



**Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia**

Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico

**EVALUACIÓN DE CÁLCULO DE ARRASTRE DE
POLVO EN LA SECCIÓN DE SECADEROS DE LA
EMPRESA COMANDANTE ERNESTO CHE
GUEVARA**

ROBERTO VARGAS RODRÍGUEZ

**MOA
2012**



**Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Departamento de Metalurgia**

Tesis en opción al título de Ingeniero Metalúrgico

**EVALUACIÓN DE CÁLCULO DE ARRASTRE DE
POLVO EN LA SECCIÓN DE SECADEROS DE LA
EMPRESA COMANDANTE ERNESTO CHE
GUEVARA**

ROBERTO VARGAS RODRÍGUEZ

TUTORES

**Lic. Ariel Días Puig
Especialista de Medio Ambiente en la Empresa
Comandante Ernesto Che Guevara**

**Prof. Tit., Ing. Pedro Enrique Beyris Mazar, Dr. C.
Instituto Superior Minero Metalúrgico**

**MOA
2012**

RESUMEN

La aplicación de los métodos tradicionales para calcular el valor de arrastre de polvo de los secaderos en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara introduce un error en el cálculo metodológico del arrastre de polvo, influyendo en las pérdidas indeterminadas de la industria. Por esta razón el objetivo de este trabajo fue evaluar la metodología para la determinación del arrastre en los secaderos, determinándose las fuentes de errores más importantes que inciden significativamente en las pérdidas indeterminadas de la planta. Para ello se realizaron muestreos isocinéticos en el ducto de salida de los gases de los secaderos en el período diciembre de 2011 a marzo de 2012. Fueron utilizados los métodos “determinación de material particulado de fuentes estacionarias de emisiones” y “determinación de humedad de los gases en la chimenea”, para las mediciones de arrastre de polvo y la humedad respectivamente. El valor del arrastre de polvo fue de 31,69 %, inferior a los reportados tradicionalmente. Por primera vez se reporta el valor medido de la humedad de los gases en este punto, que resultó 13,5 % inferior que la estimada en el proyecto (36,8 %). Se comparó el efecto de este parámetro en el cálculo del arrastre encontrándose que su omisión conlleva a errores significativos en el balance de materiales de la planta.

SUMMARY

Traditional method application for calculating dust carry over at Commander Ernesto Che Guevara Nickel Processing company's dryer plant, introduces an error in the methodological calculation of dust carry over, which influences on the company's non-defined losses. For this reason this paper aim was evaluating the methodology for determining dust carry over in the dryers, determining the most important error sources which influence significantly on the non-determined losses of the plant. For this purpose Isokinetic samplings were carried out at the gas outlet duct of the dryers in the December 2011 to March 2012 period. The methods "determining particulate material emissions from stationary sources" and "determining moisture in the stack gases," were used for evaluating the dust carry over and moisture respectively. The dust carry over value was of 31,69 %, lower than the value reported traditionally. For the first time the measured value of gases humidity was reported, which was 13,5 % lower than the estimated (36,8 %). The effect of this parameter was compared for dust carry over calculation was compared and it was observed that its omission lead to significant errors at the dryer plant material balance.

DEDICATORIAS Y AGRADECIMIENTOS

"A mis hijos,

.....por hacer más perfecto aquello en que creo.

"A mi esposa y mis padres,

.....por contribuir en mi empeño.

"A mis tutores,

...por ser mi guía.

"A mis profesores del Instituto Superior Minero Metalúrgico,

.....por su ejemplo de profesionalidad.

"A mis compañeros y amigos...

.....y todos aquellos que hicieron posible la confección y elaboración

de este trabajo."

A todos muchas gracias.

R.Vargas.

ÍNDICE

| | |
|--|-----------|
| INTRODUCCIÓN | 1 |
| CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO | 4 |
| 1.1 Introducción | 4 |
| 1.2 Fundamentación teórica de la temática tratada | 4 |
| 1.3 Principios físicos fundamentales de la separación de partículas de polvo de la corriente de gas | 5 |
| 1.4 Esquema tecnológico de la planta de preparación de mineral | 6 |
| 1.5 Distribución del polvo por la sección del gasoducto. Contenido de polvo en el gas | 9 |
| 1.6 Sistema de limpieza de los gases de secaderos | 13 |
| 1.7 Errores en la medición del contenido de polvo en los gases | 14 |
| 1.8 Trabajos precedentes | 15 |
| 1.9 Conclusiones del capítulo 1 | 17 |
| CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS | 18 |
| 2.1 Introducción | 18 |
| 2.2 Materiales y métodos empleados para la determinación de material particulado (Masa de polvo en los gases, M_{polvo}) | 18 |
| 2.3 Determinación del contenido de humedad en los gases | 23 |
| 2.4 Conclusiones del capítulo 2 | 27 |
| CAPÍTULO 3. ANÁLISIS DE RESULTADOS | 28 |
| 3.1 Introducción | 28 |
| 3.2 Evaluación de la metodología para el cálculo del arrastre de polvo mineral en los gases de salida de los secaderos | 28 |

| | |
|---|-----------|
| 3.3 Determinación de la humedad de los gases a la salida de los secaderos ... | 30 |
| 3.4 Determinación de la carga y el arrastre de polvo mineral en los gases a la salida de los secaderos en base seca y comparación con estimaciones en base húmeda | 31 |
| 3.5 Impacto económico | 35 |
| 3.6 Principales impactos al medio ambiente de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara | 36 |
| 3.7 Conclusiones del capítulo 3 | 37 |
| CONCLUSIONES | 38 |
| RECOMENDACIONES | 40 |
| BIBLIOGRAFÍA | 41 |
| ANEXOS | 45 |

INTRODUCCIÓN

La industria cubana del níquel cuenta con más de 60 años de experiencia en la obtención del níquel y cobalto a partir de los minerales lateríticos, estos recursos han sido la base para el desarrollo de una prominente industria extractiva especializada en la recuperación de los valores de níquel y cobalto presentes en estos minerales, se utilizan dos tecnologías para su procesamiento, la ácida basada en la lixiviación a presión con el uso del ácido sulfúrico como medio lixivante y la tecnología carbonato amoniacal basada en la lixiviación atmosférica y que usa el amoníaco como compuesto fundamental en el proceso de lixiviación.

Ambas tecnologías requieren de la preparación de la mena para su aplicación al proceso de lixiviación.

La Tecnología Carbonato Amoniacal realiza la preparación del material sobre la base de la extracción de la humedad del material (el secado), y la molienda seca hasta valores de un 85 % de menos 0,074 mm, en correspondencia con el proceso de reducción que se realiza en los hornos de hogares múltiples, una vez reducido el níquel y el cobalto presentes en el material, estos se lixivian en una solución carbonato amoniacal, la que se purifica mediante una separación parcial del cobalto contenido en el mismo donde se obtiene un sulfuro de níquel y cobalto; posteriormente ocurre la destilación de los licores amoniacales en las torres de destilación, se calcina el carbonato de níquel y se sinteriza, y se obtiene el óxido de níquel sinterizado. El secado, desde el punto de vista industrial, es un proceso de transferencia de calor y de masa, mediante el cual se hace pasar un producto desde un estado inicial húmedo a

otro estado final menos húmedo, lo que implica extraer el líquido que le impregna, moja o disuelve para obtener un producto diferente al inicial, ya sea como producto final o como intermedio en un proceso de fabricación dado. Este líquido suele ser agua natural o mezclada, también puede tratarse de otro tipo de disolvente orgánico e inorgánico.

Este proceso en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara tiene la finalidad de reducir el contenido de humedad del mineral laterítico hasta valores mínimos, con la mayor eficiencia posible para facilitar la molienda.

Los gases que se forman durante el proceso de producción de metales contienen una u otra cantidad de polvo que aparece debido a la molienda de cuerpos sólidos y durante el posterior traslado y transportación de materiales áridos.

Con mayor intensidad el polvo se forma durante los procesos metalúrgicos de calcinación y fusión de concentrados, procesos de sublimación, etcétera.

Situación problemática

La aplicación de los métodos tradicionales para calcular el valor de arrastre de polvo mineral de los secaderos en la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara introduce un error en el cálculo metodológico del arrastre de polvo mineral, influyendo en las pérdidas indeterminadas de la industria.

Problema

Insuficiente conocimiento de las consecuencias del método de cálculo del arrastre de polvo mineral en los secaderos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, sobre las pérdidas de mineral.

Objeto de estudio

Metodología del cálculo del arrastre de polvo mineral.

Campo de acción

Arrastre de polvo mineral en secadero de mineral.

Hipótesis

Si se evalúa el método de cálculo para determinar el arrastre de polvo mineral en la planta de secaderos se podrán disminuir los valores de pérdidas indeterminadas.

