



**REPÚBLICA DE CUBA**  
**MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR**  
**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO**  
**FACULTAD METALURGIA – ELECTROMECAÁNICA**  
**DEPARTAMENTO DE METALURGIA**

**UTILIZACIÓN DE GASES**  
**RESIDUALES EN EL SECADO DEL**  
**SULFURO DE NÍQUEL Y COBALTO**

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCION AL TITULO DE**  
**INGENIERO METALURGICO**

**JOSÉ REYNA ZULUETA**

**MOA**

**2012**



**REPÚBLICA DE CUBA**  
**MINISTERIO DE EDUCACION SUPERIOR**  
**INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO**  
**FACULTAD METALURGIA – ELECTROMECAÁNICA**  
**DEPARTAMENTO DE METALURGIA**

# **UTILIZACIÓN DE GASES RESIDUALES EN EL SECADO DEL SULFURO DE NÍQUEL Y COBALTO**

**TRABAJO DE DIPLOMA EN OPCION AL TITULO DE  
INGENIERO METALURGICO**

**Autor: José Reyna Zulueta**

**Tutores: Inv. Aux. Ing. Omar Lobaina Oduardo**

**Prof. Aux. Ing. Amaury Palacios Rodríguez. DrC**

**MOA**



2012

## PENSAMIENTOS

---

*“ La pasión de saber hace que el hombre aprenda más rápidamente y aprenda en menos tiempo, la pasión de saber, la conciencia de la necesidad de saber, hace que los conocimientos se adquieran más rápidamente y, sobre todo, la vida, el trabajo práctico, los problemas diarios, constantemente los están enseñando la necesidad de cada conocimiento”.*

**Fidel Castro Ruz**

*"La verdadera grandeza de la ciencia acaba valorándose por su utilidad".*

**Gregorio Marañón**

*"La inteligencia consiste no solo en el conocimiento, sino también en la destreza de aplicar los conocimientos en la práctica".*

**Aristóteles**



## AGRADECIMIENTOS

---

Doy gracias a Dios, por la oportunidad de llegar a terminar los estudios en la especialidad de ingeniería de la metalurgia ferrosa.

Agradezco de todo corazón a los hombres y mujeres que me apoyaron en el empeño de vencer.

**A mi tutor: Ing. Omar Lobaina Oduardo**, por su amistad, orientación y dedicación durante el desarrollo de la investigación, por su respeto e interés para con mi persona y por haber influido en los conocimientos prácticos de este trabajo e investigación.

**Al Dr. C. Amaury Palacios Rodríguez**, por sus muestras de afecto, sus consejos y su orientación en el orden personal, profesional y científico.

**A mi madre, que aunque ya fallecida, siempre estuvo al tanto de mis pasos a fin de que siguiera estudiando, puesto de que sin estudio no hay inteligencia. A todos mis hijos, y compañeros de trabajo.**

**A Todos Muchas Gracias.**



## DEDICATORIA

---

Dedico este logro personal

***A Dios, por ver permitido darme la oportunidad de vivir hasta hoy para ver los resultados de mis modestos esfuerzos, a mis hijos, hermanos y a todas las personas que ven el estudio como fuente inseparable del conocimiento para utilizarlo en el aprovechamiento de los recursos que brinda las ciencias y las técnicas en bien de la humanidad.***

***A la memoria de los hombres que han dado sus vidas por la libertad de nuestra Patria,*** a los cinco héroes y en especial a nuestro Comandante en Jefe Fidel Castro Ruz.

***A todos los profesores*** que dedicaron parte de su preciado tiempo a impartir los conocimientos requeridos.

***A mi tutor*** (Omar Lobaina Oduardo) por su dedicación en las investigaciones del secado del sulfuro de níquel.



## RESUMEN

En la Tecnología de lixiviación carbonato-amoniaca aplicada en la industria cubana niquelífera “Comandante René Ramos Latour” para el tratamiento de las menas lateríticas, la precipitación de Sulfuros mixtos de níquel más cobalto es uno de los productos de las etapas tecnológicas. Estos sulfuros, al ponerse en contacto con el oxígeno del aire, se oxidan, lo que dificulta su almacenamiento y transportación. La tecnología para el secado actual es obsoleta, es un proceso muy lento y con alta contaminación medioambiental. En esta investigación se pretende obtener un producto seco y reducida contaminación al medio. Se procede con un diseño de experimento factorial completamente aleatorio. La relación entre las diferentes variables del proceso se muestra a partir de los gráficos de comportamiento de régimen de secado y humedad respecto a los diferentes parámetros más influyentes. Para ello, se utilizó el programa STATGRAPHICS, a fin de mostrar gráficamente la variable más influyente en el proceso, como es la humedad, en este caso, las relaciones que se establecen entre las distintas variables en función de la variable fundamental. Por lo cual permite tener una visión clara para establecer los parámetros de diseño de una planta dedicada al proceso de secado. También permitió realizar una evaluación económica de la instalación, a partir de los costos y beneficios de la unidad que se pretenda fabricar con estos fines.



## **ABSTRACT**

In carbonate-ammoniacal the leaching Technology applied in the Cuban industry nickeliferous "Comandante Rene Ramos Latour" for the treatment of the lateritics mineral, mixed the nickel more cobalt sulfide precipitation is one of products of the technological stages. These sulphides, when putting itself in contact with the oxygen of the air, oxidize, which makes difficult to its storage and transportation. The technology for the present drying is obsolete, is a very slow process and with high environmental contamination. In this investigation it is tried to obtain a product dry and reduced contamination to means. It is come with a design of completely random factorial experiment. The relation between the different variables from the process is from the graphs of behaviour of regime of drying and humidity with respect to the different more influential parameters. For it, I am used program STATGRAPHICS, to propose to graphically show the most influential variable in the process, as it is the humidity, in this case, the relations that settle down between the different variables based on the fundamental variable. Thus allows having a clear vision for establishing the parameters of design of a plant dedicated to the drying process. Also it allowed making an economic evaluation of the installation, from the costs and benefits of the unit that is tried to make with these aims.



<b>ÍNDICE</b>	<b>PÁG.</b>
<b>INTRODUCCIÓN</b>	
<b>CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO SOBRE EL SECADO DE SULFUROS DE NIQUEL Y COBALTO</b>	
1.1 Introducción	
1.2 Revisión bibliográfica	
1.3 Parte teórica	
Conclusiones del capítulo	
<b>CAPITULO 2 MATERIALES Y MÉTODOS</b>	
2.1 Procedimientos y métodos empleados	
2.2 Materiales empleados en la experimentación	
2.3 Materiales y equipos	
2.4 Instalación empleada en el proceso de investigación	
2.5 Metodología para el secado de los sulfuros	
2.6 Metodología de disolución ácida a presión de los sulfuros	
2.7 Diseño experimental	
2.8 Método de modelación estadística	
2.9 Técnicas de análisis	
Conclusiones del capítulo	
<b>CAPITULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS</b>	
3.1 Introducción	
3.2 Análisis estadístico del efecto de las variables de entrada	
3.3 Valoración económica	
3.4 Valoración medioambiental	
Conclusiones del capítulo	
<b>CONCLUSIONES</b>	
<b>RECOMENDACIONES</b>	
<b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b>	



## INTRODUCCIÓN

Desde 1979 en la empresa Comandante Renè Ramos Latour de Nicaro, se comenzó el secado del sulfuro de níquel y cobalto de forma natural. Ya en 1995 esta actividad comienza a realizarse en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara de la Serna de Moa, es decir que en nuestras Empresas productoras el secado natural de los sulfuros mixtos de níquel más cobalto, (secado oxidante del producto aprovechando las propiedades pirofóricas del mismo) es la solución que ayudó a comercializar el sulfuro que desde la caída de la URSS no encontraba cliente, por no tener calidad para competir en el Mercado Mundial (Exceso de humedad permisible).

Paralelo a los sulfuros mixtos de níquel y cobalto, se comenzó a obtener en las Empresas productoras una pequeña cantidad de sulfuro de níquel a partir de los licores de níquel disueltos, producto pirofórico en menor grado que el anterior. Este producto a pesar de no tener las mismas características que los sulfuros mixtos de níquel y cobalto se le da el mismo tratamiento en su preparación para la venta, trayendo consigo pérdidas en la comercialización. La cantidad de sulfuro de níquel obtenido ha ido aumentando hasta llegar a 80 t mensuales, esto, unido al menor grado de piroforismo mostrado por los mismos no garantiza que pueda secarse todo el material que se produce. Por tanto, una de las direcciones de trabajo que abarca este proyecto, es evaluar el proceso de secado con gases residuales de la Termoeléctrica o de los calcinadores de Nicaro a diferentes escalas (laboratorio, banco y finalmente piloto) para lograr los criterios de diseño que permitan modificar el proceso que actualmente se realiza y proponer la construcción de una instalación industrial, con la cual se



prevé mejorar las condiciones de medio ambiente de trabajo y la calidad del producto (estabilidad física y química).

El secado de sólidos consiste en separar pequeñas cantidades de agua u otro líquido de un material sólido con el fin de reducir el contenido de líquido residual hasta un valor aceptablemente bajo. El secado es habitualmente la etapa final de una serie de operaciones. Esta operación se utiliza ampliamente en la tecnología química y es muy común que sea la última operación en la producción precedente a la salida del producto resultante Kasatkin, (1985), Treybal, (1965). Es evidente que la eliminación de agua o en general de líquidos existentes en sólidos es más económica por acción mecánica que por acción térmica. La dificultad de los medios mecánicos, surge cuando los productos finales y gran número de productos intermedios deben cumplir especificaciones rigurosas en cuanto a la humedad final. Habitualmente una centrífuga trabajando con grandes cargas de sólido húmedo dejará humedades en torno al 10 - 20 %, aunque en casos excepcionales como la sal común o cloruro sódico se puede alcanzar el 1 %.

Existen varios tipos de operaciones de secado, que se diferencian entre sí por la metodología seguida en el procedimiento de secado; puede ser por eliminación de agua de una solución mediante el proceso de ebullición en ausencia de aire; también puede ser por eliminación de agua mediante adsorción de un sólido, y por reducción del contenido de líquido en un sólido, hasta un valor determinado mediante evaporación en presencia de un gas. Los sólidos que se secan pueden tener formas diferentes -escamas, gránulos, cristales, polvos, tablas o láminas continuas- y poseer propiedades muy diferentes.

El producto que se seca puede soportar temperaturas elevadas o bien requiere un tratamiento suave a temperaturas bajas o moderadas. Esto da lugar a que en el mercado exista un gran número de tipos de secadores comerciales. Las diferencias residen fundamentalmente en la forma en que se mueven los sólidos a través de la zona de secado y en la forma en la que se transmite. El secado en un lecho fluidizado ha sido teórica y experimentalmente estudiado por muchos investigadores. En esta técnica, un buen contacto entre partículas y fluido proveen altas razones de transferencia de calor y materia. Una



temperatura prácticamente homogénea del lecho, lograda a través de un buen nivel de mezcla de sólidos, facilita el control del proceso. Estas características hacen la fluidización uno de los procesos mas atractivos de la industria química Kunii y Levenspiel, (1991). Sin embargo, debido a los problemas de la degradación térmica y seguridad, el secado de un lecho fluidizado ya no se utiliza en algunos campos, tales como en industrias químicas y farmacéuticas. El proceso de secado a temperaturas relativamente altas o largos tiempos de residencia, puede resultar con la degradación parcial de productos termolabiles. Se han realizado análisis basado en pruebas de secado en hornos rotatorios en la planta piloto de Nicaro, en el Spink flash en APV anhidro en Dinamarca y las pruebas preliminares en Kvaerner Eureka. Según las ofertas preliminares.

En la Empresa Niquelífera “Comandante Ernesto Che Guevara” de Moa se producen algunas cantidades de Sulfuros mixtos de Níquel y cobalto como parte de la diversificación de la producción de dicha empresa. El sulfuro producido se caracteriza por ser un material con alto contenido de humedad, por lo que previo a su envasado y posterior exportación es necesario realizar un proceso de secado. Este procedimiento tiene el inconveniente de que en el proceso de secado se generan gases con contenidos variables de  $\text{NH}_3$ ,  $\text{H}_2\text{S}$  y otros que además de pasar casi sin control a la atmósfera circundante produciendo un impacto negativo al medio, generan procesos corrosivos en las estructuras metálicas. Se han valorado diversas variantes y una de ellas es la adquisición de un horno para el secado del sulfuro de fabricación Noruega, variante que se requiere de un financiamiento importante.

El secado de sulfuros se realiza en una Nave de Secado expuesto al medio ambiente, se logra obtener una humedad menor de un 5%, por lo que se emana a la atmósfera gases contaminantes como el  $\text{NH}_3$  y el  $\text{SO}_2$ . Por lo que se requiere de un sistema que permita el secado sin emisiones de gases dañinos al medio ambiente.

En el presente trabajo se dan los resultados de la utilización de Zeolitas naturales de los yacimientos Caimanes, Moa y San Andrés, Holguín, Cuba a escala de banco con el propósito de contribuir al secado de sulfuros y adsorber los gases amoniacales que se emanan en dicho proceso. Las tobas zeolitizadas empleadas del yacimiento Caimanes se extrajeron de una cantera que



actualmente está inactiva. Las tobas fueron obtenidas de la planta de procesamiento ubicada en esa localidad holguinera y que está actualmente en explotación.

A continuación se presentan los resultados de las mediciones por el personal calificado de la Empresa Ernesto Che Guevara.

Tabla 1. Valores promedios de  $\text{NH}_3$  medidos puntualmente

SECCIÓN	Valores promedio $\text{NH}_3$ ( $\text{mg}/\text{m}^3$ )
filtro	> 140
Contenedores encima de la rastra	> 55
Patio almacenes	> 5
Nave de secado	>140

Norma permisible:  $20 \text{ mg}/\text{m}^3$ .

Los valores de las mediciones puntuales de  $\text{NH}_3$  promedian entre 24 y 55  $\text{mg}/\text{m}^3$  para las áreas cercanas al filtro, después de la descarga del mismo y a la nave de secado antes y durante el regado del sulfuro. Durante las mediciones se obtuvieron valores máximos de concentración por encima de  $100 \text{ mg}/\text{m}^3$ . Estos valores sobrepasan la norma de exposición para 8 horas de  $20 \text{ mg}/\text{m}^3$ , lo que trae consecuencias negativas para la salud de las personas, observándose como principales síntomas; dolores fuerte de cabeza y en las articulaciones, resecaimiento en la garganta, molestia en la vista, afecciones en la piel y eliminación de la mucosa del sistema respiratorio disminuyendo sus posibilidades de defensa. En el caso de las mediciones realizadas éstas sobrepasan el límite superior de detección del equipo utilizado ( $140 \text{ mg}/\text{m}^3$ ), haciendo presumir episodios de contaminación más severos. Las mediciones realizadas evidencian una gran variabilidad en los resultados condicionada por el método de muestreo utilizado y por las fluctuaciones en las condiciones de medición y de operación de la Planta.

