

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”

FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA.

Trabajo de Diploma

EN OPCIÓN AL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO

Título: Evaluación del sistema de limpieza de gases en el Electrofiltro de los Silos en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

Autor: Anibal Velázquez Justo

Tutores: Ing. Yodelkis Delgado Drubey
Ing. Orlando Vega Árias

Moa, 2012

“Año 54 de la Revolución”



DECLARACIÓN DEL AUTOR

Yo, **Aníbal Velázquez Justo**, autor de este trabajo de diploma, certifico su propiedad intelectual a favor del Instituto superior Minero Metalúrgico de Moa "Dr. Antonio Núñez Jiménez", y a la empresa Cmdte "Ernesto Che Guevara", los cuales podrán hacer uso del mismo con la finalidad que estimen conveniente.

Aníbal Velázquez Justo
Autor

Ing. Yodelkis Delgado Drubey
Tutor

Ing. Orlando Vega Árias
Tutor



PENSAMIENTOS

"Sabiduría ante todo, adquiere sabiduría y sobre todas tus posesiones adquiere inteligencia. Engrandécela y ella te engrandecerá, ella te honrará cuando tú la hayas abrazado. Adorno de gracia dará a tu cabeza, corona de hermosura te entregará.".....

Proverbios 4 - 7.

"La más hermosa y noble de todas las labores humanas, es la del sembrador que en cualquiera de sus aplicaciones, suponga utilidad para sus semejantes.".....

A. L. Casillas.



AGRADECIMIENTOS

Cuando se llega a la meta se debe reconocer el valor de todos aquellos que nos han brindado conocimientos y apoyo en todos los sentidos es por eso que quiero expresar mi más sincero agradecimiento a mi madre Martica Justo Rodríguez sobre todo, a mi papá Aníbal Velázquez Velázquez, a mi esposa Mariela Espinosa Delgado, mis tíos Armando Velazquez Velázquez y Amparo Velazquez Velázquez, a mi primo Orlando Delgado Velazquez, mis suegros Héctor Espinosa y María Emilia Delgado por haber estado a siempre ahí cuando los necesité.

A mis tutores Yodelkis Delgado Drubey y Orlando Vega Árias, por su ayuda y preocupación desde el primer momento, a Israel Osorio Góngora y Yoalbys Retirado Mediaceja por su apoyo desinteresado, a todos a mis compañeros de aula por haber compartido tantos momentos a lo largo de estos 6 años.

A la Revolución cubana por brindarme esta oportunidad.

A todos muchas gracias

El autor



DEDICATORIA

Dedico este trabajo en especial al recuerdo de mis abuelos, a mi madre por dedicarme todos estos años de sacrificio, a mi padre, a mi abuelo Paco, a mi esposa Mariela, a mis tíos Armando y Amparo por su apoyo incondicional en todo momento.

El autor



RESUMEN

En el presente trabajo se desarrolló la evaluación del sistema de limpieza de gases en el electrofiltro de los silos de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Para ello se empleó un procedimiento de cálculo que tiene en cuenta las principales variables que influyen en la instalación. Los resultados obtenidos evidenciaron que la velocidad de la sustancia de trabajo (mezcla de aire y polvo) es superior a la velocidad de transportación crítica la cual es 2,38 m/s y que el régimen de transporte es turbulento. Se comprobó que el ventilador no desarrolla la carga dinámica total debido a que la presión de impulsión es inferior a la carga total que se introduce por las pérdidas de presión que ocurre en las redes. Lo anterior permitió recomendar el cambio de ventilador por otro que desarrolle mayor presión ya que el mismo trabaja en la condición de sobredimensionado. De los resultados obtenidos en los cálculos se obtiene que el punto de operación del sistema es 72 000 m³/h; 496 mm H₂O. Finalmente se comprobó que para las condiciones analizadas el ventilador consume 320 kWh y que la empresa debe erogar 504 576 CUC al año. Por su parte, las principales afectaciones medioambientales encontradas en la instalación son las emanaciones de polvo y las emisiones de ruido, las mismas afectan considerablemente la salud de los trabajadores de la planta.

**ABSTRACT**

In the present work was developed the evaluation of the system of cleaning of gases in the electrofilter of the silos of the company "Ernesto Che Guevara". For it was used it a calculation procedure that keeps in mind the main parameters that influence in the installation. The obtained results evidenced that the speed of the work substance, it is superior to the speed of critical transportation which is 2,38 m/s and that the behaviour is turbulent. It was proven that the fan doesn't develop the total dynamic load because the drive pressure is below to the total load that is introduced by the losses of pressure that it happens in the nets. The above-mentioned allowed to recommend the fan change for another that develops bigger pressure since the same one works in the over dimension condition. Of the results obtained in the calculations it is obtained that the point of operation of the system is 72 000 m³/h; 496 mm H₂O. Finally was proven that for the analyzed conditions the fan consumes 320 kWh and that the company owes to spend 504 576 CUC a year. On the other hand, the main environmental affectations found in the installation are the powder emanations and the emissions of noise, the same ones affect the health of the workers of the plant considerably.