Objetivo general

Evaluar el método de cálculo para determinar el arrastre de polvo mineral en los secaderos de la planta de preparación de mineral de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Objetivos específicos

- Determinar la humedad y la masa de polvo arrastrada por los gases de salida de los secaderos de la planta de preparación de mineral de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.
- Comparar el efecto de la humedad en la metodología actual con la metodología convencional para la determinación del arrastre de polvo mineral en los secaderos de la planta de preparación de mineral de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

CAPÍTULO 1. MARCO TEÓRICO

1.1 Introducción

El marco teórico-metodológico del objeto de estudio admite detectar de forma primordial las diferentes características e interacciones que constan entre los múltiples elementos que están presentes en la investigación.

1.2 Fundamentación teórica de la temática tratada

Limpieza de Gases

La captación y recolección de polvo en las fábricas de metalurgia de metales no ferrosos, es una de las grandes problemáticas del mundo actual a la cual es necesario dar respuesta inmediata por la necesidad de proteger el medio ambiente, los recursos naturales y la salud de la población.

En su mayoría las etapas del proceso de producción de metales no ferrosos (extracción de níquel) van acompañadas de la formación de polvos que salen con los gases tecnológicos y de ventilación.

La cantidad de polvos generados por las fábricas llamado arrastre o conversión de metal en polvo, depende del proceso metalúrgico, de su intensidad, de la estructura del equipo, características físico-químicas de la carga (dimensiones, resistencia, contenido de metales y compuestos fáciles de sublimar, etcétera.) entre otros factores.

Los valores límites permisibles de las concentraciones de polvo que pueden ser lanzadas a la atmósfera a nivel internacional son de 20 a 30 g/m³.

Formación de polvos

El polvo se forma con mayor intensidad durante los procesos metalúrgicos tales como la calcinación, fusión de concentrados en la carga hirviendo y en suspensión, procesos de sublimación, etcétera. También se forma polvo debido a la molienda de cuerpos sólidos y durante el posterior traslado y transportación de materiales áridos. En estos dos casos las partículas pequeñas de materiales se arrastran por la corriente de gas (aire). La autotrituración del material es otra clase de formación de polvo, la misma tiene lugar durante el desmenuzamiento del material, el frotamiento entre los pedazos de material, los choques de los pedazos contra las paredes de los equipos, y otros. El aumento de la temperatura en algunos procesos puede contribuir a la formación de polvo como consecuencia, de la disminución de la cohesión entre las partículas de materiales áridos y, como resultado de un aumento grande y brusco del volumen de gas formado durante la reacción y, por consiguiente, un incremento brusco de la velocidad de su movimiento fenómeno que tiene lugar en las explosiones.

El polvo se puede formar también durante el proceso de tostación o calentamiento del material en pedazos lo que provoca que el material se agriete y se desmenuze.

1.3 Principios físicos fundamentales de la separación de partículas de polvo de la corriente de gas

- Separación de las partículas por la fuerza de gravedad (en las cámaras de polvo, conductores de gas).
- Separación de las partículas por la acción de la fuerza centrífuga (en los ciclones ordinarios, y ciclones tipo batería).
- Choque de las partículas bajo la acción de la fuerza de inercia o golpe de inercia, en filtros de tela.
- Precipitación directa de las partículas (en filtros de telas).

- Precipitación de las partículas bajo la acción de la difusión browniana y turbulenta, movimiento térmico de las partículas con gran turbulencia del flujo, en los filtros de tela (difusión browniana), en las lavadoras turbulentas de velocidad (difusión turbulenta).
- Separación electrostática de las partículas (bajo la acción del campo eléctrico) en electrofiltros.

Separación de las partículas bajo el efecto de la termoprecipitación (precipitación de las partículas sobre las superficies más frías que rodean al cuerpo caliente).

1.4 Esquema tecnológico de la planta de preparación de mineral

En la planta preparación de mineral es donde se inicia el proceso productivo de la fábrica, según la tecnología carbonato amoniacal (Manual de Operaciones de la planta, 1986)

El material procedente de la mina es transportado hasta el Taller de recepción de mineral y puede ser suministrado a la planta de preparación de mineral por dos vías:

- a) A través de grúas Gantry.
- b) Directamente por los transportadores de enlace.

Una vez descargado el mineral en galería es remontado y alimentado por las grúas Gantry; estas remontan el mineral y lo homogeneizan en el depósito exterior que posee una capacidad de material húmedo de 360 000 t, capaz de garantizar 28 días de trabajo en la planta.

El material suministrado por las grúas o el transportador es descargado en los transportadores cuyas capacidades son 750 t/h cada uno.

El paso del mineral desde las grúas hacia los transportadores, se realiza a través de un alimentador que se mueve solidario con las grúas y que posee para este trabajo (de alimentación) un transportador y de capacidad 750 t/h.

Los transportadores, alimentan a los transportadores los que se encargan de llevar el material homogeneizado hasta el edificio de los secaderos. La capacidad de estas correas es de 750 t/h y todo su contenido lo vierten sobre los transportadores que tiene cómo función la de alimentar a los transportadores que alimentan a los secaderos y a los transportadores del depósito de mineral interior o de emergencia.

El tambor secador posee una longitud igual a 48 m y un diámetro 4,5 m. El mineral al entrar al secadero lo hará con una humedad aproximadamente de 36 a 38 %, la que puede ser mayor en épocas de lluvia, y saldrá del mismo con 4,0 a 5,5 % según está establecido.

Para lograr esto cada secadero posee una cámara de combustión dotada de un quemador de petróleo. Se suministra aire de combustión, aire de pulverización aire secundario o gases procedente de la planta de hornos.

Los gases combustionados dentro de la cámara alcanzan una temperatura de 1 500 °C y bajan hasta 750 a 850 °C al ponerse en contacto con el aire en exceso que se suministra y que sirve para aumentar el volumen de gases necesarios para secar el mineral.

Con esta última temperatura es con la que entran los gases al tambor secador. La circulación de estos en el tambor secador se realiza en dirección a la corriente del mineral alimentado de forma que, ese contacto gases calientes-mineral permita que este último se vaya secando y se obtenga al final del secadero un producto con las

características adecuadas. Los gases al salir del secadero tendrán una temperatura de 85 a 95 °C.

El material después de secado, es descargado en las correas transportadoras, son denominadas comúnmente correas calientes debido a que son las primeras que hacen contacto con el material caliente que sale de los secaderos. La capacidad es de 490 t/h.

En estas correas se encuentran instaladas las romanas encargadas del pesaje del material seco.

Este material seco es descargado en las correas transportadoras, que son la vía de unión entre los secaderos y los molinos. Esta correa transportadora posee una capacidad de 490 t/h y descarga su contenido en cuatro tolvas, una para cada molino mediante desviadores de mineral colocados sobre la correa y justamente sobre las mencionadas tolvas.

Desde cada tolva el mineral llegará a los molinos en forma dosificada de 120 t/h y tiene como dimensiones 5,7 m de longitud y 3,2 m de diámetro.

Estos molinos son de forma cilíndrica y para su proceso de molienda fina poseen una carga de bolas cuyo peso es de 54 t, cuyas dimensiones son:

100 mm – 10 % 5, 5 t (5 500 kg)

70 mm - 10 % 5, 5 t (5 500 kg)

60 mm - 15 % 8, 0 t (8 000 kg)

40 mm - 25 % 13, 5 t (13 500 kg)

32 mm - 40 % 21,5 t (21 500 kg)

Total 54 t (54 000 kg)

El producto que el molino debe mantener el valor de la humedad de 4,5 a 5,5 % y que entregó secaderos es transportado hacia los silos de mineral del taller de hornos de reducción mediante el empleo de bombas neumáticas colocadas en la descarga de las tolvas.

1.5 Distribución del polvo por la sección del gasoducto. Contenido de polvo en el gas

Cuando el gas con polvo fluye por el gasoducto, sobre las partículas actúa la fuerza de la gravedad; la presión de la corriente de gas y torbellinos si el movimiento es turbulento (debido a dicha acción la distribución de las partículas en el gas se iguala); las fuerzas centrífugas de inercia empujan las partículas hacia la pared del gasoducto, por tanto cuanto más pequeñas son las partículas, menos influyen las fuerzas de inercia y de la gravedad, pero es mayor la acción de los torbellinos. En la mayoría de los casos en los gasoductos verticales las partículas se distribuyen relativamente uniforme por toda la sección del flujo de gas.

En los gasoductos horizontales la fuerza de la gravedad influye considerablemente en la distribución del polvo por la sección del flujo del gas. Si las partículas son mayor de 10 μm , su concentración en la parte inferior de la sección puede ser elevada en comparación con la concentración media, mientras que en la superior, es baja.

La concentración de polvo que se manifiesta de forma diferente en la sección del flujo de gas perpendicular al eje del gasoducto, se llama campo de contenido del polvo.

En la mayoría de los casos cuando los gases se mueven de modo turbulento y contienen partículas menores de 5 μm de tamaño, el campo de contenido del polvo es casi uniforme.