Las emanaciones de gases amoniacales a partir de las pulpas de sulfuro filtradas se deben a la volatilización del amoniaco presente en el licor embebido



en ellas. La intensidad con la que el amoníaco se evapora es variable y depende de las condiciones ambientales (humedad relativa, temperatura, velocidad del viento, radiación solar) y de la intensidad en la oxidación de la masa de sulfuro.

El Sulfuro de Níquel y cobalto es una sustancia pirofórica y en contacto con el oxígeno del aire comienza a oxidarse en una reacción fuertemente exotérmica que genera una apreciable cantidad de calor muy útil en el proceso de secado ya que contribuye a la evaporación del agua de la pulpa y que por supuesto también contribuye a la volatilización adicional del amoníaco a través de una "destilación parcial" del mismo. Mientras más intensa sea la reacción de oxidación mayor cantidad de amoníaco se liberará a la atmósfera en una unidad de tiempo menor, acentuando el efecto de degradación de la calidad del aire en las áreas aledañas a las instalaciones de filtración y secado del sulfuro.

El 2 de marzo del 2004 el Departamento de Supervisión y Control del CITMA de Holguín otorgó la Licencia Ambiental No. 09/2004 a favor de la Empresa del Níquel "Comdte Ernesto Che Guevara" para la construcción y explotación de la Nave de Secado de Sulfuro de Níquel en un área que correspondía a los almacenes de materiales de la UPI Camariocas, dentro del propio yacimiento Yagrumaje Norte para el secado atmosférico de uno de nuestro productos finales.

En el Estudio de Impacto Ambiental para la Explotación del Yacimiento Yagrumaje Norte realizado por CESIGMA en septiembre del 2003 como parte del proceso de Solicitud de Licencia Ambiental, se estableció que el proyecto de explotación minera de este yacimiento traería como consecuencia afectaciones directas sobre algunos elementos socioeconómicos.

A esto se une que el área ocupada por los almacenes de la Empresa Las Camariocas dentro de esta zona será utilizada de forma temporal por la Empresa del Níquel "Comandante Ernesto Che Guevara" para la actividad de secado atmosférico del Sulfuro de Níquel y cobalto amparada por la licencia ambiental citada anteriormente y por la autorización para el traslado de dichas instalaciones AC-04-20 emitida por la DAU municipal el 17 de febrero del 2004.

Se debe significar que tanto las labores de explotación minera del yacimiento Yagrumaje Norte como el funcionamiento de la nave de secado, generarán impactos directos e indirectos en las áreas adyacentes a estas actividades,



incluida la escuela. Los impactos consisten en contaminación sonora por el laboreo minero y transportación de sulfuro y mineral así como en deterioro de la calidad del aire por elevación de los niveles de polvo en suspensión y la emanación de gases tóxicos desde la nave de secado, que pueden provocar eventos de contaminación severa a nivel de las instalaciones ocupadas por la escuela. Para conocer la magnitud estimada de estos impactos pueden consultarse al respecto la Solicitud de Licencia Ambiental para el traslado de la nave de secado de sulfuro de níquel y cobalto y el estudio de impacto ambiental para la explotación del Yacimiento Yagrumaje Norte realizado por CESIGMA.

Desde 1997 el sulfuro mixto enriquecido en cobalto constituye una producción importante para la Empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, siendo en este momento de 4 a 4,5 t/día de níquel y cobalto y se proyecta para el 2001 una producción superior a las 5 t/día de níquel y cobalto, que debe irse incrementando hasta alcanzar más de 8 t/día de níquel y cobalto.

En la actualidad el proceso de secado de sulfuro se realiza mediante un secado atmosférico en naves techadas. Este proceso es muy lento, con una duración estimada de 2 a 3 días para el sulfuro fresco y de 5 días o más para el sulfuro envejecido. La capacidad de secado esta entre 3.9 y 4.0 t/día, con lo cual al finalizar el año habrá un inventario de producción de sulfuro de níquel y cobalto de mas de 500 t de níquel y cobalto que representan 4875,0 Musd inmovilizados en forma de sulfuros sin secar. Es decir ya se hace casi imposible secar el sulfuro mediante la ampliación de naves techadas.

En el análisis realizado por la Empresa las perdidas de níquel y cobalto en forma de sulfuro por el secado atmosférico asciende a 1,2 t/d, lo cual representan 10500 usd/d o 3832.5 Musd/a.

Las pérdidas de “big bag” por el envase del sulfuro húmedo ascenderán en este año a más de 200 Musd. Las pruebas y el análisis realizados permite concluir que el sulfuro de Níquel y cobalto es un producto muy difícil de secar, muy fino, con el 80 % de partículas de 8 a 12 micrones, muy pegajoso y corrosivo. La literatura especializada recomienda para estos productos de 3 a 4 pruebas en diferentes secadores y señala que más de 50000 usd se justifican en gastos para la realización de las pruebas que permita elegir el correcto secador y las óptimas condiciones de operación, o sea, definir la óptima tecnología de secado a aplicar a los sulfuros.



Situación problemática: La tecnología en el secado de sulfuros de níquel y cobalto de la Empresa Comandante “Ernesto Che Guevara” es obsoleta, es un proceso muy lento y con alta contaminación medioambiental, se acumula una producción en inventario que afecta los indicadores económicos de la empresa. En esta investigación se pretende obtener un producto seco y sin contaminación al medio ambiente, mediante una instalación eficiente, para que la misma pueda satisfacer la demanda de producción actual.

Problema: Insuficiente conocimiento en el proceso de secado en tambores cilíndricos.

Objeto: Sulfuros mixtos níquel y cobalto de en la Empresa “Comandante René Ramos Latourt”.

Campo: Proceso de Secado de sulfuros mixtos en la Empresa “Comandante René Ramos Latourt”.

Hipótesis: Si se conocen las regularidades físicas del proceso de secado de sulfuros, entonces se podrá obtener un producto de elevada calidad.

Objetivo: Determinar las regularidades físicas del proceso de secado del sulfuro de níquel y cobalto de la Empresa René Ramos Latourt.

Objetivos específicos:

1. Caracterizar el contenido inicial de agua del sulfuro de níquel y cobalto.
2. Experimentar el proceso de secado sulfuro de níquel y cobalto a escala de banco y piloto.
3. Valorar los efectos económico y medioambiental del proceso de secado.



## **CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO SOBRE EL SECADO DE SULFUROS DE NIQUEL Y COBALTO**

### **1.1 Introducción**

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 han despertado un nuevo interés en el secado con nuevos métodos más simples, cómo el aprovechamiento de la energía solar y otros tratando de desarrollar diversas técnicas que permitan solucionar los problemas relacionados con el secado.

Los sulfuros mixtos de Níquel y cobalto y en menor grado los sulfuros de níquel obtenidos a partir de soluciones amoniacaes por sulfidización de estos metales se oxidan rápidamente cuando se exponen a condiciones atmosféricas normales. Los sulfuros oxidados reaccionan con el agua presente en la atmósfera en una reacción de hidratación. Esta oxidación e hidratación puede incrementar el peso de los sulfuros en un 150 % o más.

El objetivo de este capítulo es: Establecer los fundamentos técnicos necesarios para el estudio experimental del proceso de secado del sulfuro, mediante el desarrollo del marco teórico de la investigación.

### **1.2 Revisión bibliográfica**

Matson; Rapheal Fritz, (1975), refieren un proceso de secado en atmósfera inerte de los sulfuros de níquel y cobalto (en forma de pulpa) obtenidos por precipitación a partir de una solución carbonato amoniacal. Los sulfuros 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 sulfuros son secados, deshidratados, calentados a temperaturas alrededor de 1000 °F en atmósfera sustancialmente inerte, y posteriormente enfriados en esta atmósfera. Para el secado de los sulfuros mediante este procedimiento emplearon un secador. spray

J. Panadero Matos. (1993). Refiere los trabajos realizados en horno rotatorio con calentamiento indirecto y atmósfera oxidante, con este trabajo se logra secar el sulfuro sin riesgo en la transportación ya que se logra un producto estable, las pruebas se realizaron a nivel de banco.

J. Panadero Matos. (1994). Refiere los costos estimados de las inversiones que se valoran como alternativas a ejecutar para secar y comercializar el concentrado de Níquel y cobalto, a partir de la filtración de la pulpa de sulfuro en filtro Larox y secado en secador rotatorio.

Sagedahl C; Ramírez C, (2003), refieren los resultados del secado de una muestra de sulfuros amoniacales de níquel y cobalto procedentes de la empresa Comandante “Ernesto Che Guevara” (ECG) 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 (0,76 % de humedad), que durante el proceso de secado y posterior al mismo mantuvo un comportamiento no activo.

Lobaina. O, (1997), refiere los resultados del secado de una muestra de sulfuros amoniacales de níquel y cobalto procedentes de la (ECG) 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 permitía 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 - 250 °C y 105 -150 °C.

Lobaina O, (2004), refiere los resultados del secado de una muestra de sulfuros amoniacales de níquel y cobalto procedentes de la (ECG) en un secador directo en atmósfera oxidante. La alimentación del sulfuro al secador se realizó en forma de torta lo cual permitía incrementar la cantidad de sólido en el sulfuro a



secar y disminuir el consumo de energía. Las muestras fueron secadas entre 100 y 250 °C.

Lobaina O, (2005), refiere los resultados del secado de una muestra de sulfuros amoniacales de níquel y cobalto procedentes de la (ECG) a escala de banco en un secador indirecto con atmósfera oxidante. La alimentación del sulfuro al secador se realizó en forma de torta lo cual permitía incrementar la cantidad de sólido en el sulfuro a secar y disminuir el consumo de energía. Las muestras fueron secadas entre 100 y 250 °C.

Lobaina O, (2005), refiere los resultados del secado de una muestra de sulfuros amoniacales de níquel y cobalto procedente de la (ECG) en un Secador piloto directo en atmósfera oxidante. La alimentación del sulfuro al secador se realizó en forma de torta lo cual permitía incrementar la cantidad de sólido en el sulfuro a secar y disminuir el consumo de energía. Las muestras fueron secadas controlando los gases de salida entre 100 y 110 °C.

Raquel y col., (1992),refieren la investigación realizada en la Empresa Comandante Rene 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 estudia en atmósfera oxidante teniendo lugar la oxidación del sulfuro mixto hasta sulfato a altas temperaturas, por ello se realizan los ensayos a temperatura controlada para evitar la oxidación del sulfuro a temperaturas de los gases inferiores a los 523 K en la zona de secado, utilizando sulfuros de las Empresas Comandante “Rene Ramos Latour” y “Ernesto Che Guevara”. Los resultados experimentales permitieron arribar a las siguientes conclusiones:

- El secado en atmósfera oxidante en horno rotatorio con calentamiento indirecto es efectivo, obteniendo un producto no pirofórico, sin oxidación del sulfuro mixto a sulfatos.
- Para evitar el piroforismo la humedad del producto final debe ser menor de 3 % y la temperatura de los gases en la zona de secado en el rango de 473 - 500 K.
- El producto seco es higroscópico pero no pirofórico.

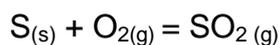
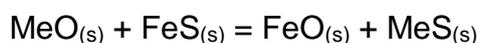
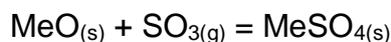
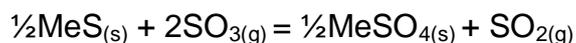
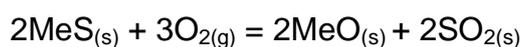
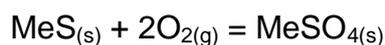


- En la investigación no se realiza la caracterización mineralógica de la materia prima ni del sólido seco.

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.

Informe técnico del Departamento de Investigación Empresa Comandante “René Ramos Latour”, (1995) contiene el estudio de la posibilidad de realizar del 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, disminuyendo la humedad. La temperatura inicial se incrementó desde 318 K hasta valores entre 343 y 363 K, posterior al envasado del material en big-bags la temperatura disminuyó hasta 343 K, al poner el producto en contacto con el aire las temperaturas fueron inferiores a 350 K, la solubilidad del producto seco no sufrió alteraciones. En la investigación no se realiza la caracterización mineralógica de la materia prima ni del sólido seco.

Rodríguez y col. (1992), analizan la termodinámica del proceso de tostación oxidante del concentrado de sulfuros obtenido en la Empresa Comandante Pedro Soto Alba, considerando las posibles reacciones en el intervalo de 400 y 1073 K. Se analizan las reacciones siguientes:



El estudio permitió definir la reacción de tostación oxidante más probable, formación de sulfatos, siendo la oxidación sulfatante del cobalto, la más probable debido al menor valor del Potencial Isóbaro Isotérmico y elevado valor de la constante de equilibrio para el intervalo de temperatura analizado.



Sosa (1999), analiza termodinámicamente la calcinación de los sulfuros de cobre y zinc en el intervalo de temperatura 400 y 1073 K, comprobándose experimentalmente mediante la aplicación del análisis de fases la presencia de los sulfatos de ambos metales.

Magdalena (1993) Las investigaciones de la descomposición térmica del sulfuro de níquel más cobalto industrial estaba dirigida a la caracterización de la degradación térmica del sulfuro de níquel y cobalto de la Empresa Comandante Rene Ramos Latour, determinando los parámetros cinéticos los modelos de la descomposición de los sulfuros hasta óxidos. Aplicando el método propuesto por Jerez analizando los 25 modelos cinéticos para la identificación de la función  $f(\infty)$  y se aplicó el Método de Achar para el cálculo de los parámetros cinéticos. La investigación se realizó en régimen no isotérmico hasta los 1273 K con velocidades de calentamiento de 2,5 y 10 grados/min.

El análisis de fases de la muestra inicial evidenció como fases principales la millerita, disulfuro de cobalto, sulfuro de cobre y líneas de poca intensidad que pueden ser asociadas a otros sulfuros de níquel y cobalto.

En los termogramas se observan las etapas siguientes:

- Pérdida de humedad y amoniaco.
- Degradación de poli sulfuros.
- Oxidación a sulfatos de las fases presentes.
- Descomposición térmica de los sulfatos.