**ÍNDICE**

Contenido	Págs.
INTRODUCCIÓN	-1-
CAPÍTULO 1 MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL DE LA INVESTIGACIÓN	-4-
1.1- <i>Introducción</i>	-4-
1.2 - <i>Antecedente y estado actual de las teorías relacionadas con el proceso de limpieza de gases</i>	-4-
1.3 - <i>Captadores de polvos en los procesos de limpieza de gases</i>	-9-
1.3.1. <i>Captadores de polvos por la acción de la fuerza de inercia</i>	-9-
1.3.2. <i>Captadores de polvo por acción del campo eléctrico</i>	-11-
1.3.3. <i>Captadores de polvo por acción de la fuerza centrífuga</i>	-13-
1.4 - <i>Descripción del flujo tecnológico de la planta</i>	-17-
1.4.1. <i>Limpieza de gases de molienda</i>	-21-
1.5- <i>Influencia de las propiedades y parámetros más importantes del mineral laterítico en los sistemas de transporte neumático</i>	-22-
1.6.- <i>Conclusiones del capítulo 1</i>	-24-
CAPÍTULO 2 PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE GASES	-25-
2.1 - <i>Introducción</i>	-25-
2.2 - <i>Instrumentos utilizados en la medición de los parámetros</i>	-25-
2.3 - <i>Procedimiento para la evaluación del sistema</i>	-25-
2.4- <i>Datos de la instalación y mediciones de las variables más importantes</i>	-31-
2.5- <i>Otros datos de interés del ventilador que se requieren para los cálculos</i>	-36-
2.6- <i>Conclusiones del capítulo 2</i>	-37-
CAPÍTULO 3 ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL	-38-
3.1 - <i>Introducción</i>	-38-
3.2 - <i>Análisis de los resultados</i>	-38-
3.2.1. <i>Cálculo de los parámetros principales de la instalación</i>	-38-
3.2.2 <i>Punto de operación del sistema</i>	-41-



3.3 - <i>Valoración económica</i>	-42-
3.4- <i>Impacto ambiental</i>	-42-
3.4.1 <i>Influencia del polvo en el medio ambiente</i>	-42-
3.4.2 <i>Influencia del ruido en el medio ambiente</i>	-44-
3.4.3 <i>Medidas para la protección del medio ambiente durante el secado del mineral</i>	-45-
3.5- <i>Conclusiones del capítulo 3</i>	-46-
CONCLUSIONES GENERALES	-47-
RECOMENDACIONES	-48-
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	-49-
ANEXOS	-

Introducción General

INTRODUCCIÓN

La industria cubana del níquel fue sometida a partir del decenio de los años noventa a un amplio y profundo proceso de transformaciones productivas, tecnológicas y organizacionales, las cuales posibilitaron un importante salto cualitativo y productivo de la misma, al tiempo que su efecto multiplicador hacia el resto de la economía se incrementó sustancialmente a partir del período referido.

Las transformaciones aplicadas en esta industria incluyeron también aspectos relacionados con la reducción del consumo energético de los sistemas, la capacitación gerencial y técnica del personal directivo y técnico, trabajar de forma intensiva en la certificación de las diferentes producciones, la aplicación de medidas de redimensionamiento, así como el completamiento de la infraestructura internacional de la industria.

La acción combinada de los factores anteriores posibilitó que la industria niquelífera iniciara desde 1995 un sostenido proceso de recuperación económica. En este sentido, los volúmenes de producción obtenidos a partir de 1996 superaron los niveles récord que se alcanzaron en el período previo al inicio de la crisis, e incluso Cuba ingresó al selectivo grupo de los grandes productores mundiales, en tanto se logró estabilizar los volúmenes de producción en niveles superiores a las 60 000 toneladas anuales a partir de 1997. Al respecto cabe apuntar también que estos resultados se han sustentado en una mejoría apreciable de los índices de consumo energético, de la ley de mineral y en general de los indicadores de eficiencia económica de la industria.

Al producirse los sucesos de Europa Oriental se llegó a pensar en la paralización de la fábrica “Comandante Ernesto Che Guevara”, en la cual se han realizado en los años más recientes importantes transformaciones tecnológicas y energéticas que han permitido reducir el consumo de hidrocarburos en más de un 50 %; a la par, desde 1999 se lograron volúmenes de producción superiores a su capacidad de diseño, aspecto este que era considerado en el pasado como algo inalcanzable.