Cuanto mayores son las partículas, tanto más irregular es el campo de contenido del polvo en los gasoductos horizontales y en sus sectores acodados.

Tomando en consideración todo eso, antes de hacer el muestreo de gas para determinar el contenido del polvo hay que elegir un lugar conveniente para el trabajo allá donde se supone la distribución del polvo más uniforme respecto de la sección del gasoducto. Luego se verifica la uniformidad del campo de contenido del polvo en el lugar elegido, determinando el contenido del polvo en distintos puntos de la sección del gasoducto, por ejemplo, en el centro y a la distancia de $0,7 \text{ "r"}$ (radio) del centro en ambos lados. Si los resultados son cercanos, se puede determinar el contenido del polvo en un punto de la sección, es decir, en el centro.

Si las mediciones preliminares muestran que la concentración del polvo es distinta en varios puntos de la sección, entonces hace falta medir el campo de contenido del polvo y definir la diferencia del contenido del polvo en el centro en comparación con el contenido medio, por todo el campo del flujo de gas. Al encontrar el coeficiente del campo de contenido del polvo y al multiplicar por él, se puede determinar el contenido del polvo en un punto (generalmente, en el centro del gasoducto) para el cual fue determinado el coeficiente.

En el valor del coeficiente del campo de contenido del polvo, siendo grandes las partículas, influye la variación de la velocidad del gas.

El contenido del polvo en los gases puede ser expresado mediante diferentes magnitudes y determinado por distintos métodos.

Para la tecnología es muy importante saber la masa de partículas de polvo (g) contenidas en un metro cúbico de gas en condiciones normales. Conociendo este número, es fácil calcular el contenido total del polvo en toda la cantidad del gas dado.

En algunos casos es interesante conocer el número de partículas de polvo en una unidad de volumen de gas, es decir, la concentración numérica de polvo.

En la práctica el procedimiento directo más difundido para definir el contenido de polvo, expresado en masa de polvo por un metro cúbico del gas, consiste en un volumen determinado del gas con polvo se filtra con ayuda de un dispositivo especial, el filtro es pesado antes y después del filtrado, calculando la masa del polvo captado del volumen dado de gas y definen el contenido o concentración de polvo en el gas dividiendo la

masa de polvo encontrada por el volumen de gas. $C_{polvo} = \frac{(W_2 - W_1)}{V_{std}} \text{ g/m}^3_{normal} (1 \text{ atmósfera y } 0^\circ\text{C})$

Empleando este procedimiento hay que garantizar el muestreo correcto y representativo del aerosol, o sea, la separación de tal parte del flujo de gas con polvo en la cual la concentración y la composición dispersa del polvo no se diferencian del flujo fundamental; la captación completa de todo el polvo contenido en la parte del gas tomada y la determinación correcta de su cantidad; la medición exacta del volumen de gas filtrado y su expresión a las condiciones normales (condiciones de referencia 0 °C y una atmósfera).

Para tomar una muestra representativa del gas con polvo hace falta colocar en la corriente de gas el tubo tomamuestras de tal manera que su boca de entrada sea dirigida contra la corriente de gas sin cualquier viraje; la velocidad del gas en la boca de entrada del tubo tomamuestras debe ser igual a la del gas en el punto dado del gasoducto (tomamuestras del gas isocinético). Se necesita que en el lugar de tomamuestras se encuentre en un sector recto del gasoducto y esté distante como

mínimo a cinco veces el diámetro del tubo de cualquier codo, estrangulador, etcétera., tanto de sus entradas, como de las salidas de ellos.

Si estas condiciones no se observan pueden cometerse graves errores. Cuanto más grandes sean las partículas de aerosol y las inobservancias de las exigencias indicadas, mayores serán los errores.

Para captar el polvo que se encuentra en la muestra de gas tomada hay que transportar toda la muestra sin pérdidas hasta el filtro y utilizar un filtro correspondiente (fibras de vidrio).

En algunos casos el filtro se introduce directamente en la corriente de gas colocado en un patrón con un orificio de entrada para el gas (método de filtración interna).

La masa del material de filtro y sus propiedades de filtración no deben variarse bajo la acción de la temperatura del gas en el gasoducto. Para el filtro interno se utilizan como material filtrante tapones de fibra de vidrio y de amianto y para las temperaturas bajas ($< 100\text{ }^{\circ}\text{C}$), de lana y algodón.

Más frecuente se aplica el método de filtración externa. En este caso en el gasoducto se coloca sólo el tubo tomamuestras, y el filtro en un patrón correspondiente se monta fuera del gasoducto en el extremo de dicho tubo. Como filtro se usan papel y tela filtrantes (de lana, sintética, de fibras de vidrio).

En caso de filtración externa conviene tomar las medidas para que el polvo no se precipite en el tubo tomamuestras. Con este motivo el tubo se calienta, al transmitir corriente de 12 V y se hace fluir el gas con una velocidad de 10 a 15 m/s. Además, periódicamente el canal del tubo tomamuestras se limpia y el polvo recogido se tiene en cuenta al calcular el contenido de polvo en el gas.

Al pesar el filtro conviene evitar las pérdidas del polvo y observar que la masa del polvo y del propio filtro no varíen bajo la acción de los factores exteriores, por ejemplo, la humedad del aire; si tal acción tiene lugar, debe ser considerada y los filtros de control deben ser pesados en las mismas condiciones.

El volumen del gas tomado para filtrar se mide por lo común mediante los reómetros–diafragmas de cristal o rotámetros.

Para determinar la cantidad total del polvo en el gas que llega al captador de polvo o de descarga a la atmósfera por la chimenea y en otros casos análogos, hay que multiplicar el valor del contenido de polvo en el gas por su volumen a las condiciones normales (condiciones de referencia 0 °C y una atmósfera).

Al determinar no la cantidad total del polvo, sino la cantidad de cualquier componente contenido en el polvo (C_{polvo}), el total del polvo se debe multiplicar por la concentración de este componente.

Los dispositivos para la determinación directa del contenido de polvo en los gases son aparatos de funcionamiento periódico y requieren para su mantenimiento considerables gastos de trabajo.

Al mismo tiempo, las dificultades de la determinación directa automática de la masa de polvo contenido en la corriente de gas, es decir, su peso en la etapa final de determinación del contenido de polvo, llevaron a la elaboración de toda una serie de métodos indirectos que permiten utilizar instrumentos automáticos.

1.6 Sistema de limpieza de los gases de secaderos

El polvo que es barrido por los gases del interior de cada secadero es introducido en un sistema de colección de polvo formado por dos baterías de cuatro ciclones cada una

de eficiencia 73 % y diámetro 1 800 mm y por un electrofiltro que trabaja con una tensión de 75 000 a 80 000 V y eficiencia 99,6 %.

Esto significa que el 31 % del polvo arrastrado por los ventiladores de tiro de cada secadero, el 73 % se quedará colectado con las tolvas de los ciclones y el 27 % restante llegará a los electrofiltros, previo paso por una zona llamada embudos muertos donde también se colectará cierta cantidad a merced de la caída brusca de presión.

Estos embudos muertos y el electrofiltro poseen tolvas de almacenamiento de mineral, el que es descargado en transportadores de paletas hundidas, de capacidad 20 t/h, cada uno de los que llevará su carga a otros transportadores similares, pero mayores de 50 t/h.

Estos últimos descargarán su contenido en las tolvas de mineral A y B los que alimentarán a las bombas de transporte neumático, que son las encargadas de conducir este polvo hacia las tolvas de producto final A y B de los molinos. La capacidad de estas bombas es 120 t/h cada una.

Los gases una vez limpios de polvo son enviados a la atmósfera debido a la succión y tiro forzado que crea un ventilador colocado al final de cada filtro eléctrico atravesando una chimenea de 120 m de altura. La capacidad del ventilador es 249 000 a 279 000 m³/h. La concentración de polvo que debe salir a la atmósfera debe ser de 200 mg/m³.

1.7 Errores en la medición del contenido de polvo en los gases

Los errores en la medición del contenido de polvo en los gases y en la determinación de la eficacia de funcionamiento de los filtros aparecen debido a diferentes factores como: imperfección de los instrumentos de medición, influencia del medio ambiente e inexactitud de acciones del personal.

Al desviarse la velocidad de muestreo de la real del flujo en un $\pm 15 \%$, como se ha aceptado en la metodología de Guintsvetmet para las partículas hasta de $10 \mu\text{m}$, el error, determinando el contenido de polvo, podrá ser hasta de 5 a 15 %.

Otro gran error es no considerar la humedad de los gases para el cálculo de arrastre de polvo mineral, ya que su omisión introduce un error en la masa de mineral, lo que traería consecuencias en el balance de cualquier industria.

1.8 Trabajos precedentes

En relación con el proceso de obtención de níquel, Cuba ha avanzado considerablemente en las investigaciones realizadas sobre los distintos procesos productivos, este adelanto también involucra a la actividad de las mediciones isocinéticas de material particulado, hoy se cuenta con diversas investigaciones relacionadas con la temática.