Los cálculos cinéticos se llevaron a cabo con el grado de transformación para temperaturas superiores a 973 K y velocidad de calentamiento ( $\beta$ ) de 10 grados/min., concluyendo que el proceso tiene lugar según el modelo G-1 donde:  $f(\infty) = (1 - \infty)$  y  $G(\infty) = -\ln(1 - \infty)$ , siendo la etapa limitante, la velocidad de difusión del trióxido de azufre a través de la capa de óxidos.

Blet I. y M. Sánchez (1996), Analizaron los procesos de secado atmosférico de los sulfuros obtenidos por la tecnología carbonato amoniacal y su posterior disolución. El secado se analizó tanto en big-bags como en el piso, determinando la dependencia del porcentaje de humedad con el tiempo de secado y la altura óptima de los canteros. La disolución del sulfuro seco se



estudió a la presión atmosférica y en autoclaves a temperatura entre 363 y 373 K, presión de 7 atmósferas y tiempo de 4 horas, usando agua y licor fresco, alcanzando extracciones superiores al 90 % a presión atmosférica para el níquel y cobalto y 99,9 % cuando se emplea presión de oxígeno de 7 atmósferas.

Neicis y otros, (1998), refieren el análisis realizado sobre la oxidación de los sulfuros el cual abarcó solamente los sulfuros de níquel más 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. En el estudio no se tuvieron en cuenta la existencia de otras especies químicas en las soluciones amoniacales y su precipitación en forma de sulfuros, tal como lo han demostrado los estudios de difracción de rayos X.

Neicis y Leticia, (1998), refieren la caracterización realizada de sulfuros industriales envejecidos y sulfuros 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 comprobándose la no existencia de una relación fija Ni/Co alcanzando 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  $\text{Ni}_2\text{CoS}_4$  ( siegenita) y el  $\alpha\text{-NiS}$ , mientras en los sulfuros expuestos al aire son sulfatos hidratados de níquel y cobalto, así como sulfato doble de níquel y amonio. Además se indica la posibilidad de compuestos similares de cobalto y hierro los que son isoformas con el níquel.

Este estudio no permite analizar los compuestos amorfos presentes en el concentrado los que son predominantes en este producto aspecto esencial para completar la caracterización.

Moreira (1996); Avila (1997), analizan el secado de sulfuros industriales hasta temperatura 373 K comprobándose que no tienen lugar cambios en las fases cristalinas en los sulfuros precipitados.

Beatón,(1998), realizaron la caracterización de muestras de sulfuros secados en atmósfera inerte y atmosférico, usando análisis químico, minera gráfico y



difracción de RX, comprobándose en el primer caso la presencia de varios sulfuros de níquel y cobalto mientras en el segundo caso predominan las fases cristalinas de sales dobles hidratadas de níquel, cobalto.

Garrido (2000, 2003), analizó la oxidación isotérmica y no isotérmica de los sulfuros mixtos de níquel y cobalto, obteniendo las ecuaciones cinéticas que caracterizan ambos procesos. Demostró que los sulfuros de níquel y cobalto precipitado se caracterizan por ser un concentrado en el que predomina el carácter amorfo el secado atmosféricamente se oxidan siendo las fases cristalinas principales sales dobles de níquel-amonio y cobalto - amonio.

Lefers, J y col., (2001), refiere que la existencia de las sales dobles ha sido estudiada en soluciones buffer con pH de 9,7 unidades y temperaturas de 318,5, 308 y 298 K respectivamente, analizando la cinética de este proceso en reactores de flujo continuos, comprobando la oxidación de los sulfuros y una mayor velocidad de oxidación en las pruebas en las que se utilizó carbón como catalizador, lo que permitió obtener las ecuaciones cinéticas en los procesos, homogéneo y heterogéneo de oxidación.

Estas investigaciones no permitieron analizar las fases cristalinas presentes en el concentrado luego del secado atmosférico aspecto esencial para completar la caracterización de los mismos.

Lobaina. O. refiere los resultados obtenidos durante la disolución amoniacal y ácida de las muestras de sulfuro secadas en secador Spray (Corridas de secado a muestras de sulfuro de la ECECG realizadas en Dinamarca). . Las muestras de sulfuro seco utilizadas tenían un comportamiento activo, aumentando de peso al ponerse en contacto con el aire.

La refinería de níquel y cobalto de Nippon Mining, procesa sulfuro mixto de níquel y cobalto producto de Queensland Nickel, con una composición de 36,5 % de Ni; 14,5 % Co; 0,8 % de Fe, 0,7 % de Cu, 0,02 % Zn y 34 % S. El sulfuro en forma de pulpa concentrada entre 100 y 150 g/L es lixiviado a presión de 50 kg/cm<sup>2</sup>, temperatura 170 °C con aire y agua obteniéndose una solución de sulfatos, el hierro es oxidado y separado como hidróxido férrico Fe(OH)<sub>3</sub> a pH de 4,5 por adición de amonio, luego se separa el cobre con hidrosulfuro de sodio a menos de 0,001 g/L.



La refinería de Sumitomo Metal Mining, procesa ánodos de mata de níquel y sulfuros mixtos de Níquel y cobalto de las operaciones de Nonoc, Filipinas en circuitos separados.

Los sulfuros de níquel + cobalto son lixiviados a presión por oxidación en autoclaves horizontales, donde la extracción de Ni y Co no es menor al 99 % y la lixiviación de Fe es limitada a 10 -15 % para reducir las pérdidas de Ni y Co que precipitan junto a este en la etapa de purificación, obteniendo una solución de sulfatos con impurezas en rangos pequeños, 0 - 1 g/L Mn, 1 - 3 g/L Fe, 2 - 5 g/L Cu.

Un lecho fluidizado operado al vacío ofrece la posibilidad de eliminar estos problemas. Temperaturas bajas de operación logradas bajo condiciones de vacío reducen la probabilidad de degradación térmica. Al mismo tiempo, las bajas presiones de operación pueden proveer un proceso seguro, fuera de los límites de flamabilidad.

Sin embargo, relativamente pocos documentos acerca de fluidización bajo condiciones de vacío han sido publicados. Kawamura y Suezawa (1961) realizaron uno de los primeros estudios en hidrodinámica de lechos fluidizados a presión reducida y notaron que el comportamiento del lecho era similar al comportamiento del lecho a presión atmosférica.

En esta investigación sólo se demuestra que el lecho fluido no varía su comportamiento en función de la presión atmosférica y presión reducida sin tener en cuenta los requerimientos físicos-químicos del lecho para sustancias que cambian sus propiedades en función de la Temperatura y Humedad, en nuestra investigación se logra enmarcar los cambios del lecho en correspondencia de su estado inicial, intermedio y final.

La coexistencia de una capa fluidizada superior y una zona de lecho fijo fue observado por Germain y Claudel (1976). Kusakabe et al. (1989) también detectó la existencia de una capa superior fluidizada en el lecho, cuando la caída de presión del lecho y la presión absoluta de operación básicamente tienen la misma magnitud.

Desde el punto de vista operacional esta investigación garantiza la estabilidad para sistema fluido en el momento de equilibrio en fases sólidos y gaseosa,



indicando una distribución uniforme radial de partículas en el seno del medio gaseoso, pero no se refleja los cambios físicos que acompañan a esta operación.

Wraith y Harris (1992) realizaron una serie de experimentos a presión reducida y midieron la misma 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 determinó las proporciones de gases (relación gas/sólido) que se requieren para una aceptable distribución de gas para el secado en la cama fluida. Pero tiene como objetivo determinar la caída de presión, sin obtener datos de tiempo de secado, cambios de temperatura, en la que en nuestra investigación obtenemos.

Hoebink y Rietema (1980) realizaron uno de los primeros estudios de secado de lecho fluidizado. Ellos desarrollaron un modelo de tres fases basado en una mezcla perfecta de fases, una densa, una de burbuja, otra de una fase nubosa tomada de un flujo pistón. Mas tarde, otro modelo de tres fases para operación de condiciones de estado estable de un lecho fluidizado continuo fue propuesto por Palancz (1983).

En un estudio experimental, Thomas y Varma (1992) investigaron el efecto de la temperatura de operación, la velocidad superficial del gas, el tamaño de las partículas y masa de sólidos en la razón de secado para materiales granulares celulosos; presentando un modelo del núcleo retrocedente. Kannan et al. (1994) desarrolló otro modelo de tres fases.

Ellos asumieron una mezcla perfecta de fases del sólido y del gas intersticial, mientras consideraban una burbuja de tamaño constante a través del eje del lecho, sin tomar en cuenta la variación de la fase del gas Intersticial, respecto al tiempo.

Una serie de experimentos de secado en un lecho fluidizado al vacío con varios tipos de partículas fue realizado por Arnaldo et al. (1998). Ellos observaron que el efecto de reducir la presión de operación, sobre la velocidad de secado, es mayor en caso de partículas porosas. Por otro lado, para partículas de estructura interna compacta la baja presión resultó una velocidad de secado menor. Después se concluyó que la presión de operación reducida produce una



disminución en la capacidad de eliminación de humedad para los dos tipos de partículas mientras incrementa la difusividad interna solo en las partículas porosas. Es decir, las partículas de estructura interna compacta no permiten que la difusividad interna se afecte por la variación de presión y como resultado, el aumento de la velocidad de secado obteniendo en el caso de partículas porosas no es observado en las partículas compactas.

Un modelo matemático, en estado transitorio, para simular el proceso de secado en un lecho fluidizado al vacío fue presentado por Kozanoglu et al. (2002b). Según este modelo el lecho es formado de dos fases; fase de sólidos y fase de gas, con transferencia de calor y materia entre ellos. Kozanoglu et al. (2001) calculó el coeficiente de transferencia de materia en operaciones de secado de un lecho fluidizado al vacío, comparando los resultados experimentales de Arnaldos et al.(1998) con el modelo. Existen pocas publicaciones más acerca de secado de un lecho fluidizado en condiciones al vacío.

En lo que respecta a la literatura cubana consultada, en el trabajo de Paumier y otros, 1998 se dan los resultados del empleo de las zeolitas naturales cubanas de nueve yacimientos, entre los que no se encuentran Caimanes ni San Andrés, con el fin de purificar corrientes gaseosas ricas en amoníaco y óxidos de nitrógeno de plantas industriales. No se reportan datos sobre el empleo en Cuba de zeolitas naturales en el secado de productos industriales o granos naturales.

Se reportan algunos trabajos donde se han realizado estudios de curvas de secado específicamente de bagazo. Guerra (1971) lo realizó a baja temperatura y no detectó valor alguno de humedad crítica, partiendo de una humedad del 50 %. Grobart (1973) determinó un valor constante de humedad crítica de 44,66 % para un rango de temperatura del aire entre 45 y 70 °C. Martínez (1988) obtiene una gran cantidad de cinéticas de secado para bagazo en cama fija donde se aprecia la humedad crítica alrededor del 30 % aunque no da directamente correlaciones para determinarla y trabaja solamente hasta una temperatura del agente secante de 90 °C.

La Clinoptilolita es la zeolita que más se ha estudiado como material de intercambio iónico y se usa comercialmente en el tratamiento de aguas



residuales industriales y municipales para reducir la concentración del nitrógeno amoniacal. El intercambio iónico de amonio en zeolitas naturales se ha estudiado extensamente y diversas zeolitas naturales y modificadas se han probado (Leyva Ramos y col., 2003). Klieve y Semmens (1980) emplearon clinoptilolita, erionita, mordenita y filipsita para eliminar amonio y reportaron que la filipsita tiene la mayor capacidad de intercambio pero que es muy frágil y más cara que la clinoptilolita.

La aplicación de zeolitas naturales para la remoción de metales pesados en solución acuosa ha sido reportada en varios trabajos (Kesraoui-Ouki y col., (1993); Leyva-Ramos 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 reciba. La zeolita se puede modificar tratándola por intercambio catiónico y su capacidad de intercambio catiónico depende del catión que se use en el tratamiento (Loizidou y Townsend, (1987).

Mucho del trabajo sobre zeolitas se ha centrado principalmente en las zeolitas sintéticas. Desde principios de 1970, la investigación sobre zeolitas naturales ha despertado un especial interés, como resultado del descubrimiento de importantes yacimientos, sus propiedades fisicoquímicas y sus potenciales aplicaciones en la industria, agricultura y acuicultura. El uso y aplicaciones industriales de las zeolitas naturales se han estado expandiendo continuamente y varios cientos de toneladas son extraídas anualmente en USA, 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.

Hasta la fecha se han identificado mas de 30 especies de zeolitas naturales 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 (Dyer, 1988).

### **1.3 Parte teórica**

El proceso de secado es un fenómeno en el que ocurre, de forma simultánea, las transferencias de calor y masa así como el encogimiento. De esta forma, una aproximación realista al modelo físico-matemático del proceso de secado,



incluye las condiciones internas y externas a que está sometido el sólido y también el mecanismo de salida de humedad del material. La operación de secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas- sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa. Cuando estas dos presiones se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y el proceso de secado cesa.

El contenido de humedad de una materia suele expresarse como porcentaje en peso respecto al material seco. Un sólido expuesto al aire a una determinada humedad y temperatura pierde o gana agua hasta alcanzar unas condiciones de equilibrio; el grado de humedad, en el equilibrio, depende de las características del material. Si un sólido se halla inicialmente muy húmedo, la superficie se cubrirá con una delgada película de líquido, con lo cual supondremos que se trata enteramente de una humedad no límite. Cuando se le expone al aire seco, tendrá lugar una evaporación desde la superficie. El régimen al que se evaporará la humedad se puede describir en función del coeficiente de transferencia de masa gaseosa  $k_y$  y la diferencia entre la humedad del gas en la superficie del líquido  $Y_s$  y en la corriente principal  $Y$ . Así, para secado con circulación cruzada.

$$N = k_y \cdot (Y_s - Y)$$

#### Mecanismos de secado

En la operación de secado hay que eliminar la humedad sobre la superficie y la del interior del sólido. Si la humedad es elevada, la evaporación tiene lugar sobre la superficie totalmente mojada; el líquido se renueva continuamente por difusión rápida desde el interior y la velocidad de secado permanece constante sin depender de la humedad total, es el periodo de velocidad de secado constante y se prolonga hasta alcanzar la humedad crítica.