Tales aspectos demandan la necesidad de racionalizar la explotación de los diferentes equipos e instalaciones que componen dicha entidad, para lograr que los niveles de producción se correspondan con las necesidades actuales del país.

Fundamentación de la investigación

Actualmente en esta fábrica en la planta Preparación de Mineral existen varios sistemas de limpieza de gases. Dentro de estos sistemas se encuentra el ubicado en el electrofiltro de los silos que consta de dos ventiladores (DH26) cuyo objetivo es disminuir la contaminación de la naturaleza y hacer más eficiente el proceso de producción aprovechando racionalmente los componentes valiosos que salen a la atmósfera desde las fábricas metalúrgicas de metales no ferrosos con los gases y junto a las impurezas, se hacen indispensables en las industrias instalaciones de purificación y limpieza de gases.

En Cuba se le brinda gran importancia a los problemas relacionados con la protección de la naturaleza, al aprovechamiento racional de los recursos naturales, y en especial a los problemas de salud y duración de vida de la población; debido a la gran cantidad de gases y polvos nocivos que emanan las fábricas de metalurgia de metales no ferrosos hacia la atmósfera.

La necesidad de proteger el medio ambiente implica la aplicación de procedimientos, cada vez más eficaces, para el análisis de los diferentes procesos industriales, en este caso en aras de mejorar el sistema de limpieza de gases de la Planta Preparación de mineral.

Por lo anteriormente descrito se declara como **Problema:**

El insuficiente conocimiento del comportamiento de los principales parámetros de los equipos en el sistema de limpieza de gases del electrofiltro de los silos en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”, que impide conocer el estado actual de la instalación.

Objeto de investigación:

El proceso de limpieza de gases en el electrofiltro de los silos en la referida empresa.

Hipótesis.

El diagnóstico del sistema de limpieza de gases en el electrofiltro de los silos en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara, conjugado con la evaluación de la

instalación permitirá obtener el comportamiento de los principales parámetros operacionales de la misma.

Objetivo general del trabajo

Determinar el comportamiento de los principales parámetros operacionales de la instalación de limpieza de gases en el electrofiltro de los silos en la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara.

Tareas a realizar

1. Búsqueda de información relacionada con los sistemas de limpieza de gases en el sector industrial.
2. Establecimiento del procedimiento para la evaluación del sistema de limpieza de gases investigado.
3. Determinación de los parámetros operacionales del sistema de limpieza de gases, para las condiciones de explotación actuales del objeto de estudio.
4. Establecimiento de los gráficos de comportamiento de los principales parámetros de la instalación.
5. Análisis de los resultados de la evaluación, así como, del impacto económico y ambiental asociado a la instalación.

Los **métodos de investigación** empleados en el trabajo son los siguientes:

Método histórico-lógico para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el proceso objeto de estudio.

Método inductivo-deductivo para el establecimiento de las teorías y el estado actual de la temática tratada.

Método de investigación experimental para describir y caracterizar el proceso estudiado y sus principales regularidades.

Técnicas computacionales para el procesamiento de los datos experimentales y la obtención de los gráficos de comportamiento del objeto de estudio.

Capítulo 1

CAPÍTULO 1

MARCO TEÓRICO Y CONTEXTUAL DE LA INVESTIGACIÓN

1.1- Introducción

Por la necesidad de proteger el medio ambiente, los recursos naturales y la salud de la población; la recolección y aprovechamiento del polvo en las industrias en la cual exista emanación de gases acompañado de polvos que perjudican la salud humana, es uno de los desafíos del mundo actual al cual es necesario dar respuesta inmediata.

Una de las industrias donde existe este fenómeno en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, es por ello que la reducción de las emisiones de gases y polvo a la atmósfera, además de conocer los parámetros operacionales de este tipo de sistema; son vitales en aras de evaluar la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que lo componen. En este sentido el **objetivo** del capítulo es:

Exponer los fundamentos teóricos del proceso de limpieza de gases que permita la evaluación del objeto de estudio.

1.2- Antecedente y estado actual de las teorías relacionadas con el proceso de limpieza de gases

Una investigación científica de acuerdo con lo planteado por Aróstegui (1978), en cualquier área del conocimiento debe siempre estar sustentada por una investigación teórica y empírica, de ahí que sea necesario utilizar los métodos que caracterizan a cada una de ellas para desarrollar científicamente las mismas a partir de una clara caracterización del objeto, del planteamiento del problema, los objetivos, la hipótesis y las tareas.