Aldana. (2004), se basó en la determinación de la carga y capacidad de la instalación de secado de mineral de la planta de secaderos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, se realizó la determinación del arrastre de polvo mineral en los secaderos que fue de 40 %, en este trabajo evidentemente no se tuvo en cuenta la humedad de los gases a la salida de la cámara de evacuación.

Echeverri. (2006), trató sobre determinación, concentración y emisión de partículas de polvo y gases a la atmósfera por chimeneas en una empresa de producción de ladrillos en Colombia durante esta investigación se tuvo en cuenta la humedad de los gases.

Torres. (1999), estudió el arrastre de partículas en los gases durante el secado de mineral laterítico en los secaderos, en el mismo no se tuvo presente el valor de la humedad de los gases de salida de los secaderos.

Torres. (2000), se basó en una modificación en los levantadores de los secaderos con el objetivo de aumentar el arrastre de las partículas más finas, pero se mantuvo el error que se introducía por la humedad en los gases de salida.

En la planta de preparación de mineral de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara se realizan determinaciones de arrastre de materiales particulados, según la metodología “determinación de material particulado de fuentes estacionarias de emisión,” desde la puesta en marcha de la industria a finales de la década de los años 80, esta tecnología fue transmitida al grupo de mediciones de gases y polvos de la empresa. Por esa década se comenzó a medir en los sistemas de captación de polvo una serie de parámetros como caudal, concentraciones de polvo y arrastre de polvo mineral en los sistemas de captación, así surgen las mediciones que dan lugar a los trabajos de caracterización de los equipos de limpieza de gases en la empresa, pero como dificultad en las determinaciones, se encuentra que no se medía el volumen de agua en los gases ni se realizaba el ajuste de humedad en los cálculos de arrastre.

Las mediciones de cálculo de arrastre de polvo mineral, en la sección de secaderos, se realizaron en los gases calientes con contenido de polvo procedente del secado en los tambores rotatorios, los resultados del arrastre de polvo mineral se hacían sin tener en cuenta la humedad de los gases, no siendo así para el cálculo de la determinación de la concentración de polvo que se hace en base seca.

Días. (2011) determinó que la metodología de cálculo de arrastre de polvo mineral utilizada con anterioridad provoca un error, por lo que fue necesario buscar una vía que permita resolver el problema y esto fue adquisición de nuevos equipos de mediciones isocinéticas.

En la actualidad se utiliza un tren isocinético de alta tecnología que por medio de este equipamiento se mide la humedad, caudal y concentración de polvo en las corrientes de los gases, con alta precisión.

1.9 Conclusiones del capítulo 1

- La inmensa mayoría de las investigaciones consultadas no tienen en cuenta la humedad de los gases en el arrastre de polvo mineral en los secaderos.

CAPÍTULO 2. MATERIALES Y MÉTODOS

2.1 Introducción

El desarrollo y el éxito de toda investigación esta basada en la fiabilidad de los resultados, herramienta fundamental para su validación. La adecuada selección de los materiales y métodos merece una especial atención.

De ahí que el objetivo de este capítulo sea:

Objetivo del capítulo:

Caracterizar los principales materiales y métodos utilizados en la realización del trabajo.

2.2 Materiales y métodos empleados para la determinación de material particulado (Masa de polvo en los gases, M_{polvo}).

En el período analizado (diciembre/2011-marzo/2012) fueron tomadas un total de 80 muestras. Para ello se empleó un muestreador isocinético marca TCR TECORA, modelo isostack Basic, número de serie 508288A y certificado de calibración P-508288A. Suministrado por RAVEBO SUPPLY B.V. (ver anexo 1). En este equipo se usó como medio filtrante dedales de fibra de vidrio con dimensiones de 30 x 100 mm de la marca Schleicher and Schuel. Lote EJ0505-1.

Para la determinación de material particulado fue aplicado el método “determinación de material particulado de fuentes estacionarias de emisiones”.

Este método está basado en la captación cuantitativa de material particulado (PM) en el interior del ducto, el cual es colectado en un filtro de fibras de vidrio, mantenido a la temperatura de los gases. La masa de polvo (MP) se determina gravimétricamente luego de eliminada el agua no combinada.

Las fórmulas utilizadas por el equipo, para determinar los diferentes parámetros son las siguientes:

Cálculo de la velocidad del gas

$$V(m/s) = K_{pt} * \sqrt{\frac{2 * P_n}{T_n}} * \sqrt{\frac{T_a}{P_a} * \frac{1}{r_w * 0,804 + [\rho_n (1 - r_w)]}} * \sqrt{\Delta P^{pt}} \quad (1)$$

Donde:

K_{pt} : Coeficiente del tubo de Pitot (1 ÷ 4).

P_n : Presión media al nivel del mar (101,3 kPa).

T_n : Temperatura absoluta (273 K).

T_a : Temperatura en el punto de medición (K).

P_a : Presión absoluta en el punto de medición (kPa).

r_w : Fracción volumétrica del vapor de agua.

ρ_n : Densidad del gas en condiciones estándar seco (kg/m³).

ΔP^{pt} : Diferencia de presión del tubo de Pitot (Pa).

Cálculo del caudal

$$Q'Va = \overline{v'a} * A * 3600 = m^3 / h \quad (2)$$

$$Q'Vn = Q'Va * \frac{Tn}{Pn} * \frac{Pa}{Ta} = m^3 / h$$

$$QVn = Q'Vn * (1 - rw) = m^3 / h$$

Donde:

$Q'Va$: Flujo de gas seco en condiciones actuales. (m^3/s).

$\overline{v'a}$: Velocidad del gas (m/s).

A : Área de la sección del ducto (m^2).

$Q'Vn$: Flujo de gas húmedo en condiciones normales (m^3/h).

Tn : Temperatura absoluta (273 K).

Pn : Presión media al nivel del mar (kPa).

Pa : Presión absoluta en el punto de medición (kPa).

Ta : Temperatura en el punto de medición (K).

QVn : Flujo de gas seco en condiciones normales (m^3/h).

rw : Fracción volumétrica de vapor de agua.

Cálculo del volumen muestreado

$$Vg = \text{encoder} - \text{impulso} * \text{volumen} - \text{resolución} * \overline{Cgi} * 10^{-3} = m^3$$

$$Vgn = Vg * \frac{Tn}{Pn} * \frac{Pam}{Tg} = m^3$$

$$Vdn = \frac{qVdn}{60} * Etd * 10^{-3} = m^3$$

$$V'ga = (Vgn + Vgdn) * \frac{1}{1 - rw} * \frac{Pn}{Tn} * \frac{\overline{Ta}}{Pa} = m^3 \quad (3)$$

Donde:

Vg : Volumen total de gas (m^3).

Cgi : Constante de calibración del gas ($1 \div 4$).

Vgn : Volumen de gas muestreado en condiciones normales (m^3).

Tn : Temperatura absoluta (273 K).

Pn : Presión media al nivel del mar (kPa).

P_{am} : Presión ambiental (kPa).

T_g : Temperatura absoluta del gas (K).

V_{dn} : Volumen de gas seco muestreado en condiciones normales (m^3).

qV_{dn} : Flujo de gas seco muestreado en condiciones normales (m^3).

E_{td} : Total muestreado en un lapso de tiempo (h, min o seg).

V'_{ga} : Volumen de gas húmedo medido (m^3).

V_{gdn} : Volumen total de gas seco muestreado en condiciones normales (m^3).

r_w : Fracción volumétrica del vapor de agua.

T_a : Temperatura en el punto de medición (K).

P_a : Presión absoluta en el punto de medición (kPa).

Evaluación de las condiciones isocinéticas

$$\begin{aligned}\overline{q'Va} &= \frac{V'_{ga}}{ETt} * 60 * 10^{-3} = L / \text{min} \\ \overline{v'N} &= Kd * \overline{q'Va} * \frac{1}{dN1^2} = m / \text{seg}\end{aligned}\tag{4}$$

Donde:

$q'Va$: Flujo de gas muestreado en condiciones normales (L/min).

V'_{ga} : Volumen de gas húmedo medido (m^3).

ETt : Lapso de tiempo total (h, min o s).

$v'N$: Velocidad del gas de la boquilla (m/s).

$dN1$: Diámetro interior de la boquilla (mm).

Relación isocinética.

$$v'N / v'a = \frac{\overline{v'N}}{\overline{v'a}} \quad (5)$$

$$DI = \frac{\overline{v'N} - \overline{v'a}}{\overline{v'a}} * 100 = \%$$

Donde:

$v'N$: Velocidad del gas de la boquilla (m/s).

$v'a$: Velocidad estática del gas (m/s).

Para el análisis de los datos obtenidos se utilizó el software ISOBASIC versión 1.3 suministrado por TCR TECORA con el mismo equipo empleado para hacer la medición.