Cuando la humedad del sólido es inferior a la humedad crítica, la difusión desde el interior no puede suministrar todo el líquido que se evapora en la superficie, lo que lleva consigo el descenso de la velocidad de evaporación. Tiene lugar la aparición de zonas secas sobre la superficie, y termina cuando la superficie de



sólido queda libre el líquido, se le conoce como 1<sup>er</sup> periodo de velocidad decreciente. A continuación, la velocidad de secado sigue descendiendo, la evaporación se produce en el interior del sólido, cada vez más lejos de la superficie, difundiendo posteriormente el vapor, es el 2<sup>do</sup> periodo de velocidad decreciente.

En cada momento, la velocidad de secado es función de la velocidad de transmisión de calor y de la velocidad de transferencia de materia que depende del tipo y características del material. Resulta más adecuado expresar el coeficiente de transferencia de materia en función de la humedad, la expresión anterior cambiaría se indica a continuación.

$$K_{GA} (P_s - P_w) = k_A (H_s - H)$$

Tiempo de secado

Si el secado de un material se consigue haciendo circular aire caliente sobre su superficie mojada; la curva de velocidad de secado se muestra en la figura (1.2).

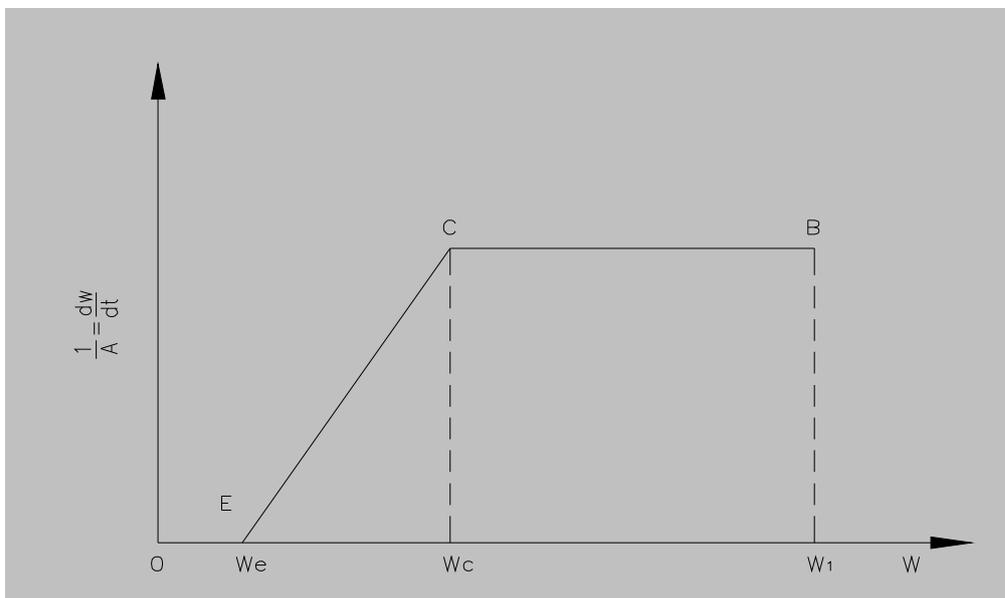


Figura 1.2 Curva de velocidad de secado`

La curva de la velocidad de secado (Figura 1.2) se utiliza para calcular el tiempo de secado

W = humedad final (kg agua/kg sólido)



$W_E$  = humedad de equilibrio (E)

$W_C$  = humedad crítica (C)

$W_1$  = humedad inicial (B)

$W - W_E$  = Humedad libre.

8. Naturaleza del sólido húmedo y forma de introducirlo en el secadero.

El exceso de humedad contenida por los materiales puede eliminarse por métodos mecánicos (sedimentación, filtración, centrifugación). Sin embargo, la eliminación más completa de la humedad se obtiene por evaporación y eliminación de los vapores formados, es decir, mediante el secado térmico, ya sea empleando una corriente gaseosa o sin la ayuda del gas para extraer el vapor Knoule, (1968).

La operación de secado es una operación de transferencia de masa de contacto gas- sólido, donde la humedad contenida en el sólido se transfiere por evaporación hacia la fase gaseosa, en base a la diferencia entre la presión de vapor ejercida por el sólido húmedo y la presión parcial de vapor de la corriente gaseosa. Cuando estas dos presiones se igualan, se dice que el sólido y el gas están en equilibrio y el proceso de secado cesa.

Durante el secado se elimina, como regla, sólo la humedad enlazada con el material en forma físico-química y mecánica. La más fácil de eliminar resulta la enlazada mecánicamente que a su vez se subdivide en: humedad de los macrocapilares y microcapilares (capilares con el radio medio mayor y menor de 10-5 cm.). Los macrocapilares se llenan de humedad durante el contacto directo de ésta con el material, mientras que en los microcapilares la humedad penetra tanto por contacto directo, como mediante la adsorción de la misma en el medio ambiente. La humedad de los macrocapilares se elimina con facilidad no sólo por secado, sino que también empleando métodos mecánicos.

El enlace físico-químico une dos tipos de humedad que difieren por la solidez del enlace con el material: la humedad ligada osmóticamente y por adsorción. La primera llamada también humedad de hinchamiento, se encuentra dentro de las células del material y se retiene por las fuerzas osmóticas. La segunda se retiene sólidamente sobre la superficie y en los poros del material. La humedad



de adsorción requiere para su eliminación un gas con una energía considerablemente mayor que la utilizada para eliminar la humedad de hinchamiento. La existencia de estos tipos de humedad especialmente se manifiesta en materiales coloidales y poliméricos Kasatkin, (1985).

➤ Definiciones fundamentales.

Contenido de humedad, base seca:  $x$

Relación de agua y material seco (kg / kg)

Contenido de humedad, base húmeda:

Humedad de equilibrio:  $x^*$ , Humedad del sólido cuando su presión de vapor se iguala a la presión de vapor del gas. Es decir, humedad del sólido cuando está en equilibrio con el gas.

Humedad libre:  $x - x^*$ , Es la humedad del sólido; que es la humedad que está en exceso con relación a la humedad de equilibrio. Es ésta la humedad que se puede evaporar y depende de la concentración de vapor en la corriente gaseosa.

Existen otras definiciones como humedad límite; que es la humedad del sólido que ejerce una presión de vapor de equilibrio menos que aquella que ejerce el líquido puro a la misma temperatura y la humedad no límite que es la humedad del sólido que ejerce una presión de vapor igual a la del líquido puro a la misma temperatura.

### Clasificación de la operación de secado

De modo general se pueden clasificar las operaciones de secado en continuas y discontinuas. En las operaciones continuas pasan continuamente a través del equipo tanto la sustancia a secar como el gas. La operación discontinua en la práctica se refiere generalmente a un proceso semicontinuo, en el que se expone una cierta cantidad de sustancia a secar a una corriente de gas que fluye continuamente en la que se evapora la humedad (Treybal, 1965).

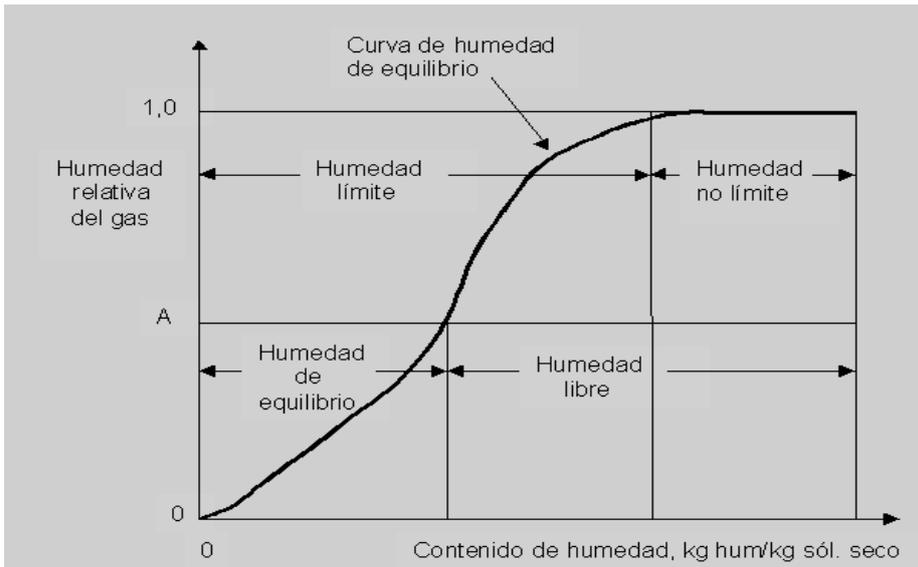


Figura 1.3 Curva de contenido de humedad vs humedad relativa del gas.

- Humedad que se evaporará en 1 (kg) de producto seco.
- Humedad inicial de la Torta  $X_{hi} = 50\%$ .
- Humedad final del producto  $X_{hf} = 2\%$ .

Contenido inicial de humedad =  $0,5/(1-0,5) = 1$  (kg) de agua/kg sólido seco.

Contenido final de humedad =  $0,02/(1-0,02) = 0,020408$  (kg) de agua/kg sólido seco.

Kg de sólido seco en el producto = 0,980 (kg)

Humedad a evaporar =  $0,980 * (1,00 - 0,020408) = 0,960$  (kg).

Mecanismos y cinética de secado. Transferencia de masa y calor.

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 funcionen en los secaderos de contacto directo. Según Madariaga (1995), esta 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 será las propiedades del sólido.

Cuando se seca un sólido se producen dos procesos fundamentales y simultáneos:

- Transmisión 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), Chemical. Eng. (1986). También se ha reportado otro tipo de secado llamado secado por sublimación.

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 calentado o se desplaza por encima de estos. El calor también se difunde en el sólido a través de la conductividad del propio sólido Chemical. Eng. (1980).

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 (De La Peña Vilar, (1994).



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).

#### 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 explicarán brevemente algunas de las teorías que se adelantaron para explicar el movimiento de la humedad y la relación de ésta con las curvas de régimen.

1. **Difusión líquida:** Se puede producir la difusión de la humedad líquida 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).
2. **Movimiento capilar:** 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, al principio la humedad se traslada por capilaridad hacia la superficie con suficiente rapidez, siendo constante el régimen de secado.
3. **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 puede evaporar debajo de la superficie, las partículas de humedad existentes en sólidos granulares en forma aislada de la porción mayor de humedad que fluye a través de los capilares.



4. Presión: Durante el secado debido a la concentración de las capas externas de un sólido, se puede compeler la humedad hacia la superficie. Usualmente solo podemos conjeturar sobre cual de los mecanismos es el apropiado para cada sólido en particular, debiendo apoyarnos en el trabajo más o menos empírico de los regímenes experimentales de secado.

#### Curvas fundamentales de secado.

La cinética de secado de un material no es más que la dependencia de la humedad del material y de la intensidad de evaporación con el tiempo o variables relacionadas con este, como la propia humedad o las dimensiones del equipo.

La intensidad de evaporación se determina a través de la velocidad de secado, que es el cambio de humedad (base seca) en el tiempo.

A partir de las curvas de cinética de secado ( $x$  vs  $t$ ,  $dx/dt$  vs  $x$ ), que deben ser obtenidas a nivel de laboratorio, puede tenerse una idea del tiempo de secado, del consumo de energía, del mecanismo de migración de humedad, de las condiciones predominantes en la transferencia de calor y masa y de la influencia que tienen en la velocidad de secado las variables del proceso tales como: temperatura, humedad de entrada, velocidad del aire, etc.

Por todo esto es que determinar las curvas de secado es un aspecto muy importante para el controlar y el proceso de secado.

Con los datos obtenidos durante la prueba de secado o sea de la variación de la humedad con el tiempo, puede hacerse un gráfico de contenido de humedad en función del tiempo Figura1.4 (Treybal, 1965). Este será útil para la determinación directa del tiempo necesario en el secado discontinuo de grandes partidas bajo las mismas condiciones de secado (Menon & Mujundar ,1992).

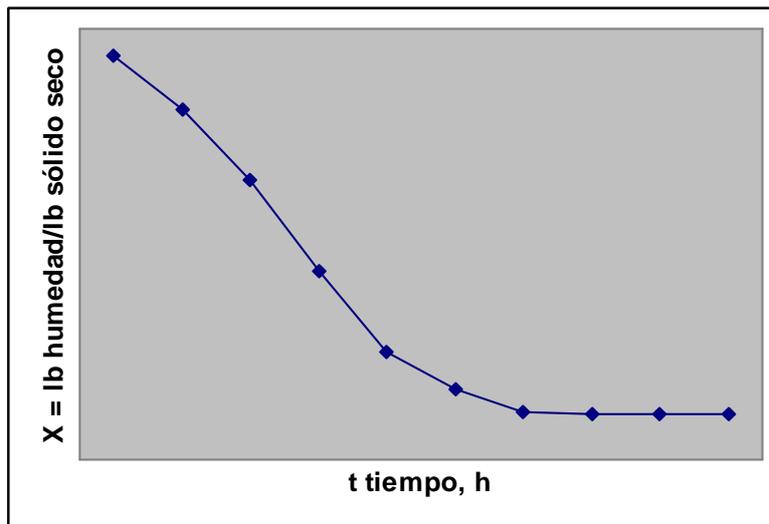


Figura 1.4 Secado, condiciones constantes de secado

Se puede obtener abundante información si se convierten los datos a regímenes de secado, expresados como  $N$  (lb de humedad evaporada/ h pie<sup>2</sup>), y se lleva a un gráfico en función del contenido de humedad. Se puede hacer esto midiendo las pendientes a las tangentes trazadas a la curva de humedad contra tiempo, o por medio de la determinación en base a la curva, de pequeños cambios  $\Delta x$  en el contenido de humedad para los correspondientes cambios en el tiempo  $\Delta t$  y calculando el régimen de secado como:

$$N = -L_s \cdot \Delta x / A \cdot \Delta t.$$

Donde  $L_s$  es el peso del sólido seco y  $A$  es la superficie húmeda sobre la que sopla el gas y a través de la cual se lleva a cabo la evaporación en el caso del secado con circulación cruzada de aire.

Generalmente se pueden apreciar dos partes notorias de la curva de régimen de secado: un período de régimen constante y uno de caída de régimen, aunque teóricamente existen o se pueden apreciar tres etapas del proceso o períodos de secado.

