolitizadas como material absorbente, para la contribución a la protección ambiental en el proceso de secado de sulfuros de níquel más cobalto del proceso caron. ismm, Moa Cuba.
2. Beatón. 1998. Caracterización de muestras de sulfuros de níquel y cobalto secados en atmósfera inerte y atmosférica. ISMMM.
3. Blet, Sánchez. 1996. Secado atmosférico de los sulfuros de níquel y cobalto. CEINNIQ.
4. Caballero, col. 1992 secado estático de los sulfuros de níquel y cobalto con recirculación de aire caliente, en un horno vertical con gas pobre. Empresa Comandante René Ramos Latour.
5. Capote. 1998. Análisis realizado sobre la oxidación de los sulfuros de níquel y cobalto. CEINNIQ.
6. Castaño, F & Rubio, F.R y Ortega, M.S. 2009. Modelado de secaderos rotatorios en isocorriente, sevilla, España, pp 32-43.
7. Colectivo de autores (1995), Informe técnico del Departamento de Investigación de la empresa Comandante René Ramos Latour.
8. Cooney, D. O. 1998. Adsorption design for water waste treatment. Lewis Publisher, Washington, D.C. USA.
9. Dyer, A. 1988. An Introduction to Zeolite Molecular Sieves, John Wiley & Sons Ltd, New York, USA.
10. FERREIRA, S. & COSTA, A. 2009: Parámetros de transferencia de materia en el secado de frutas. Informe tecnológica 20(2):89-104.
11. HERNADEZ, J & QUINTO, P. 2005: Secado de medios porosos: una revisión a las teorías actualmente en uso. Científica 9 (2):63-71.
12. Kasatkin A. 1985. Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. T-II.

/pág. 262-366.

13. LEGRA, A. 2010: Automatización del control del cálculo de extracciones en la mina de la empresa niquelífera Ernesto Che Guevara. *Minería y Geología* 26(2): 55-73. consultado: 03 de abril de 2014. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamq>.
14. Leyva Ramos, R, M.A. Sánchez Castillo, M.V. Hernández Sánchez y R.M. Guerrero Coronado. 2001. Remoción de Metales Pesados de Solución Acuosa por medio de Clinoptilolitas Naturales, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, 17(3), 129-136.
15. Lobaina. O. 1994. Reporte técnico. Secado de sulfuros de níquel y cobalto, Centro de Investigación del Níquel. Moa.
16. Loizidou, M. y Townsend, R. P. 1987. Ion - Exchange Properties of Natural Clinoptilolite, Ferrierite and Mordenite: Part 2. Lead-Sodium and Lead -Ammonium Equilibria, *Zeolites*, 7, 153-159.
17. Madariaga (1995), Aspecto teóricos de la operación de secado y su aplicación en productos sólidos.
18. Matzon, Fritz. 1975. Estudio de secado en atmósfera inerte de los sulfuros de níquel y cobalto obtenidos por precipitación a partir de una solución carbonato amoniacal. Patente No 3, 975, 507.
19. Menon and Mujundar. *Drying of solids*. Mc Graw Hill, Montreal, Canadá. 1992.
20. Montero, I. 2005: Modelado y construcción de un secadero solar híbrido para residuo biomásicos. Tesis doctoral. Universidad de Extremadura. Badajoz. 262 p, España.
21. Novoa R. " El secado de zeolita LTA a escala de laboratorio" (III). *Rev. Tecnología Química*. Vol XIV. N°2, 1993./pág. 50-55
22. Orozco, G. 1996. Caracterización geólogo mineralógica del yacimiento de tobas zeolitizadas Caimanes, Moa, Holguín. *Revista Minería y Geología*, Vol 13 número 3, pág. 45. Cuba.
23. Panadero. 1993. Estudio en homo rotatorio con calentamiento indirecto y atmósfera oxidante.
24. RADWAG. 2010. Operating instruction LMI-44, moisture analyzer Max series",

25. RAFIEE, S; KEYHANI, A. & MOHAMADI, A. 2008: Soybean seeds mass transfer simulation during drying using finite element method. World Applied sciences 4 (2): 284-288.
26. RETIRADO, Y.; GÓNGORA, E.; TORRES, E & HERNÁNDEZ, 2009: Comportamiento de la adherencia en menas lateríticas sometidas a secado solar natural. Minería y Geología 25(1): 1-11. Consultado: 10 de abril del 2014. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamq>.
27. RETIRADO, Y.; LEGRÁ, A.; LAMORÚ, M.; TORRES, E & LAURENCIO, H. 2012a: Optimización del secado solar de la mena lateríticas en la industria cubana del níquel. Minería y Geología 28(2): 30-46. Consultado: 04 de abril del 2014. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamq>.
28. RETIRADO, Y.; LEGRÁ, A.; LAMORÚ, M.; TORRES, E.; LAURENCIO, H & GONGORA, E. 2012b: Modelación y simulación del proceso de secado natural de la mena lateríticas. Minería y Geología 28(4): 1-19. Consultado: 04 de abril del 2014. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamq>.
29. RETIRADO, Y.; LEGRÁ, A. 2011: Modelación matemática del área de exposición y del volumen de las pilas de menas lateríticas expuestas a secado solar natural. Minería y Geología 27(2): 84-108. Consultado: 05 de abril del 2014. Disponible en: <http://revista.ismm.edu.cu/index.php/revistamq>.
30. Rodríguez Ricardo (2009), Secado de sulfuros mixtos de níquel y cobalto de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
31. Romero. et al, 1993. Descomposición térmica de los sulfuros de níquel y cobalto, Minería y Geología, X (1).
32. Sagedahl, Ramírez. 2003. Secado de una muestra de sulfuros mixtos de níquel y cobalto en un secador indirecto "Multicoil"
33. Wraith y Harris. 1992 Fluidization of a mineral concentrate at reduced pressure. Minerals Eng., 5, 993-1002.