Concentración de polvo en los gases

Para el cálculo de la concentración de polvo en los gases de salida de los secaderos se usó la siguiente ecuación:

$$C_{polvo} = \frac{(W2 - W1)}{Vstd} \quad (6)$$

Donde:

C_{polvo} = Concentración de polvo (g/m³normal)

$Vstd$ = Volumen de gas seco muestreado (273 K, 101,3 kPa), m³normal

$W1$ = Peso inicial del medio filtrante (g)

$W2$ = Peso final del medio filtrante (g)

Masa de polvo en los gases

La masa de polvo arrastrada por los gases se determinó de la siguiente forma:

$$M_{polvo} = \frac{C_{polvo} * QVn}{10^3} \quad (7)$$

Donde:

M_{polvo} = Masa de polvo (kg/h)

C_{polvo} = Concentración de polvo en g/m³normal

QVn : Flujo de gas seco en condiciones normales (m³/h).

Fórmula para medir la masa de polvo sin tener en cuenta el volumen de humedad en los gases

$$M_{polvo} = \frac{C_{polvo} * Qn}{10^3}$$

Donde:

Qn = Flujo de gases húmedos en condiciones normales.

Para este caso la masa de polvo se calcula con el flujo de gases que conserva el volumen de agua.

2.3 Determinación del contenido de humedad en los gases

Para la determinación del contenido de humedad en los gases fue aplicado el método “determinación del contenido de humedad en los gases de la chimenea”.

Este es un método de referencia y consiste en tomar una muestra de los gases que circulan por el ducto, succionándolos con una bomba que los hace pasar a través de un filtro para retener las partículas y por unos burbujeadores, que se encuentran en un baño de hielo, para condensar la humedad. De acuerdo con el volumen de gases muestreado y la masa de agua recolectada se determina el porcentaje de humedad de los gases.

El volumen de vapor de agua, corregido a condiciones de referencia, colectado en los burbujeadores es:

$$V_{wref} = (P_f - P_i) = \frac{RT_{ref}}{P_{ref} M_w} \quad (8)$$

Donde:

V_{wref} = Volumen de vapor de agua corregido a condiciones de referencia, m^3 .

P_f = Peso final de agua en todos los burbujeadores, g.

P_i = Peso inicial de agua en todos los burbujeadores, g.

R = Constante de los gases ideales, 0,06236 mm Hg m^3/mol K.

T_{ref} = Temperatura de referencia, 298 K.

P_{ref} = Presión de referencia, 760 mm Hg (Mercurio).

M_w = Masa molar del agua, 18,0 g/mol.

El volumen de gas seco medido por el medidor gas, corregido a condiciones de referencia es:

$$V_{mref} = V_m Y \frac{P_m T_{ref}}{P_{ref} T_m} \quad (9)$$

Donde:

V_{mref} = Volumen de gas seco corregido a condiciones de referencia, m^3 .

V_m = Volumen de gas seco medido por el medidor de gas seco, m^3 .

Y = Factor de calibración del medidor de gas seco.

P_m = Presión absoluta en el medidor de gas seco, mm Hg.

T_{ref} = Temperatura de referencia, 298 K.

P_{ref} = Presión de referencia, 760 mm Hg.

T_m = Temperatura promedio en el medidor de gas seco, K.

El contenido de humedad de los gases en la chimenea esta dado por la siguiente ecuación:

$$B_{ws} = \frac{V_{wref}}{V_{wref} + V_{mref}} \quad (10)$$

Donde:

B_{ws} = Fracción volumétrica de vapor de agua en la corriente gaseosa.

V_{wref} = Volumen de vapor de agua corregido a condiciones de referencia, m³.

V_{mref} = Volumen de gas seco corregido a condiciones de referencia, m³.

La determinación de la humedad en los gases se realizó simultáneamente con la medición isocinética de la masa de sólidos.

Conocer el contenido de humedad de la corriente gaseosa es importante para la realización del muestreo isocinético, ya que el porcentaje de isocinetismo depende tanto del porcentaje de humedad de los gases en la chimenea como del tamaño de la boquilla seleccionada para la toma de la muestra, que a su vez depende también del contenido de humedad.

Determinación de la masa de mineral descargado al transportador 11 (M_{min})

La determinación de la masa de mineral descargada por el secadero al transportador 11 se tomó de la lectura del integrador de la romana continua ACCUMASS SF500, instalada en este transportador. Este equipo tiene una exactitud de 0,1 % y una resolución del 0,2 % ambos de la máxima capacidad.

En el momento de realizar las mediciones isocinéticas a la salida de cada secadero, al equipo en cuestión se le aisló la descarga de mineral del resto, quedando solo por el transportador 11. Las mediciones se realizaron solo después de calibradas las romanas tanto en régimen continuo como estático, operación que se realiza con una frecuencia semanal, para garantizar la confiabilidad en los datos tomados.

Cálculo del arrastre de polvo mineral en los gases de secado

$$A = \frac{M_{polvo} * 10^2}{M_{min} + (M_{polvo})} \quad (11)$$

Donde:

M_{min} = masa de mineral descargada por el secador al transportador 11 (t/h)

M_{polvo} = Masa de polvo arrastrada por los gases de salida (t/h)

Análisis de los datos obtenidos

Para el análisis de los datos obtenidos se elaboró una base de datos en una hoja de cálculo de Microsoft Excel y se usaron las herramientas de esta aplicación concernientes a la aplicación de la estadística descriptiva.

Las pruebas de "Test de Student" para muestras apareadas se realizaron en el software Statgraphics Plus 5.1 Professional.

Diagrama de corrientes de flujos

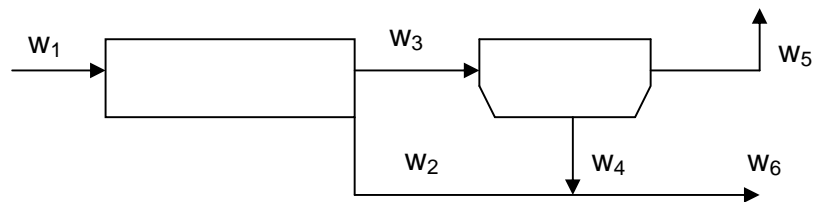


Figura 1 Flujo de corrientes de gases y polvos

$$\eta = \frac{W_5}{W_2} + 1 - \frac{W_5}{\Delta W_2} = \frac{W_3 - W_5}{W_3}$$

$$W_1 = W_5 + W_6 \quad W_3 = W_5 + W_4 \quad W_6 = W_2 + W_4$$

W_1 = Alimentación a los secaderos.

W_2 = Mineral seco descargado al transportador.

W_3 = Arrastre de polvo mineral al electrofiltro.

W_4 = Reciclo de polvo.

W_5 = Pérdidas del sistema.

W_6 = Mineral procesado.

2.4 Conclusiones de capítulo 2

- Se definieron los materiales y métodos necesarios para la determinación de la masa de polvo arrastrada por los gases de secado y la humedad de los mismos.

CAPÍTULO 3. ANÁLISIS Y DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

3.1 Introducción

Todo trabajo investigativo conlleva a la obtención de resultados, que son analizados e interpretados según la naturaleza de la investigación y el alcance de la misma, por tanto, el objetivo de este capítulo es:

Objetivo del capítulo:

Determinar la masa de sólido arrastrado por los gases de secado en la sección de secaderos de la planta preparación de mineral de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, utilizando para ello el muestreo isocinético con ajuste de humedad.

3.2 Evaluación de la metodología para el cálculo del arrastre de polvo mineral en los gases de salida de los secaderos

En la tabla 1 se muestra la diferencia existente entre el mineral reportado como procesado por secaderos y el alimentado a hornos de reducción.

Tabla 1. Diferencia entre el mineral procesado por hornos de reducción y preparación de mineral

| | Mineral Seco Procesado por Secaderos (t) | Mineral Seco Neto Alimentado a Hornos (t) | Diferencia (t) |
|-----------------------|---|--|-----------------------|
| enero/2011 | 274 844,258 | 255 168,879 | 19 675,378 |
| febrero/2011 | 256 708,612 | 232 677,479 | 24 031,132 |
| marzo/2011 | 262 424,799 | 254 113,950 | 83 10,849 |
| abril/2011 | 259 673,578 | 243 431,265 | 16 242,312 |
| mayo/2011 | 260 135,594 | 255 666,688 | 4 468,906 |
| junio/2011 | 268 622,798 | 258 110,653 | 10 512,145 |
| julio/2011 | 257 095,267 | 232 304,275 | 24 790,992 |
| agosto/2011 | 286 611,151 | 257 024,968 | 29 586,184 |
| septiembre/2011 | 276 721,522 | 253 106,820 | 23 614,702 |
| octubre/2011 | 291 832,782 | 260 505,521 | 31 327,262 |
| noviembre/2011 | 281 568,871 | 253 241,388 | 28 327,482 |
| diciembre/2011 | 296 279,856 | 254 148,065 | 42 131,790 |
| Total año 2011 | 3 272 519,087 | 3 009 499,951 | 263 019,135 |

Esta diferencia se entiende como una pérdida, en este caso indeterminada, debido a que la misma no se evidencia en los controles de pérdidas aplicados a ambas plantas.