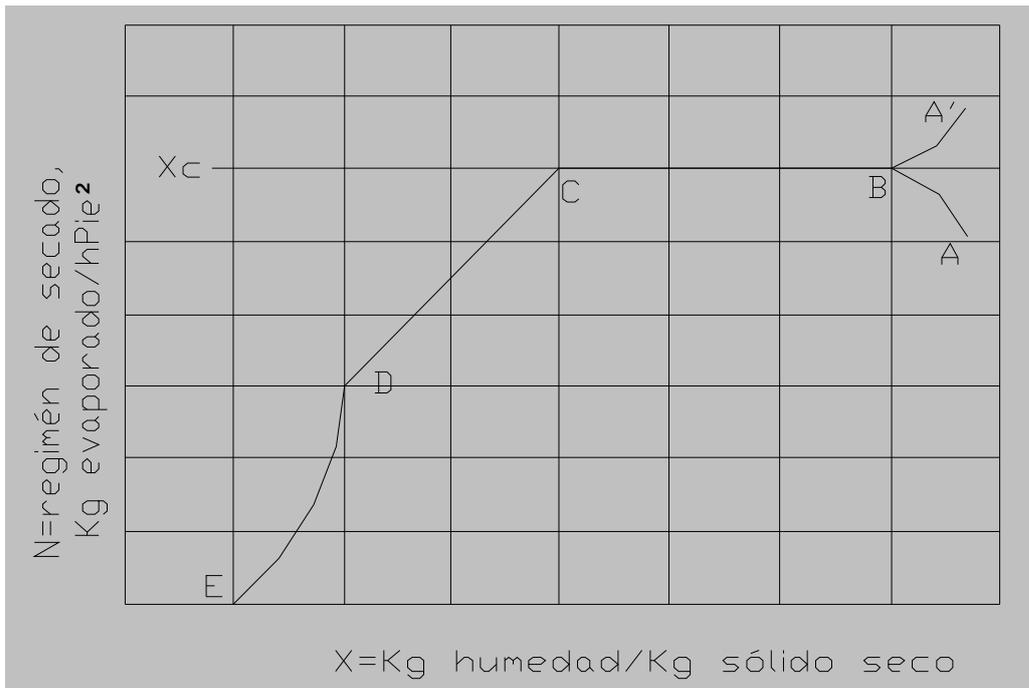


Figura 1.5 Curva de velocidad de secado vs humedad

Etapa A-B: Es una etapa de calentamiento (o enfriamiento) inicial del sólido normalmente de poca duración en la cual la evaporación no es significativa por su intensidad ni por su cantidad. En esta etapa el sólido se calienta desde la temperatura ambiente hasta que se alcance el equilibrio entre el enfriamiento por evaporación y la absorción de calor de los gases. Este equilibrio se alcanza a la temperatura de bulbo húmedo del gas.

Etapa B-C: Es el llamado primer período de secado o período de velocidad de secado constante; donde se evapora la humedad libre o no ligada del material y predominan las condiciones externas. En este período el sólido tiene un comportamiento no higroscópico. La velocidad de secado se mantiene constante si el gas tiene un estado estacionario y en general depende solo de las propiedades y velocidad del mismo. Si durante el proceso, el gas se enfría, la velocidad de secado decrece pero sigue en esta zona dependiendo de factores externos al sólido. Durante este período la temperatura del sólido se mantiene igual a la de bulbo húmedo del gas, ya que se mantiene el equilibrio alcanzado al final de la etapa de calentamiento.

Etapa C-E: Es el segundo período de secado o período de velocidad de secado decreciente; donde se evapora la humedad ligada del material y predominan las condiciones internas o las características internas y externas simultáneamente.



En estas condiciones el sólido tiene un comportamiento higroscópico. Durante el período, la temperatura del material sobrepasa la de bulbo húmedo debido a que el descenso de la velocidad de secado rompe el equilibrio térmico que mantiene estable la temperatura y una parte considerable del calor se emplea en un calentamiento del sólido. Ahora la humedad deberá ser extraída del interior del material con el consiguiente incremento de la resistencia a la evaporación.

Este período de velocidad decreciente puede dividirse en dos partes, con diferentes comportamientos de la velocidad de secado, la cual decrece cada vez más al disminuir la humedad del sólido. Esto implica dos modelos de secado diferente en dicha zona.

Un parámetro muy importante a determinar en los materiales a secar es la humedad a la cual se cambia del primero al segundo período, llamada humedad crítica. Esta depende del tipo del material y de la relación de secado en el primer período.

La forma de la curva de secado en el segundo período varía en dependencia de las características del material a secar. Existen curvas típicas de cuerpos capilar-porosos con grandes superficies específicas y de pequeñas superficies específicas así como de cuerpos coloidales (Madariaga, 1995).

Una de las tareas primarias en el estudio del secado de un sólido, es la identificación del modelo cinético que más adecuadamente se ajuste a los datos experimentales de secado. La adecuación de un modelo de secado consiste en la estimación de sus parámetros según algún criterio de comportamiento que tome en cuenta la magnitud de la humedad media del sólido y la magnitud de la humedad calculada por el modelo propuesto (Revista. Tecnología Química., N°4. 1983).

Novoa y Haber (1995) realizaron un estudio de la cinética de secado del cacao donde con el proceso de secado lograron una disminución de la humedad del grano hasta un nivel tal que garantiza la conservación en las debidas condiciones hasta su industrialización. El método utilizado para el procesamiento de los datos experimentales y ajustar los modelos matemáticos de las curvas de secado, se basó en una ecuación cinética que permite



describir todo el proceso de secado incluyendo ambos períodos, donde todos los parámetros de la ecuación se pueden determinar fácilmente a partir de la curva de secado y las condiciones límites (Strumillo, 1986).

De esta forma el modelo que permite realizar el ajuste a las curvas y estimar el tiempo de secado es el siguiente:

$$t = \frac{1}{k(x_0 - x_{eq})} \ln \frac{(x_0 - x_i) \cdot (x_{1eq} - x_{eq})}{(x_0 - x_{1eq}) \cdot (x_i - x_{eq})}$$

Este método ha sido probado en la práctica para el estudio de la cinética de secado de sólidos porosos y capiloporosos.

Novoa (1995) estima el coeficiente de transferencia de masa mediante la expresión:

$$K_g = m_s \cdot k \cdot (x_i - x_{eq}) / A$$

Donde:

$k$  = coeficiente de velocidad de secado ( $\text{min}^{-1}$ )

$K_g$  = coeficiente de transferencia de masa ( $\text{kg/m}^2 \cdot \text{min}$ )

$m_s$  = masa del material seco ( kg )

$x_i$  = humedad del material en un instante de tiempo ( kg/kg )

$x_{eq}$  = humedad de equilibrio ( kg/kg )

$x_{1eq}$  = contenido de humedad del material durante el período inicial de secado o humedad crítica ( kg/kg )

$x_0$  = humedad inicial del material ( kg/kg )

Equilibrio durante el secado.

Si el material a secar se pone en contacto con el aire húmedo entonces en principio son posibles dos procedimientos:

1- secado (desorción de la humedad del material) siendo la presión parcial del vapor ( $p_m$ ) sobre la superficie del material superior a su presión parcial en el aire o el gas ( $p_v$ ), es decir para  $p_m > p_v$ ;

2- humectación (adsorción de la humedad del material) para  $p_m < p_v$ .



En el proceso de secado la magnitud  $p_m$  disminuye y se aproxima a su límite  $p_m = p_v$ . En este caso comienza el estado de equilibrio dinámico, al que corresponde la humedad límite del material, llamada humedad de equilibrio ( $X_{eq}$ ).

La humedad de equilibrio depende de la presión parcial del vapor sobre el material ( $p_v$ ) o de la magnitud de la humedad relativa del aire que es proporcional a dicha presión y se determina por vía experimental (Treybal, 1965) (Menon and Mujundar, 1992).

Para este fin una muestra del material a secar se coloca en un medio ambiente con distinta humedad relativa ( $H_r$ ), siendo el tiempo constante y se pesa periódicamente. La humedad del material al lograr que su masa no varíe, alcanza el equilibrio.

Resumiendo la humedad contenida en un sólido húmedo ejerce una presión de vapor en un grado que depende de la naturaleza de la humedad, de la naturaleza del sólido y de la temperatura. Luego, si se expone un sólido húmedo a una corriente continua de de nuevo gas que contiene una dada presión parcial de vapor  $p$ , podrá el sólido perder humedad por evaporación, hasta que la presión de vapor de la humedad del sólido iguale a  $p$ . Entonces el sólido y el gas se hallarán en equilibrio. Habitualmente el peso constante para las muestras se logra en una desecadora, empleando soluciones de ácido sulfúrico de diferentes concentraciones y así se obtiene la dependencia entre la humedad de equilibrio del material y la humedad relativa del aire.

### **Conclusiones del capítulo**

- Se identificaron los fundamentos técnicos necesarios para la comprensión y el estudio experimental del proceso, a partir de la clasificación del sólido objeto de estudio que permite predecir el comportamiento del mecanismo de secado en correspondencia con sus propiedades físicas.
- El secado del sulfuro es un proceso muy estudiado desde el punto de vista teórico y experimental, estos abordan los aspectos tecnológicos del proceso considerando los fenómenos de intercambio de calor presentes en el mismo.



## CAPITULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

La correcta selección de los materiales y de los métodos a utilizar es fundamental en toda investigación, para garantizar su desarrollo eficaz y la veracidad de los resultados; durante el trabajo se ejerció un riguroso control de las variables a investigar, de ahí que haya sido uno de los momentos más cuidadosos, en cuanto a la toma y preparación de las muestras, obtención del sulfuro de níquel y cobalto seco; así como para el tratamiento de los resultados, empleando los paquetes estadísticos de cómputo.

### 2.1 Procedimientos y métodos empleados

Se utilizó el método dialéctico materialista como soporte para la concepción general de la investigación, al permitir la orientación y enriquecimiento de los siguientes procedimientos y métodos:

Del nivel teórico:

**Análisis-síntesis:** procedimientos teóricos empleados durante todo el proceso investigativo, especialmente en función de la fundamentación teórica, en la determinación de los presupuestos teóricos necesarios para la solución del problema científico de la investigación y para elaborar las conclusiones del trabajo.

**Inducción-deducción:** procedimiento que posibilitó desempeñar un papel fundamental en la formulación de la hipótesis, así como las generalizaciones realizadas a partir de los modelos estadístico - matemáticos obtenidos, mediante los cuales se pudieron realizar las inferencias estadísticas y deductivas.

Estos procedimientos teóricos se emplearon indistintamente en el desarrollo de los siguientes métodos:

**Histórico:** para la realización del estudio de la evolución de los distintos procesos de secado que han existido, hasta los recientes procesos de secado, que posibilitó conocer el camino a seguir en la investigación.

**Lógicos:** se emplearon para investigar las leyes generales y esenciales de los procesos de secado.

Dentro de los métodos lógicos fueron empleados los siguientes:



Método sistémico: se empleó para modelar los procesos de secado mediante el estudio de los distintos procesos existentes, aplicados o no de forma industrial, así como las relaciones entre ellos.

Método de la modelación: para determinar los modelos estadísticos matemáticos que mejor representan la relación existente entre las variables explicativas y los grados de secado y disolución.

Del nivel empírico:

La observación científica: Procedimiento empleado en la etapa inicial de la investigación en el diagnóstico del problema, siendo de gran utilidad en el diseño de la misma.

Como método la observación científica, instrumento universal del científico, se empleó en la percepción directa del objeto de investigación,

Método de la medición: se empleó para lograr realizar los experimentos con los valores prefijados de las variables independientes, así como al atribuir valores numéricos al calcular los valores de las variables dependientes una vez realizados los análisis químicos de las muestras secadas.

En la investigación no bastó con la realización de las mediciones, sino que fue necesario la aplicación de diferentes procedimientos que permitieron revelar las tendencias, regularidades, y las relaciones del fenómeno de secado, objeto de estudio, muestra de ellos son los procedimientos estadísticos,

Dentro de los métodos empíricos el experimento resulta el más complejo y eficaz; en la investigación se crearon las condiciones necesarias para determinar la influencia de las variables independientes en el secado; empleándose el diseño experimental "factorial completo", para determinar el número de pruebas a realizar en la experimentación, en función del número de factores a estudiar y sus niveles.

## **2.2 Materiales empleados en la experimentación.**

La muestra de sulfuro de níquel y cobalto utilizada para las evaluaciones fue obtenida en la Empresa Comandante René Ramos Latourt de Nicaro. Para la obtención de la misma se utilizó la instalación industrial formada por reactores, sedimentador y filtro prensa.



## Agente precipitante

El agente precipitante usado para obtener la muestra de sulfuro de níquel y cobalto utilizada en las pruebas de secado fue hidrógeno sulfuro de amonio (disuelto en licor amoniacal).

La concentración de reactivo utilizada para obtener la muestra de sulfuro de níquel y cobalto fue 140 g/L.

## Características de la materia prima (sulfuro de níquel y cobalto)

El sulfuro de níquel y cobalto es una torta de color negro que constituye el producto final de la planta de precipitación de cobalto, es sometido al proceso de secado para su posterior comercialización. Posee una densidad de 1600 - 1700 g/L; la temperatura de salida del filtro es de 43 °C y la relación líquido sólido de 0,8.

## Composición.

Para el proceso de secado se tomaron muestras del precipitado de la Planta de Precipitación de Sulfuros, 150 kg, con la composición química que se muestra en la tabla 2.1.

Tabla 2.1. Composición química promedio, % (muestra inicial de sulfuro de níquel y cobalto)

Ni	Co	Fe	Zn	Cu	Mn	MgO	SiO <sub>2</sub>	CaO	Na	H <sub>2</sub> O
31,62	9,26	2,53	0,02	1,53	0,05	0,65	0,41	0,006	0,02	56,74

Como se muestra en la tabla, el sulfuro de níquel y cobalto contiene más del 50 % de agua en su composición, elemento determinante para su posterior embarque, en cuanto al contenido de elementos valiosos el níquel, en primer lugar y el cobalto en segundo puesto, son los mayores constituyentes de la mezcla.

## 2.3 Materiales y equipos

1. reactor
2. agitador mecánico.
3. balanza.



4. papel de filtro.
5. termómetro de referencia.
6. beaker.
7. probeta.

#### **2.4 Instalación empleada en el proceso de investigación.**

Con el fin de lograr los objetivos propuestos en la investigación, la parte experimental estuvo dirigida a simular a escala de banco y piloto el proceso de secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto, para lo que se empleó la instalación que se muestra en las figuras XXX y XXX.

La instalación utilizada para el secado de los sulfuros de Níquel y cobalto a escala de banco consistió en una botella de acero termo-resistente acoplada a un motor eléctrico con cuña para el arme y desarme de la instalación, el cual descansa sobre una base metálica, (ver figura XXX), los gases residuales utilizados para el secado pasan a través de un flujómetro y abertura de una válvula mediante los cuales se realiza el control del flujo establecido durante el tiempo de secado. El gas residual es introducido al interior de la botella mediante una tubería. La medición de la temperatura del gas se realiza con un termómetro bimetálico.





Figura 2.1. Instalación de banco utilizada para el secado de sulfuro de Níquel y cobalto utilizando gases residuales)

La instalación utilizada para el secado de los sulfuros a escala piloto consistió en un secador cilíndrico rotatorio de acero termo-resistente acoplada por un sistema de rueda dentada y cadena a un motorreductor eléctrico con cuña para el arme y desarme de la instalación, el cual descansa sobre una base metálica, como se muestra en la figura 2.2, los gases residuales utilizados para el secado pasan a través de un flujómetro y abertura de una válvula mediante los cuales se realiza el control del flujo establecido durante el tiempo de secado. La alimentación de sulfuro se realiza a través de una tolva receptora. El gas residual es introducido al interior del cilindro secador por mediante una tubería de manera concurrente con el sulfuro a secar. La medición de la temperatura del gas se realiza con un termómetro bimetálico.



Figura 2.2. Instalación piloto utilizada para el secado de sulfuro de Níquel y cobalto utilizando gases residuales



Descripción de la instalación de banco utilizada en las pruebas de disolución de los sulfuros.

Las pruebas de disolución a presión se realizaron en un autoclave con un volumen de 8 litros y de 3-5 litros como volumen efectivo, posee calentamiento eléctrico, está provista de un agitador de turbina con variador de velocidad, serpentín de enfriamiento y enfriamiento en el sello, línea para alimentación de balones de gases, (oxígeno en el caso que nos ocupa) y descarga con toma muestra. El agitador, el pozo del termopar y un vaso para pruebas ácidas están fabricados de titanio, el resto es de acero inoxidable, como se representa en la figura 2.3.



Figura 2.3 Instalación para pruebas de disolución del sulfuro de níquel y cobalto

Principales factores que influyen en el proceso de secado del sulfuro de níquel y cobalto con gases residuales industriales.

Teniendo en cuenta que el proyecto tiene como objetivo el aprovechamiento de la energía térmica contenida en los gases residuales de los calcinadores o termoeléctrica de la empresa, para el proceso de secado de los sulfuros

Los parámetros de estudio son:

Tiempo de secado

Flujo de gases residuales



Temperatura de entrada de los gases

El procedimiento empleado durante la investigación se describe a continuación.

## **2.5 Metodología para el secado de los sulfuros**

### Prueba de banco:

1. Se toma una muestra húmeda del sulfuro mixto para el secado y es enviada a laboratorio para su caracterización.
2. Se pesa en una balanza analítica la cantidad de muestra requerida para la experimentación (1000 g)
3. La muestra es introducida en la botella (secador) con la ayuda de una espátula.
4. La botella se coloca en el mecanismo rotor, se introduce la tubería de gas dentro de la misma y se activa el mecanismo rotacional.
5. Se abre la válvula del gas residual garantizando el flujo establecido para mantener el suministro del mismo durante el tiempo previsto.
6. Concluido el tiempo de secado se cierra la válvula que suministra el gas residual, se retira la tubería del interior de la botella y se quita esta del sistema de rotación.
7. Posteriormente se extrae de la botella la muestra de sulfuro seco, se mide la temperatura y se pesa.
8. Se preparan 2 muestras, una para enviar al laboratorio analítico para su caracterización y otra para someter al proceso de disolución con el objetivo de determinar si durante el proceso de secado el sulfuro sufrió transformaciones que afecten el proceso de comercialización.

### Prueba piloto:

1. Se toma una muestra húmeda del sulfuro mixto para el secado y es enviada a laboratorio para su caracterización.
2. Se pesa en una balanza la cantidad de muestra requerida para la experimentación (1000 kg)



3. Se activa el sistema de rotación del secador cilíndrico, y se comienza el suministro de los gases residuales calientes al mismo, con el objetivo de establecer la atmósfera térmica dentro del equipo.
4. La muestra es introducida en el secador por medio de una tolva de alimentación dispuesta a tal efecto.
5. En proceso continuo se estabilizan los parámetros de operación.
6. Por la parte posterior del secador se va recibiendo el producto seco de sulfuro de níquel y cobalto, manteniendo el control constante de pesaje y temperatura final de sólido y los gases.
7. Se preparan 2 muestras, una para enviar al laboratorio analítico para su caracterización y otra para someter al proceso de disolución con el objetivo de determinar si durante el proceso de secado el sulfuro sufrió transformaciones que afecten el proceso de comercialización.

## **2.6 Metodología de disolución ácidas a presión de los sulfuros**

1. Se prepara una disolución de ácido sulfúrico en agua destilada hasta pH 1,5.
2. La disolución ácida se mezcla con la muestra de sulfuro mixto en el vaso del autoclave.
3. Se introduce el vaso en el equipo matriz, cerrándolo y comprobando su hermeticidad, hasta alcanzar la temperatura de trabajo donde se alimenta oxígeno a la presión prefijada durante el tiempo establecido.
4. Transcurrido el tiempo de reacción se extrae el material, se filtra y lava el sólido cuidadosamente con una solución de ácido sulfúrico diluido.
5. Se mide el volumen de licor. El sólido residual se pone a secar y posteriormente se pesa. Se envían ambas muestras al laboratorio para su caracterización.

## **2.7 Diseño experimental**

Para la fase experimental se diseñó la matriz de experimentación donde se utilizó el método factorial completo, que está basado en todas las posibles



combinaciones entre las variables de estudio y los niveles escogidos, para determinar la cantidad de pruebas experimentales se empleó la siguiente expresión:

$$N = n^{\theta}$$

donde:

N: número de experimento;

n: número de niveles;

$\theta$ : número de factores.

Durante la investigación se estudiaron tres variables y dos niveles, donde se obtuvo la cantidad de pruebas siguientes:  $2^3 = 8$ , a partir de la cual se elabora la matriz codificada de experimentación como se muestra en la tabla 2.2.

Tabla 2.2. Matriz de experimentación codificada

Pruebas	X <sub>1</sub>	X <sub>2</sub>	X <sub>3</sub>
1	+	+	+
2	-	+	+
3	+	-	+
4	-	-	+
5	+	+	-
6	-	+	-
7	+	-	-
8	-	-	-

Teniendo en cuenta el diseño, se procede al cálculo y determinación de los factores y niveles de experimentación, los cuales se muestran en la tabla 2.3.

Tabla 2.3. Factores y niveles de experimentación

Factores	Tiempo de secado (min)	Flujo de gases (m <sup>3</sup> /min)	Temperatura de gases (°C)
Niveles			
Mínimo	30	35	150



Básico	45	57	175
Máximo	60	79	200

### Tiempo de secado

Para la selección de este parámetro se tuvieron en cuenta los tiempos utilizados en distintas pruebas de secado de sulfuro realizadas en investigaciones realizadas anteriormente en el “Centro de investigación del níquel” (CEINNIQ).

### Flujo de gases residuales

Para la selección de este parámetro se tuvieron en cuenta, los flujos de aire utilizados en distintas pruebas de secado de sulfuro.

### Temperatura de los gases

Se fijó para las evaluaciones el valor de 200 y 150 °C por ser las temperaturas de los gases residuales de las Plantas Termoeléctrica y Calcinación y Sínter de la Empresa Comandante René Ramos Latour de Nicaro. En trabajo anteriormente realizado en el Centro de Investigaciones del Níquel, (etapa 03 del proyecto “Mejora y Utilización del Sulfuro de Níquel y cobalto de la Tecnología Carbonato Amoniacal”),

En dicho experimento se tomaron como variables de respuestas:

- Humedad final del sulfuro.
- Eficiencia de disolución en los metales deseados (Ni y Co)

Una vez obtenido los valores a los cuales se realizaran los experimentos se procede a la realización de la matriz real, la cual se muestra en la tabla 2.4.

Tabla 2.4. Matriz real de experimentación

Factores	Tiempo de	Flujo de gases	Temperatura de
1	30	35	150
2	60	35	150
3	30	79	150
4	60	79	150
5	30	35	200



6	60	35	200
7	30	79	200
8	60	79	200

## 2.8 Método de modelación estadística

Los resultados obtenidos fueron tratados por métodos estadísticos y analizados técnicamente, para obtener el modelo estadístico- matemático, según la metodología que se muestra:

### 1. Control de homogeneidad de los valores (según filas).

- Por cada una de las filas se toman los valores dudosos, por apreciación del investigador ( $y^*$ ).
- Determinación del valor promedio (sin tener en cuenta el error)
- Determinación de la desviación cuadrática (sin incluir el dudoso)
- Cálculo del valor del criterio t de student.
- Determinación de  $t_{tab}$  –grados de libertad  $f = n - 1$ , nivel de significación  $\alpha = 0,05$ .
- Comparación de los criterios.

Si  $t_{calc} < t_{tab}$ , el valor se corresponde con los otros valores de la serie y participa en el resto de los cálculos (NO hay que eliminarlo).

El valor promedio de cada una de las filas estará en función del análisis anterior. Si durante las pruebas realizadas no existen errores, pasar directamente al punto 2

### 2. Cálculo de la dispersión por fila y control de su homogeneidad.

- Se determina la dispersión por cada una de las filas según:
- Suma de las dispersiones.
- Cálculo del criterio de Cochran (G) para cada fila.

Para 1 grado de libertad  $f_1 = n - 1, f_2 = N, \alpha = 0,05$



Si  $G_{\text{calc}} < G_{\text{tab}}$ , la dispersión es homogénea de cada fila analizada con respecto a la población.

### 3. Cálculo de la dispersión de reproducibilidad.

- $S_y^2 = \frac{1}{N} \cdot \sum_{i=1}^N S_1^2$
- Error de reproducibilidad.
- Cálculo del criterio t student
- Determinación  $t_{\text{tab}}$ ,  $f = N(n - 1)$ ,  $\alpha = 0,05$ .
- Comprobación de los criterios  $t_{\text{calc}} - t_{\text{tab}}$ .

Si  $t_{\text{calc}} > t_{\text{tab}}$ , la diferencia entre los valores de la respuesta en diferentes puntos del plano está comprobada estadísticamente.

### 4. Cálculo del valor medio de respuesta y control del significado de su diferencia.

- Valor del criterio de t student .
- Determinación de  $t_{\text{tab}}$ ,  $f = n_{\text{max}} + n_{\text{min}}$ .
- Comprobación del criterio  $t_{\text{calc}} - t_{\text{tab}}$

Si  $t_{\text{calc}} > t_{\text{tab}}$ , la diferencia entre los valores de la respuesta en diferentes puntos del plano está comprobado estadísticamente.

### 5. Determinación de los coeficientes de la ecuación de regresión.

Este cálculo se realiza tomando los valores verticales de la matriz.

La ecuación de regresión es:  $\xi = b_0 + b_1 X_1 + b_2 X_2 + \dots + b_{12} X_1 X_2 + \dots + b_N X_N$

### 6. Control estadístico del significado de los coeficientes de la ecuación de regresión.

- Error de la prueba.
- Cálculo del criterio t student.
- Determinación  $t_{\text{tab}}$ ,  $f = N(n - 1)$ ,  $\alpha = 0,05$ .



d) Comprobación de los criterios  $t_{\text{calc}} - t_{\text{tab}}$ .

Si  $t_{\text{calc}} > t_{\text{tab}}$ , los coeficientes de la ecuación son significativos.

#### 7. Control de la adecuación de la ecuación de regresión.

- a) Se realiza el cálculo para cada punto del plano.
- b) Dispersión de adecuación.
- c) Se calcula el criterio de Fisher.
- d) Determinación  $F_{\text{tab}} : f_1 = N - (n - 1), f_2 = N (n - 1), \alpha = 0,05$ .
- e) Comprobación del criterio  $F_{\text{calc}} - F_{\text{tab}}$ .

Si  $F_{\text{calc}} < F_{\text{tab}}$ ; el modelo es adecuado al objeto investigado.

#### 8. Cálculo del coeficiente de correlación.

Los coeficientes de correlación pueden tomar los siguientes significados.

- 1-  $R = 0$ , No hay correlación.
- 2-  $R = 1$ , Relación positiva.
- 3-  $R = -1$ , Relación negativa

Todo el análisis estadístico fue auxiliado de programas profesionales de la materia como el EXCEL.

Cada una de las pruebas diseñadas se repitió tres veces y en las tablas y figuras se expresa el valor medio, con su previa limpieza de datos en los casos necesarios.

No obstante, en este análisis, se utilizó el software profesional Statgraphics, a fin de obtener gráficamente la información sobre las variables que intervienen en la evolución del experimento. Lo cual evidencia la actuación de cada una de ellas, en particular la variable determinante como la humedad.

### **2.9 Técnicas de análisis**

Análisis químico por el método de Fluorescencia de Rayos X (FRX)

Consiste en hacer incidir un haz de rayos X con energía suficiente para excitar los diferentes elementos que componen la muestra. Los átomos excitados al



pasar al estado normal emiten radiaciones X cuya longitud de onda va a ser característica de cada elemento y la intensidad de su fluorescencia es proporcional al contenido de dicho elemento en la muestra. El espectrómetro es capaz de separar las diferentes longitudes de onda y determinar su intensidad y mediante la resolución de un sistema de ecuaciones se calculan las concentraciones de los diferentes elementos relacionándolos con una serie de muestras patrones con las que se calibra el equipo. Se utiliza en la determinación de la composición química de las muestras sólidas que se obtuvieron producto de la lixiviación.

Análisis químico por el método de Espectrofotometría de Absorción Atómica.

Se basa en la absorción selectiva de radiaciones electromagnéticas de diversas regiones del espectro por el sistema homogéneo. Como resultado de la absorción de radiación el cambio de energía del sistema es tan despreciable que generalmente no conduce a la alteración de la integridad de las moléculas de la sustancia absorbente. Cuando la fuente de radiación es específica de un elemento y utiliza la excitación por llamas donde se descompone la sustancia en átomos se denomina método espectrofotométrico de absorción atómica – es el más empleado en este trabajo. Se utiliza en la determinación de la composición química de los licores obtenidos del proceso de lixiviación investigado y como método de control.

### **Conclusiones del capítulo**

- Se describe los utensilios, herramientas y materiales a utilizar en los experimentos propuestos en el secado al vacío con aire seco de sulfuros de Níquel más Cobalto.
- Se realizó el diseño de experimentos capaz de procesar estadísticamente los resultados experimentales durante las pruebas analizadas y propuestas.