Esta pérdida en el año 2011 promedió el 8,04 % del total procesado por secaderos.

Las variables que influyen en la diferencia encontrada entre hornos y preparación de mineral son numerosas y las más importantes son:

- Errores en los equipos de medición de masa (Romanas del transportadores 11; 11a, y las romanas de hornos).
- Errores en la medición de los inventarios en tolvas y silos.
- Diferencias en los regímenes de productividad de secaderos y hornos.
- Errores en la estimación del valor del arrastre de los secaderos.
- Debido a las complejidades en la determinación del arrastre en los secaderos, se revisó a profundidad la metodología establecida en la industria comprobándose lo siguiente:
- La toma de muestra, su procesamiento y los cálculos para determinar la masa de sólido arrastrada por los gases se realiza según la norma de empresa NEIB

66-01-01, la que presenta insuficiencia en la información sobre aspectos tan importantes como cantidad de mediciones que se deben realizar en la sección del ducto, en el caso de la presión dinámica, estipula que se tomen varias y para la toma de las muestras de polvo indica que se tome una muestra sin especificar al menos en que lugar a lo largo del diámetro.

- No tiene en cuenta parámetros tan importantes como son las condiciones técnicas de los equipos, régimen de operación de estos, características del material procesado entre otros elementos necesarios para lograr correlaciones acertadas entre las actividades involucradas en el balance de materiales.
- Durante las mediciones no se realizan determinaciones de la humedad real de los gases lo que provoca una contradicción entre el valor de la concentración de polvo medido y el valor de la masa de polvo calculado a partir de estos, debido a que la concentración se expresa sobre una base seca y la masa se ha estado calculando tomando el volumen total de gases incluida la humedad.

Teniendo todo esto en cuenta, se dedujo, dado que a la humedad de los gases de salida de los secaderos se le previó un valor alto (36,8 %), que la no inclusión de este elemento en la metodología de cálculo del arrastre de polvo mineral introducía un error considerable en el balance de materiales de la planta, sin embargo su determinación resulta indispensable si se quiere un nivel de exactitud mayor en el balance metalúrgico de la Empresa.

3.3 Determinación de la humedad de los gases a la salida de los secaderos

En la literatura consultada no se encontraron referencias sobre los valores usuales de humedad en los gases de secado ni fue posible hallar datos sobre esta variable en

mediciones previas realizadas por (Aldana (2004), García (2000), Torres (1999)) en los gases de salida de los secaderos de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Para las mediciones del contenido de humedad en los gases se procedió según el método y los materiales expuestos en el Capítulo 2. En la tabla 2 se muestran los valores de humedad para cada secadero muestreado.

Tabla 2. Valores de humedad para cada secadero muestreado

| | U/M | SC-101 | SC-102 | SC-103 | SC-104 | SC-106 | Promedio |
|-----------------------------|------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|-----------------|
| No. de muestras | U | 21 | 14 | 15 | 9 | 21 | 80 |
| Humedad de los gases | % v/v | 30,9 | 31,4 | 33,23 | 32,0 | 31,6 | 31,74 |
| Desv. estándar | % v/v | 2,48 | 2,98 | 2,69 | 2,99 | 2,72 | 2,77 |

Nomenclaturas **SC-101** (secadero 101), **SC-102** (secadero 102).... **SC-106** (secadero 106).

En el período analizado (diciembre/2011-marzo/2012) la humedad en los gases promedió 31,74 % en volumen con valores máximos y mínimos de 36,20 y 26,0 % respectivamente (ver anexo 2).

El valor promedio de humedad, en los gases medidos, resultó menor en un 13,5 % que el valor de diseño para estos sistemas que aparece descrito en la documentación técnica (36,8 %). Este resultado se debe a los altos niveles de infiltración que existen actualmente en los secaderos que provocan la dilución de los gases de salida.

Hay que significar que por primera vez se realizan análisis de humedad a la salida de los secaderos por lo que el valor de humedad en los gases no ha sido posible compararlo con el de diseño.

3.4 Determinación de la carga y el arrastre de polvo mineral en los gases a la salida de los secaderos en base seca y comparación con estimaciones en base húmeda

Para las mediciones de la masa de polvo contenida en los gases se procedió según el método y los materiales expuestos en el Capítulo 2. En la tabla 3 se muestra la masa y el arrastre de polvo mineral estimados a partir del muestreo isocinético de los gases de salida de cada secadero en operación.

Tabla 3. Valores de masa y arrastre de polvo mineral para cada secadero muestreado teniendo en cuenta la humedad

| | U/M | SC-101 | SC-102 | SC-103 | SC-104 | SC-106 | Promedio |
|-----------------------------------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|---------------|
| No. de muestras | u | 21 | 14 | 15 | 9 | 21 | 80 |
| Humedad de los gases | % v/v | 30,87 | 31,44 | 33,23 | 32,03 | 31,62 | 31,74 |
| Masa de polvo | t/h | 29,101 | 30,763 | 31,973 | 35,287 | 33,419 | 31,760 |
| Productividad por correa caliente | t/h | 69,543 | 66,517 | 62,422 | 81,053 | 67,640 | 68,474 |
| Productividad total | t/h | 98,644 | 97,280 | 94,394 | 116,340 | 101,059 | 100,23 |
| Arrastre | % | 29,501 | 31,623 | 33,871 | 30,331 | 33,069 | 31,69 |

En el período analizado (diciembre/2011-marzo/2012) la masa de polvo en los gases promedió 31,760 t/h con valores máximos y mínimos de 47,711 y 22,457 t/h respectivamente.

Comparado con los datos de proyecto, la masa de polvo medida en los gases a la salida de los secaderos promedió un 22,9 % superior, lo que se atribuye a las modificaciones de los levantadores realizadas con el objetivo de elevar la productividad de los secaderos incrementando el arrastre de material fino hacia el sistema de limpieza de gases (Aldana y col. 2004). Esto se hace evidente si se analizan los valores promedios de concentración de polvo medido en este estudio (256,812 g/m³normal) y de proyecto (170,0 g/m³N), que constituyen la medida directa del incremento del arrastre de polvo mineral.

El valor del arrastre de polvo mineral, teniendo en cuenta la masa de mineral descargada al TR-11, fue de 31,69 %, lo que resulta en una productividad promedio por secadero de 100,23 t/h. El incremento del arrastre, demostrado a través de las mediciones, está en relación directa con el incremento de productividad logrado en los secaderos en los últimos cinco años (Aldana y col. 2004).

Debe señalarse, sin embargo, que la determinación de la masa de polvo en los gases de salida de los secaderos, y por tanto el estimado del arrastre, había estado sobrevalorado antes del presente estudio, lo que trajo como consecuencia distorsiones en el balance metalúrgico de la planta de secaderos al estimársele una productividad muy por encima de la real y que comúnmente derivaban en pérdidas indeterminadas para el balance general de la industria.

El efecto de la humedad en el cálculo de la masa de polvo en los gases de salida de los secaderos puede ilustrarse si se presentan los datos del estudio actual sin tener en cuenta los análisis de humedad (tabla 4).

Tabla 4. Valores de masa y arrastre de polvo mineral para cada secadero muestreado estimados sin tener en cuenta la humedad en los gases

| | U/M | SC-101 | SC-102 | SC-103 | SC-104 | SC-106 | Promedio |
|-----------------------------------|-----|---------|---------|---------|---------|---------|---------------|
| Masa de Polvo | t/h | 42,097 | 44,867 | 47,888 | 51,893 | 48,875 | 46,549 |
| Productividad por correa caliente | t/h | 69,543 | 66,517 | 62,422 | 81,053 | 67,640 | 68,474 |
| Productividad total | t/h | 111,640 | 111,384 | 110,310 | 132,946 | 116,515 | 115,02 |
| Arrastre | % | 37,708 | 40,281 | 43,412 | 39,033 | 41,948 | 40,47 |

Tanto la masa de polvo como el arrastre del mismo, se incrementan significativamente en un 31,77 y 21,70 % respectivamente, comparados con los obtenidos en base seca ($p = 0,0017$ para $\alpha = 0,05$ en un Test de Student para muestras apareadas).

El error que tradicionalmente se cometía en los análisis de arrastre de los secaderos tiene magnitudes importantes y usualmente se traducía en el registro de productividades superiores a las reales (hasta un 13 % mayores). Lo correcto es incorporar los análisis de humedad al cálculo de arrastre de polvo mineral y realizar las estimaciones en base seca según se establecen en las regulaciones internacionales para el muestreo isocinético de polvo en corrientes de gases.

Una comparación de los resultados obtenidos en el presente estudio con mediciones anteriores muestra diferencias significativas en la masa de polvo en los gases de salida de los secaderos y el arrastre estimado.

En la tabla 5 se exponen los resultados de mediciones realizadas durante el año 2010 para determinar el arrastre de polvo mineral en los gases de salida de los secaderos.

Tabla 5. Valores promedios de masa y arrastre de polvo mineral en secadero muestreado en el año 2010 sin ajuste de humedad

| | U/M | EF101 | EF102 | EF104 | EF106 | Promedio |
|-----------------------------------|----------|---------------|---------------|---------------|---------------|--------------|
| Masa de polvo | t/h | 38,240 | 40,420 | 39,950 | 35,290 | 39,09 |
| Productividad por correa caliente | t/h | 60,950 | 46,900 | 60,400 | 60,050 | 59,15 |
| Productividad total | t/h | 99,190 | 87,320 | 100,350 | 95,340 | 98,24 |
| Arrastre | % | 38,030 | 45,920 | 39,620 | 36,830 | 39,79 |

A pesar de obtenerse concentraciones de polvo significativamente menores, la masa total de este en los gases y el arrastre eran mayores que los valores actuales en un 18,75 %. Este resultado está influido por varios factores entre los que pueden señalarse el volumen de gases generados y en mayor medida la humedad de los gases, la cual erróneamente se incluía en el volumen total de gases para estimar la masa de polvo arrastrada por los mismos.

Con el objetivo de comprobar el efecto de la humedad en la determinación de la masa de sólidos arrastrada por los gases en otros puntos de la industria donde se registran

valores de humedad diferentes, en la tabla 6 se presentan los resultados del muestreo isocinético a la entrada de los filtros de mangas de la sección de sínter.

Tabla 6. Valores de masa de polvo en gases de entrada de los filtros de mangas de la sección de sínter

| Fecha | | 7-May-12 | 8-May-12 | 10-May-12 | 11-May-12 | Promedio |
|---------------------------|-----|----------|----------|-----------|-----------|--------------|
| No. de muestras | u | 4 | 2 | 3 | 3 | 12 |
| Humedad en los gases | % | 2,920 | 1,924 | 2,205 | 2,647 | 2,424 |
| Masa de polvo base seca | t/h | 0,164 | 0,173 | 0,535 | 0,434 | 0,326 |
| Masa de polvo base húmeda | t/h | 0,169 | 0,176 | 0,547 | 0,446 | 0,335 |

Al estimarse la masa de polvo en los gases de sínter sin tener en cuenta la humedad, el valor obtenido es tan solo un 2,41 % superior (0,009 t/h) al valor obtenido en base seca, de lo que se determinó que en puntos donde la humedad es baja el error de estimar la masa de polvo en base húmeda es también bajo en la misma proporción.

La masa de polvo en los gases, estimada a partir del muestreo isocinético, varía proporcionalmente con la humedad y por tanto, el error cometido al calcularla sobre una base húmeda será mayor mientras mayor sea la humedad en los gases. En este sentido, debe señalarse que el método establecido en la industria para el cálculo del arrastre y el reciclo de los secaderos debe ser modificada, incorporándose los análisis de humedad que permitan lograr resultados más exactos para ser utilizados en el balance metalúrgico de la planta.

3.5 Impacto económico

El impacto económico es muy difícil de determinar por la complejidad del proceso. Con los resultados de esta investigación se ajusta el valor de arrastre de polvo mineral en la planta de secaderos con lo cual disminuye el error introducido para el cálculo de

productividad, mejorando el balance de la planta y su contribución a la imagen de la empresa.

3.6 Principales impactos al medio ambiente de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara

Los principales elementos del medio ambiente que son agredidos por las operaciones de la industria son:

- Calidad del aire
- Calidad de las aguas superficiales y subterráneas
- Biodiversidad
- Suelos
- Paisaje

Los impactos generados por la sección de secaderos sobre estos elementos son:

- Emisión de polvo a la atmósfera y gases conteniendo CO, SO₂ y CO₂ por baja eficiencia y capacidad de los sistemas de captación de polvo (EMISIONES DIRIGIDAS). La Planta de Secaderos emite estos gases a través de chimenea de 140 m de altura y 6,0 m de diámetro que posee la instalación. El contaminante principal es el polvo, del cual se expulsan a la atmósfera de 40,55 a 74,4 g/s.
- Generación de polvo fugitivo y emisión de gases conteniendo CO y SO₂ en las áreas de trabajo por mala hermeticidad del equipamiento instalado (EMISIONES DIFUSAS).
- Descarga al sistema de canalización de efluentes líquidos, conteniendo grasas, petróleo y sólidos en suspensión que resultan del lavado de las instalaciones, averías, salideros.

- Generación de desechos sólidos peligrosos que contaminan los suelos (refractarios, lana mineral, aceites)

El método para la determinación de polvo a la salida del electrofiltro, incluyen el mismo error al no tener en cuenta el ajuste de humedad. La revisión del método en el punto de muestreo de los equipos de limpieza de gases a la salida del secadero, trae consigo la disminución de la masa de polvo que se emite con respecto a la que se determina actualmente, esto permitirá obtener un valor de emisión de polvo más acercado a la realidad, que permitirá evaluar el impacto de esta fuente sobre la calidad del aire.

3.7 Conclusiones del capítulo 3

- Se evaluó el método de cálculo del arrastre de polvo mineral en los secaderos de la planta de preparación de mineral.
- Se determinó la masa de polvo arrastrado por los gases de secado en la sección de secaderos de la planta preparación de mineral de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, utilizando para ello el muestreo isocinético con ajuste de humedad.

CONCLUSIONES

El método de cálculo de arrastre de polvo mineral fue evaluado encontrándose que el mismo introduce errores significativos en el balance de la planta que se traducen en un incremento de las diferencias de material procesado por preparación de mineral y hornos de reducción, entendidas como pérdidas indeterminadas. Los errores introducidos por la metodología tradicional de cálculo del arrastre de polvo mineral en los secaderos de la planta de preparación de mineral de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara son debidos a que las estimaciones de la masa de polvo se realizan en base húmeda, sobrestimándose su valor.

- Se determinó la humedad de los gases a la salida de los secaderos de la planta de preparación de mineral de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara, la que resultó un 13,5 % inferior a la estimada en el proyecto (36,8 %). La masa promedio de polvo en base seca fue de 31,76 t/h lo que representa un arrastre del 31,69 %, inferior a los reportados (Aldana, 2004), según las correcciones que se realizaron en este trabajo al método utilizado tradicionalmente.
- El arrastre de polvo mineral estimado sobre una base húmeda se incrementa en un 21,70 % con respecto a una base seca debido a que la masa de polvo en los gases, demostrado a partir del muestreo isocinético, varía proporcionalmente con la humedad y por tanto, el error cometido al calcularla sobre una base húmeda será mayor mientras mayor sea la humedad en los gases.
- Se evaluó la metodología de cálculo y se comprobó, que aplicando el ajuste de humedad las pérdidas indeterminadas, disminuyen al reducirse la masa de

polvo arrastrada en un 31,77 %, lo que representa una productividad 13 % menor a la reportada.

RECOMENDACIONES

- Aplicar el método establecido en la industria para el cálculo del arrastre de polvo mineral de los secaderos, incorporándosele los análisis de humedad que permitan lograr resultados más exactos para ser utilizados en el balance metalúrgico de la planta.
- Realizar las mediciones de humedad en otros puntos de medición complejos como es el caso de hornos de reducción y calcinación.
- Realizar el análisis sobre el efecto de las demás fuentes de error (calibración de romana de hornos y secaderos, errores de medición de los inventarios de silos y tolvas, punto de adición de petróleo aditivo) en la diferencia de mineral procesado entre hornos y secaderos.