## **CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS.**

### **3.1 Introducción.**

El desarrollo de la industria minero metalúrgica en la región de Moa, conlleva a disminuir los costos de producción e incrementar la calidad del producto final. Teniendo en cuenta el avance científico técnico, los procesos que requieren de mejoras sustanciales deben abrir paso a las investigaciones y proyecciones futuras para resolver el problema, siempre siendo compatibles la industria y ecología, pueden compaginar y coexistir. La interacción empresa y medio ambiente ha de ser beneficiosa y llegar a formar parte del entorno físico, económico, social y humano de la región. Es por ello que se requiere de la realización de investigaciones que estén verdaderamente comprometidas con la situación económica y medioambiental de la sociedad.

El objetivo del presente capítulo es: Analizar los resultados experimentales expuestos en el capítulo precedente, considerando el impacto económico y medioambiental asociado al secado de sulfuros mixtos de Níquel más Cobalto.

### **3.2 Análisis estadístico del efecto de las variables de entrada**

A partir del tratamiento estadístico de los resultados del proceso de secado del sulfuro mixto a escala de banco se obtuvo la ecuación de regresión que se adecua al proceso en cuestión.

$$H_2O = 1,64625 - 0,0672159 \cdot F_g - 0,154466 \cdot tr - 0,119477 \cdot Te + 0,00108712 \cdot F_g \cdot tr + 0,000113636 \cdot F_g \cdot Te + 0,00116667 \cdot tr \cdot Te$$

Conocida la ecuación modelo y con ayuda del Statgraphics se obtuvo la representatividad de las variables de entrada por medio del gráfico estandarizado de Pareto, como se muestra en la figura 3.1.

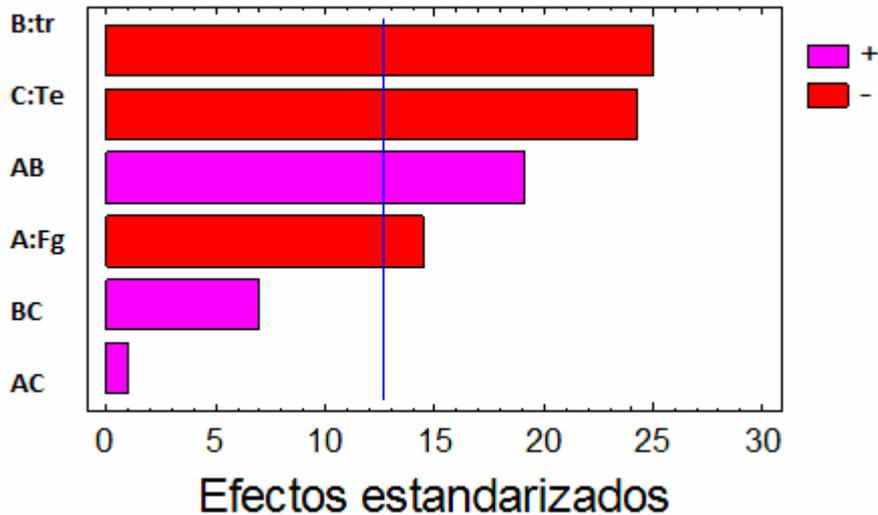


Figura 3.1 Gráfico estandarizado de Pareto para el secado de sulfuros mixtos a escala de banco

En la figura se muestra que las tres variables de entrada y una interacción que intervienen en el proceso de secado de los sulfuros mixtos son influyentes, en primer lugar el tiempo de retención, seguida de la temperatura de entrada del flujo gaseoso y el flujo de gas en tercer lugar, la interacción que tiene lugar es la que se efectúa entre el flujo gaseoso y el tiempo de retención.

Los valores negativos del modelo (mostrado también en el gráfico de Pareto) explican que con el aumento de cada factor de entrada disminuye la humedad del sulfuro mixto, como variable de salida.

En la figura 3.2 se muestra el efecto de cada una de las variables principales de entrada sobre la humedad del sulfuro.

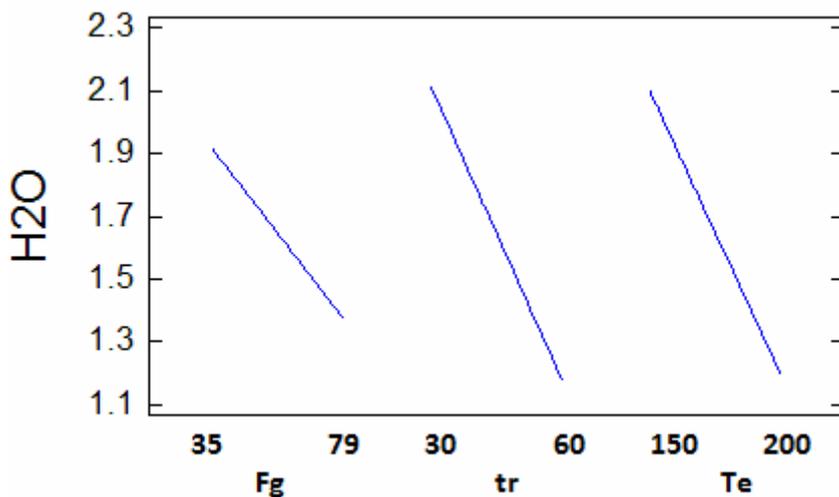


Figura 3.2 Gráfico de efectos principales durante el proceso de secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto a escala de banco

Se observa que cuando existe un aumento del flujo gaseoso desde 35 a 79 L/h hay una disminución en la humedad del sulfuro mixto desde 1,9 a 1,35 %, es decir provoca una diferencia en el contenido de agua de 0,55 %, mientras que cuando se varía el tiempo de retención de 30 a 60 min también se provoca una disminución del contenido de agua en los sulfuros mixtos desde 2,1 hasta 1,15 %, siendo entonces su diferencia de 0,95 %, de manera similar ocurre cuando se cambia la temperatura del flujo gaseoso de entrada de 150 a 200 °C, se obtiene una variación de 0,9 %

En la figura que sigue se muestra el efecto de las interacciones. Se considera el efecto de las interacciones cuando las líneas en cuestión se cruzan o tienen tendencia a ello. En el caso que compete solo existe efecto entre el tiempo de retención y el flujo de gas (las curvas tienen tendencia a cortarse), las otras dos interacciones tienden a ser paralelas.

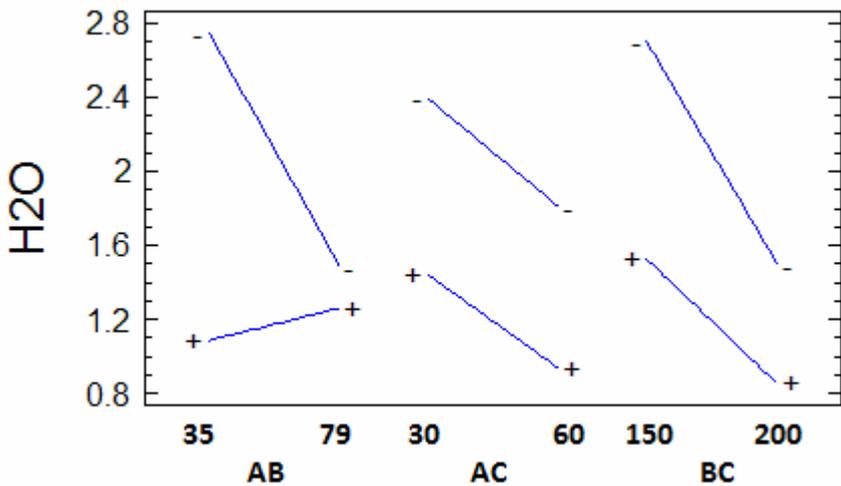


Figura 3.3 Gráfico de efectos secundarios durante el proceso de secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto a escala de banco

Se hizo un estudio similar para el caso de las pruebas a escala piloto, donde la ecuación de regresión que se adecua a la experimentación realizada se muestra a continuación.

$$H_2O = 2.05683 - 0.113389 \cdot F_g - 0.241375 \cdot tr - 0.142167 \cdot Te + 0.00182778 \cdot F_g \cdot tr + 0.000155556 \cdot F_g \cdot Te + 0.00138333 \cdot tr \cdot Te$$

A diferencia de las pruebas a escala de banco el promedio de humedad en el sulfuro mixto secado es mayor (0,41 %).

A partir de la ecuación modelo y empleando el software profesional Statgraphics se obtuvo el gráfico estandarizado de Pareto, como se muestra en la figura 3.4

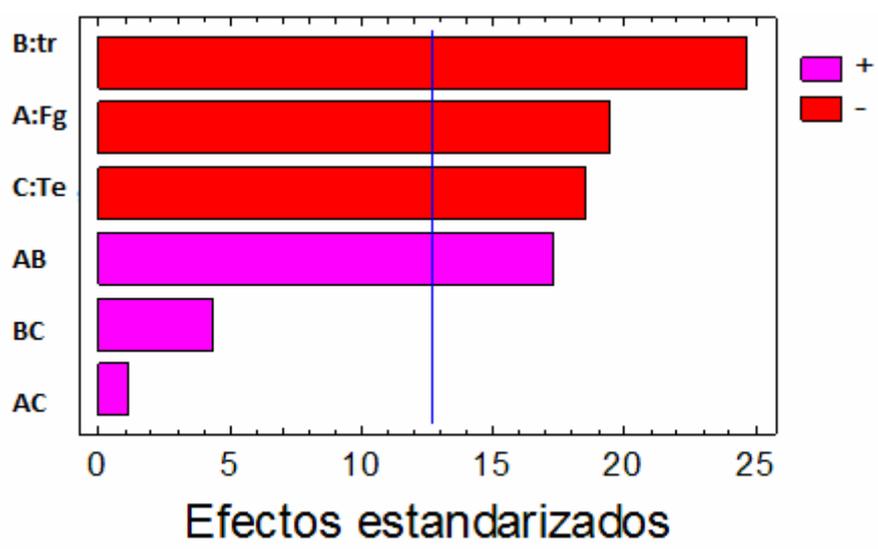




Figura 3.4 Gráfico estandarizado de Pareto para el secado de sulfuros mixtos a escala piloto

En la figura se observa que el comportamiento es similar al estudiado a escala de banco, con prioridad al efecto de las tres variables principales, seguida a la interacción entre el flujo de gas y el tiempo de retención, pero todos con valores mayores que en el caso de banco.

En la figura 3.5 se muestra el efecto de cada una de las variables principales de entrada sobre la humedad del sulfuro a escala piloto.

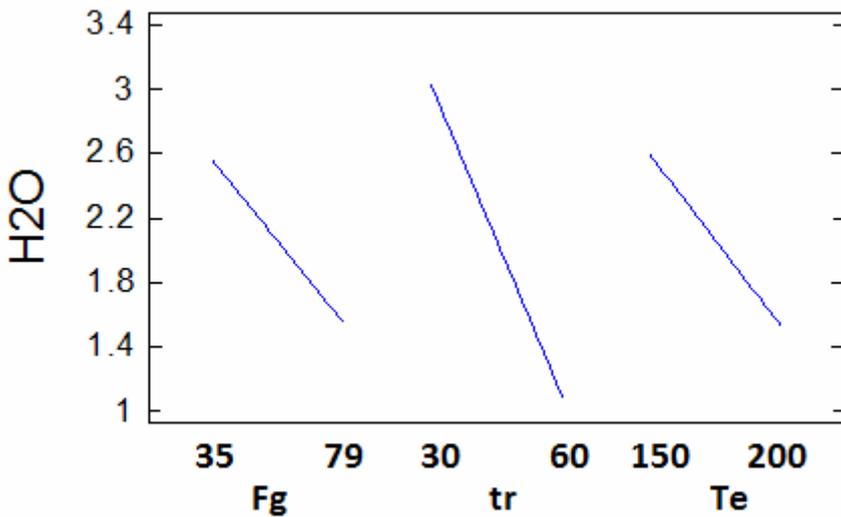


Figura 3.5 Gráfico de efectos principales durante el proceso de secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto a escala de banco

Se hace un análisis similar al del banco, en la figura XXX se muestra que cuando existe un aumento del flujo gaseoso desde 35 a 79 L/h hay una disminución en la humedad del sulfuro mixto desde 2,6 a 1,6 %, es decir provoca una diferencia en el contenido de agua de 1,0 %, mientras que cuando se varía el tiempo de retención de 30 a 60 min también se provoca una disminución del contenido de agua en los sulfuros mixtos desde 3,0 hasta 1,10 %, siendo entonces su diferencia de 1,90 %, de manera similar ocurre cuando se cambia la temperatura del flujo gaseoso de entrada de 150 a 200 °C, se obtiene una variación de 1,1 %. Comparativamente las diferencias resultantes en las pruebas a escala piloto son mayores que las obtenidas a escala de banco, y su comportamiento es similar.



En la figura 3.6 se muestra el gráfico de interacciones que permite destacar las interacciones más influyentes.

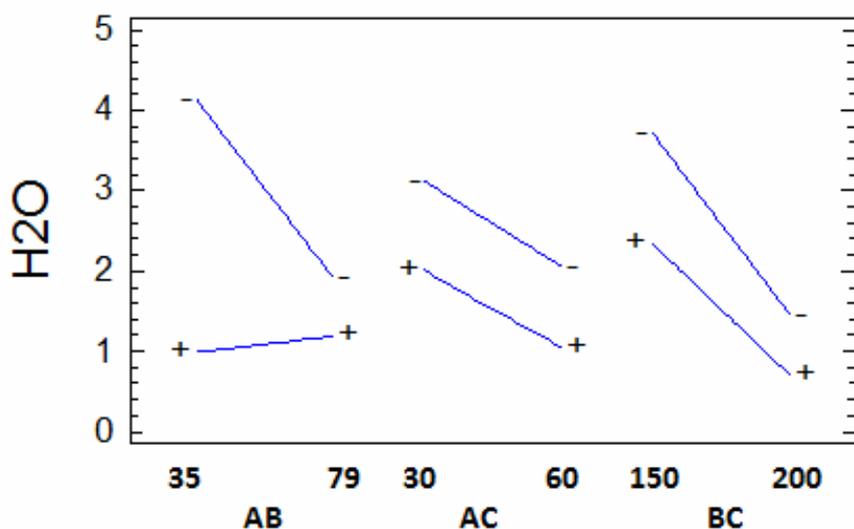


Figura 3.6 Gráfico de efectos secundarios durante el proceso de secado del sulfuro mixto de níquel y cobalto a escala de banco

También se corrobora que la interacción entre el tiempo de retención y el flujo de gas son los influyentes en el proceso, destacado ya en el diagrama de Pareto.