BIBLIOGRAFÍA

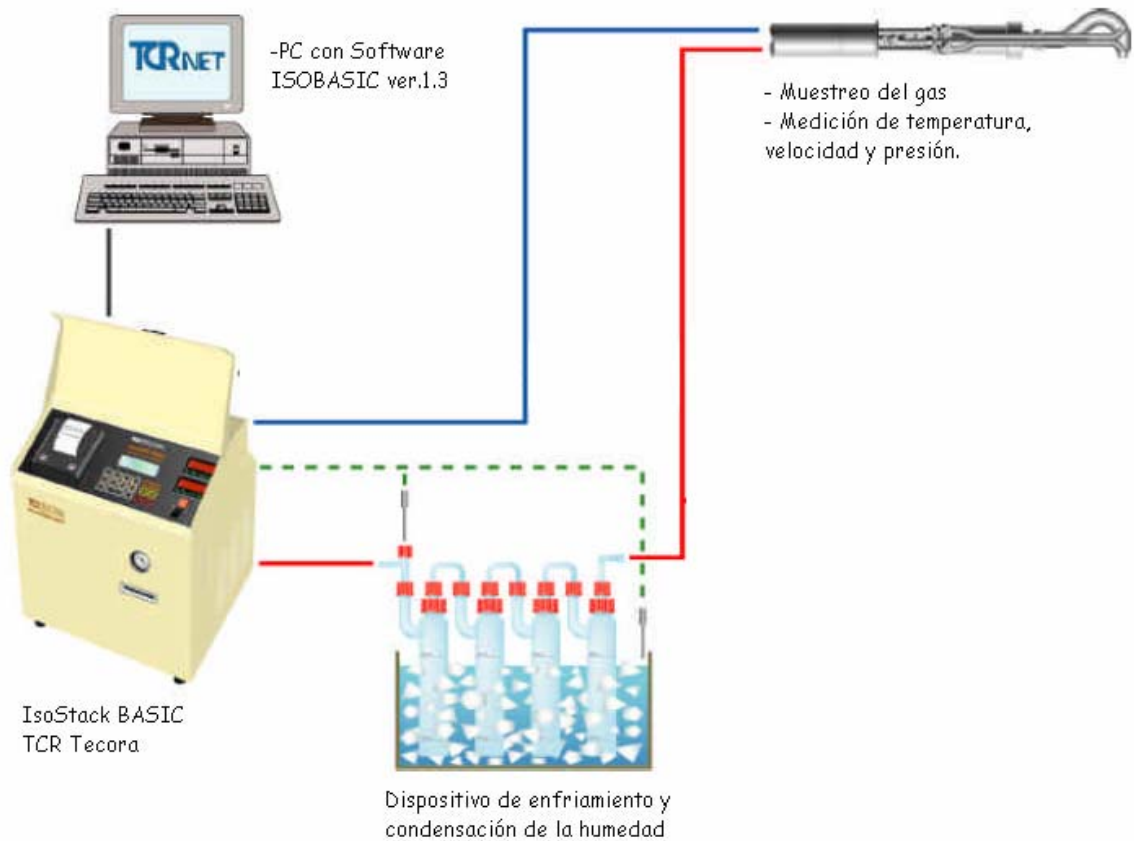
1. Aldana, E. y col. 2004, Determinación de la carga y capacidad actuales de la instalación de secado de mineral de la ECECG. TECNOLOGÍA QUÍMICA Vol. XXIV, No. 2 (2004).
2. Bértiz, L. Secador Solar de Madera, Centro de Investigaciones de Energía Solar. Cuba, 2002.
3. Bértiz, L. Secador Solar de Madera, Centro de Investigaciones de Energía Solar. Cuba, 2003.
4. Berruta, L. Participación Campesina en el Diseño y Construcción de un Secador Solar para Café. Agrociencia. Vol. 37:95-106. 2004.
5. Boizan, M. Macrocinética del secado de Bagazo. Santiago de Cuba: Ediciones ISJAM, 1991.145p.
6. Cabrera. L.; A. Cardoso. Influencia de los parámetros de secado sobre la calidad de dos variedades de cebolla deshidratada. Vol. 6. No.2. 1985./pág 56-64.
7. Castillo. A. Influencia del contenido de humedad en el consumo de combustible de los secaderos cilíndricos rotatorios de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma. ISMM, 2007 (en construcción).
8. Chiapero, M. Factibilidad del secado solar de granos en silos de bases cónicas. Avances en energías renovables y medio ambiente. Argentina. Vol 6. (2). 2001.

9. Colectivo de autores. Atlas de Cuba. Instituto cubano de Geodesia y Cartografía. La Habana, 1978.
10. Columbié, E. Caracterización de los parámetros fundamentales del proceso de secado del mineral en los tambores rotatorios. Trabajo de Diploma. ISMM. Moa, 2005. 53p.
11. Curioni, A. Secado de especies aromáticas en la provincia de Buenos Aires. Factibilidad del recurso solar. Ingeniería Rural y Mecanización Agraria en el ámbito Latinoamericano. Editorial Board, /pág 378-400. 2000.
12. Durán, R. Estudio de las propiedades físico mecánicas del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. ISMM, Moa, 2006. 62p.
13. Echazú, P. Secado solar de carnes de llamas. Avances en energías renovables y medio ambiente. Argentina. Vol. 5. 2001.
14. Echeverri, C. Determinación de material particulado de material particulado y humedad de los gases de fuentes estacionarias de emisiones (2006).
15. Estenoz, S; E. Rondón. Descripción, caracterización y valoración de los flujos y procesos, Informe final Etapa 03 del proyecto de I+D: "Incremento y regulación de la eficiencia económica del complejo minero-metalúrgico", Centro de Investigaciones del Níquel, Moa. 1997. p.22-28.
16. Estenoz, S.; N. Pérez. Procedimiento de homogeneización y secado solar de materiales a granel e instalación requerida, Solicitud de invención cubana No. 208, OCPI. La Habana, 2001.

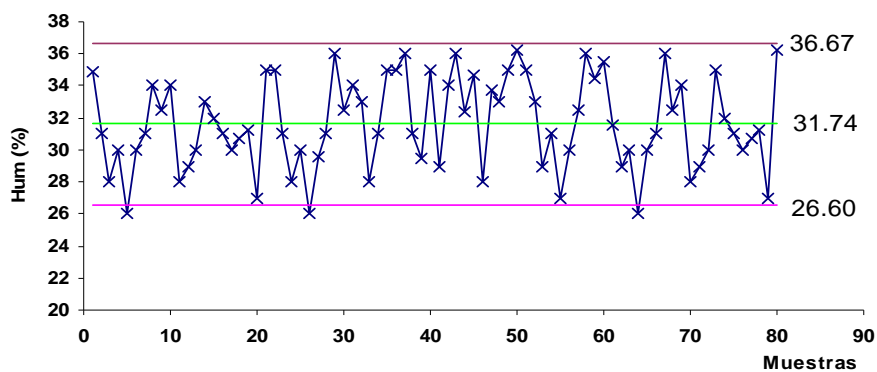
17. Estenoz, S.; M. Espinosa. Procedimiento y equipo para secado solar de materiales a la intemperie, Solicitud de invención cubana No. 175, OCPI, OCPI, La Habana, 2003.
18. Estenoz, S.; M. Espinosa. Prueba de homogeneización y secado solar del mineral (Parte I): Centro de Investigaciones del Níquel, Cuba, Informe de Investigación, 2003.
19. Faires, V. Termodinámica. La Habana: Edición Revolucionaria, 1991. 807p.
20. Falcón, J. Influencia de la composición de la pulpa limonítica en la velocidad de sedimentación. revista minería y geología 3/87. 1987.
21. Ferguson, W.; J. Turner. A comparison of the finite element and control volume numerical solution techniques applied to timber drying problems below the boiling point. Int. J. Num. Methods Eng.38: 451-467. 1995.
22. Fernández, E. Termodinámica Técnica. La Habana: Editorial "Felix Varela, 1994. Tomo I.
23. Filonenko, G. Secado de semillas de tomate. Conferencia nacional de secado-Sección de energética. Editorial Profizdat, Moscú, 1958.
24. Fulford, G. A survey of recent soviet research on the drying of solids. Can. J Chem. Eng. 47: 378-491.1969.
25. Garcell, L. Comportamiento reológico de las pulpas lateríticas. Rev. Minería y Geología 1/91. Ed. Esp. 1991.
26. Gordon G. M. e I. L. Peisajov (1981): Captación de polvos y purificación de gases en la metalurgia de metales no ferrosos. Mir, Moscú.

27. Griñán. P.; S. Fonseca. La madera y el secado solar. Santiago de Cuba, 2003.
28. Guerra, C.; A. Menéndez; R. Barrera; E. Egaña. Estadística. La Habana: Editorial Félix Varela, 2003. 376p.
29. Gutiérrez, R. Influencias de las Características del Mineral Laterítico en los Índices de Explotación de los camiones articulados VOLVO A40D y A35C en la Empresa comandante Ernesto Che Guevara. Trabajo de Diploma, ISMM, Moa, 2003. 60p.
30. MANUAL DE OPERACIONES. Planta Preparación de Mineral. Empresa Comandante Ernesto Che Guevara (1986).
31. MIRANDA J. L. 1996. Composición y conjugación de métodos de determinación de humedad de la industria del Níquel. *Minería y Geología*. 13(2): 39-45
32. ROMERO, Y. 2006. Estudio experimental a escala piloto del secado solar del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. ISMM, 55p.
33. SANTOS, Y. 2005. Estudio preliminar a escala de laboratorio del secado solar del mineral laterítico. Trabajo de Diploma. ISMM, 71p.
34. Torres E., Galano R., Fernández E., García A. (2000) modificación en los levantadores de los secaderos para aumentar el arrastre de partículas finas.
35. Torres, E. (1999): "Investigación del arrastre de partículas en los gases durante el secado del mineral laterítico en tambores cilíndricos rotatorios", Instituto Superior Minero Metalúrgico, Moa, Tesis de Maestría.

ANEXOS



Anexo 1 Equipo TCR TECORA para la determinación de material particulado.



Anexo 2 Carta de control para la humedad en los gases de salida de los secaderos.