### 3.3 Valoración económica

Estimado del costo de capital:

Los cálculos de los equipos fundamentales del proceso se realizaron por consultas a proyectistas del Centro de Proyectos del Níquel. Además se tuvo en cuenta los reportes como el Estudio Técnico Económico de la Refinería de Níquel / Cobalto realizado por Krebs.

El secador y las tuberías se calcularon a partir de la masa del metal requerido para su construcción y se utilizó como referencia el costo de fabricación del Combinado Mecánico del Níquel "Gustavo Machín".

Los precios de instrumentación, electricidad, instalación, construcción e ingeniería fueron calculados a partir de coeficientes de estimación con respecto al costo del equipamiento empleados para estudios de factibilidad de proyectos de orden de magnitud (30% error).



Los costos indirectos de la inversión se calcularon tomando como referencia determinados porcentajes de materiales y de los costos directos

El capital de trabajo se calculó como el 15% del capital fijo. Este último es la suma de los costos directos e indirectos de la inversión). Los resultados del cálculo se muestra en la tabla 3.1.

Tabla 3.1 Costo capital

Resumen	Total (USD)
Construcción y Montaje	27 446,96
Equipamiento y Materiales	164 052,06
Otros Gastos	24 321,40
Contingencia	19 149,90
Capital de Trabajo	4 620,00
Costo Capital Total	239 590,33

Estimado de costos de operación:

Los costos de operación se calcularon considerando 330 días de trabajo anuales. Por este concepto se secarían 450,0 t de Níquel y cobalto en forma de sulfuros con humedad de 50 %, que representan una capacidad de 3600 toneladas de sulfuro húmedo al año.(ver tabla 3.2).

Tabla 3.2 Estimado del Costo Total de Operación (MUSD /año)

Partidas	Costo
Mano de Obra	71,084
Facilidades auxiliares (Energía eléctrica, aire)	33,553
Mantenimiento	23,497
Suministro de Operación	4,699
Administración	7,108
Rentas	2,702
Contingencia	14,264
TOTAL	156,909



En el proceso no se contemplan costos para reactivos químicos, los mayores costos son por consumo de energía eléctrica y mano de obra. El costo anual estimado de operación es de 156 909,00 USD/año.

Costo de Mano de Obra:

El costo de mano de obra incluye el salario, las vacaciones y la seguridad social, asumiendo su valor en USD, para un muestrero y un operador por turno. Se han previsto 4 turnos de trabajo.

Facilidades Auxiliares:

La energía eléctrica y el aire para el filtro son los útiles fundamentales del proceso. La energía eléctrica se concentra en los requerimientos de los ventiladores y motores.

Análisis de los resultados

La factibilidad de la inversión se ha calculado considerando un período de vida útil de 11 años, incluyendo 1,5 año para la construcción y puesta en marcha. Los ingresos por venta se estimaron sobre la base de recuperar con el nuevo secador un 5 % del sulfuro que se pierde por el método de secado actual. El precio de venta del sulfuro de níquel y cobalto estimado fue 18 400,00 USD/ton de Níquel y cobalto.

En la tabla 3.3 se muestra el resumen de los principales indicadores económicos-financieros:

Tabla 3.3 Indicadores económicos-financieros

Indicador	UM	Valor
Inversión de Capital Total (Ctc)	USD	270 215,87
Gastos de fabricación	USD/a	165 633,50
Gasto total	USD/a	221 108,52
Ingresos por ventas	USD/a	414 000,00
Ganancia anual neta	USD/a	164 991,48



Indicador	UM	Valor
Ganancia anual descontando impuestos (Impuesto 35%)	USD/a	107 244,46
Valor actualizado neto (VAN al 10%)	USD	509 363,54
Tasa interna de retorno (TIR)	%	42
Período de recuperación de la inversión	años	1,5

Los resultados mostrados en la tabla anterior, indican que es factible técnica y económicamente la ejecución del secado oxidante de sulfuro de Níquel y cobalto en un equipo rotatorio, utilizando los gases residuales de la Planta de Calcinación de la Empresa “René Ramos Latour”. El valor actualizado neto, para un 10% de interés (VAN al 10%) es positivo y la tasa interna de retorno es igual a 42%. El tiempo de recuperación inversión es de 1,5 años a partir de la culminación de la construcción y puesta en marcha.

Se realizó además un análisis de sensibilidad para el proyecto en el que se consideraron los siguientes factores:

Incremento de los costos capitales y de operación en un 20%.

Disminución del precio de venta en un 20%.

Los resultados obtenidos se muestran a continuación:

Tabla 3.4 VAN, TIR, Recuperación

Indicadores	Caso Base	Incremento del capital fijo	Incremento del costo fabricación	Disminución de ingresos
		20%	20%	20%
VAN al 10% (USD)	509 363,54	42 0771,34	348 799,81	226 518,36
TIR (%)	42	32	32	25
Período de Recuperación (años)	1,5	3,4	3,4	2,8



En la tabla anterior, se demuestra que, ante afectaciones del 20 % en los costos de capital fijo, de fabricación y los ingresos por ventas, los indicadores fundamentales son positivos, por lo que el proyecto de inversión, sigue siendo factible desde el punto de vista económico-financiero y es recomendable su ejecución.

### **3.4 Valoración medioambiental**

#### Información sobre la ubicación de la instalación (zona, región, territorio).

El área principal de la planta metalúrgica Ernesto Che Guevara, 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. Además, debe resaltarse la presencia dominante del relieve premontañoso y formas del relieve estrechamente asociadas a los procesos erosivo - denudativos y de pendiente.

En el caso de los geosistemas del área correspondiente a la planta y su zona de influencia, se caracterizan por estar localizados en un sector de llanura marina erosivo-abrasiva plana, escalonada sobre el manto ofiolítico y gabroides de la asociación ofiolítica, localizado en el parteaguas del tercio inferior, entre las desembocaduras de los ríos Moa y Yagrumaje, por el oeste y el este respectivamente, con alturas entre 20 y 40 m s.n.m.m., con pendiente fuerte hacia el mar y separada de este por una llanura marina costera acumulativa muy baja, formada por depósitos aluviales y marinos, sobre calizas órgano-detríticas, con vegetación de manglar y un ancho variable, entre 300 y 1500 m.

La planta se localiza en la llanura alta. En el sector costero de la llanura baja, se construyeron los diques para la disposición de las colas del referido proceso de lixiviación carbonato amoniacal.



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 pequeñas 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- (plantas e instalaciones metalúrgicas, viales, almacenes, líneas eléctricas etc.)

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 planos 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 más al norte, la barrera arrecifal.

#### Geosistemas seminaturales terrestres y marinos:

- Corrientes fluviales (ríos y arroyos).
- Plano aluvial aterrazado con vegetación ribereña, sobre suelos aluviales.
- Vegetación ribereña en cauces de arroyos.
- Bosque de pinos degradado
- Bosque de pinos conservado
- Áreas con vegetación degradada (charrascal), por la extracción forestal y la minería.
- Bosque pluvial de baja altitud.
- Superficies minadas rehabilitadas con vegetación herbácea y plantaciones forestales.
- Llanuras costeras con restos de vegetación de bosques y matorrales secundarios.



- Llanuras costeras bajas transformadas por la construcción de diques.
- Planos aluviales bajos con vegetación ribereña e influencia de las mareas.
- Deltas con vegetación de manglar
- Bahía poco profunda

#### Geosistemas naturales marinos:

- Barrera arrecifal.
- Talud oceánico y océano abierto.

#### Geosistemas antrópicos:

##### Tecnógenos:

- Mineros: Caminos y trochas mineras; viales y líneas eléctricas; áreas minadas.
- Industriales y civiles: Plantas e instalaciones metalúrgicas; viales; almacenes y oficinas; líneas eléctricas; ductos, correas transportadoras y conductoras.

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 florístico y faunístico, no posee ningún valor natural. Se debe señalar que las residencias más cercanas se encuentran a 6 km de distancia en dirección este y oeste.

En la Empresa se han realizado una serie de estudios ambientales los cuales se nombran a continuación:

#### Tipo de actividad a ejecutar.

Es un Proyecto de Inversión consistente en le montaje de un secador industrial para el secado de sulfuros mixtos de níquel y cobalto.

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<sup>3</sup> de NH<sub>3</sub> 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  $\text{NH}_3$  y  $\text{SO}_2$ . Frecuencia mensual.



- b) Monitoreo periódico de la concentración de  $\text{NH}_3$  y  $\text{SO}_2$  en los gases de salida del secador. Frecuencia mensual

### **Conclusiones del capítulo**

- Se demostró la influencia que tienen las variables tiempo de retención temperatura de entrada de los gases y el flujo de gases en el proceso de secado de sulfuros..
- Se muestran los modelos matemáticos que rigen el proceso de secado para los diferentes experimentos.
- Es una tecnología limpia, que ayuda sustancialmente a la recuperación del medio ambiente.



## **CONCLUSIONES.**

1. El proceso de secado del sulfuro de Níquel y cobalto producido en la Empresa Cmdte René Ramos Latour de Nicaro, utilizando un secador rotario que aprovecha los gases residuales de la Planta de calcinación es viable desde los puntos de vista, técnico, económico.
2. Se evaluó a escala de banco y piloto el secado de sulfuro mixto de Níquel y cobalto utilizando gases residuales, demostrándose que bajo las condiciones prefijadas de experimentación (150 y 220 °C, tiempo de secado de 30 a 60 min y flujo de gases de 35 a 79 L/h) es posible disminuir la humedad del producto a valores promedios, para las diferentes condiciones, entre 1,64 y 2,05 %, humedades permisibles para la comercialización del sulfuro.



## RECOMENDACIONES

1. Realizar pruebas de secado de sulfuros mixtos de Níquel y cobalto a escala industrial utilizando los gases residuales de las Plantas Termoeléctrica y Calcinación de la ECRRL de Nicaro.
2. Continuar profundizando en el balance de la reacción química que ocurre al auto combustionarse el sulfuro.
3. Realizar el estudio de factibilidad de la introducción del secado oxidante con gases residuales de Calcinación para el sulfuro de níquel que se obtiene en esta Planta de los licores de níquel disuelto.



## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Basilio Bychko H. 1983. Cuasilinealización como método de estimación de parámetros en modelos de cinética de secado". Rev. Tecnología Química. N°4. pág 209.
2. Bowman, R.S., Sullivan, E.J. y Li, Z., 2000. Uptake of Cations, Anions, and Nonpolar Organic Molecules by Surfactant-Modified Clinoptilolite-Rich Tuff, en Natural Zeolites for the Third Millenium, Colella C. y Mumpton, F.A. Eds., 287-297
3. Cooney, D. O., 1998. Adsorption design for waterwaster treatment. Lewis Publishers, Washington, D.C. USA
4. Guerra J. " Velocidad de secado de bagazo bajo condiciones constantes de flujo a través". Universidad de la Habana, Serie 6, N°6. 1971
5. Gunes S. And Schlunder. "Influence of mechanical stirring on drying rates in contact drying of coarse granulation", Chem. Eng., Vol 14. N°6. 1980./pág 387.
6. Hall. C. W. "Drying technollogy An International Journal". New York. 1983
7. Hernández R. Secado atmosférico de los sulfuros mixtos de níquel y cobalto. Informe técnico. Empresa Comandante René Ramos Latour. 1992
8. Herrera. V. 1964. Reporte técnico del proceso carbonato amoniacal. Empresa Comandante René Ramos Latour.
9. Hunter, R.J., 1994. Introduction to Modern Colloid Science, Oxford University Press, New York, USA
10. Kasatkin A. " Operaciones básicas y aparatos en la tecnología química. T-I./pág 262-366.
11. Keey R. B. 1978. "Introduction to industrial drying operations"., Pergamun Press, Oxford.
12. Knoule F. " El secado". Bilbao. Ediciones Urno. 1968. /Pág. 50-150.



13. Leyva-Ramos, R y Juárez Martínez, A., 1991, Adsorción de Fluoruros en varios tipos Comerciales de Alumina Activada, Avan. Ing. Quím., 3, 107-111
14. Lobaina. O. 1994. Reporte técnico. Centro de Investigación del Níquel. Moa.
15. Moreira. R. 1996. Estudio de la tostación oxidante de los concentrados de sulfuros de Níquel y cobalto de la Empresa Cmdte. Ernesto Guevara. Informe técnico. Instituto Superior Minero Metalúrgico Moa..
16. Menon and Mujundar . 1992. " Drying of solids". Mc Graw Hill, Montreal, Canadá..
17. Novoa R. 1993. " El secado de zeolita LTA a escala de laboratorio" (III). Rev. Tecnología Química. Vol XIV. N°2,./pág 50-55
18. Orozco, G., 1996. Caracterización geólogo mineralógica del yacimiento de tobas zeolitizadas Caimanes, Moa, Holguín. Revista Minería y Geología, Vol 13 número 3, pp 45. Cuba.
19. Ostroumov, M., 2003. Zeolitas de México: Diversidad mineralógica y aplicaciones. <http://smm.iim.umich.mx/zeolitas.htm>.
20. Papagiones G. J. 1992. "Select the right dryer". Chem. Eng. Progress.,Dec./pág 21-27
21. Paumier, V.; Díaz, M., A. Navarro, A., 1998. Aplicaciones de zeolitas naturales para remover contaminantes gaseosos inorgánicos. IV Taller de la Cátedra de medio ambiente, 17-19 de Junio de 1998, Ciudad de la Habana.
22. Peacok. E. M. 1985. "Heatless dryers are not heatless". Chem. Eng. Vol. 92. /pág 199-203
23. Perry J. H. " Chemical Engineering Handbook. 6<sup>ta</sup> Edición. Mc Graw Hill, New York.pág 20, 7-20, 8.
24. Peter M. S: 1968. " Plant desing and economics for chemical engineers . Second Edition..
25. Robinson J. W. 1992. "Improve dryer control". Chem. Eng. Progress.,Dec.pág 28-33
26. Sánchez B., Maricel Dora P. 1980. " Estudio del mecanismo de secado de la bentonita de calcio". Tesis en Ing. Química. Fac. de Procesos Químicos y Alimentarios. ISPJAE..



27. Strumillo C. 1986. "Drying principles, applications and design". Gordon and Breach Science publishers. Suiza.
28. Treybal R. C. " Operaciones con transferencia de masa". Cap. XII.pág 653.
29. Walas S. M. 1990. "Selection and design chemical process equipment". University of Kansas.pág 12-19
30. Willian L. Root. 1983. "Indirect drying of solids". Chem. Eng., May 2. pág 52.