Resulta muy útil la revisión de los trabajos de Mesarovich (1996) que aborda la temática relacionada con la teoría general de los sistemas y la metodología de las investigaciones sistémicas. Según Hurtado (1999); Guzmán (2001) este autor conceptualiza con claridad los métodos sistémicos de análisis del conocimiento científico, permitiéndole al investigador su empleo para sustentar teóricamente la investigación. A pesar de que algunos términos y definiciones han evolucionado en el presente, su esencia se mantiene vigente.

Una vez definida la teoría de sistema, como base teórica de la investigación, fue necesaria la búsqueda de métodos que permitieran la identificación y el análisis de los diferentes aspectos (subsistemas) que tributan al proceso de transporte neumático en tuberías horizontales, verticales y codos como sistema integrado. Se basan en el principio físico que el aire bajo ciertas condiciones puede ser utilizado para transportar materiales pesados que crea una caída de presión entre el inicio y el final de la tubería (Neidigh, 2002).

Según Pacheco (1984), las teorías más divulgadas sobre el transporte neumático por tuberías horizontales, verticales y codos que aparecen en la literatura, establecen relaciones entre sus datos experimentales y cierto coeficiente que vincula las pérdidas por fricción totales del proceso de flujo que incluye ambas fases (sólida y gas) y las pérdidas por fricción debido al gas, que en esta investigación es el aire limpio. Interesante en este campo resulta el artículo de Weber (1991) donde hace un análisis de la influencia de la fricción del aire y la mezcla aire - sólido en el transporte neumático, se determinan las pérdidas de presión a partir de un coeficiente de mezcla que incluye todos los parámetros influyentes en el transporte neumático. Otros trabajos dirigidos en la misma dirección son los desarrollados por Arnold y Wipych (1991); Pan y Wipych (1992). En los artículos citados no se parte de un razonamiento teórico del comportamiento físico de los sistemas, por lo que limita su aplicación a las condiciones planteadas en los experimentos. Esto aumenta el error que se comete cuando se aplican los resultados en el transporte de otros materiales.

Existen diferentes estudios en la rama tecnológica que muestran la evolución de los sistemas de transporte neumático desde su surgimiento a mediados del siglo XIX (Fitzgerald, 1996). Los artículos desarrollados por Wypych y Arnold (1989); Arnold y Wipych (1991), plasman una descripción de los principales avances del transporte neumático en Australia hasta el momento en que se hicieron las investigaciones y los cambios tecnológicos introducidos en los sistemas de alimentación con vista a lograr mayor cantidad de material transportado con el menor consumo de aire posible. La automatización de estos sistemas permite la humanización del trabajo de los operarios y la reducción de las dimensiones de los mismos. Sus indagaciones se basan en la parte descriptiva y no profundizan en los detalles de diseño, ni ofrecen métodos de cálculo que permitan entender las tecnologías examinadas.

Un estudio similar pero en otros países lo realizan Reed y Bradley (1991) en Inglaterra; Alberti (1991) en Italia; este último destaca además en su investigación la influencia de las propiedades del producto (densidad real y aparente, granulometría, factor de forma, contenido de humedad, entre otras) en el diseño de los sistemas de transporte neumático.

De los últimos trabajos revisados en el campo tecnológico es importante resaltar el de Dynamic Air (2002), donde se expone una explicación detallada de las aplicaciones y ventajas de los sistemas de transporte neumático en fase densa para manipular materiales sólidos de diferentes características ya sean abrasivos, frágiles o difíciles de manejar

Sobre este tema se han desarrollado varios trabajos investigativos en pos de buscar mejoras técnicas en el sistema de transporte neumático de la planta de calcinación. Un ejemplo es el trabajo realizado por CEPRONI (1995) donde se determinan las velocidades del sistema en cada uno de los ductos de las baterías de ciclones B1-3, B1-4, B1-5 y se determinó que estaban fuera de los valores normativos.

La modelación de la mezcla bifásica en fases fluida y densa es de interés no solo para los sistemas de transporte neumático, sino también para otras aplicaciones tales como: los procesos de fluidización y procesos hidráulicos. Massoudi et al (1999) presentan las ecuaciones que rigen el comportamiento de un flujo de mezcla de partículas en fase densa para flujos completamente desarrollados; el autor examina la influencia de las colisiones ínter partículas, el coeficiente de fricción, la viscosidad y el desarrollo de flujo isotérmico de las mezclas bifásicas

Un modelo para el análisis de las pérdidas de presión en el sistema de transporte es el desarrollado por Pan y Wypych (1997), donde estudian el comportamiento del transporte en fase densa de materiales de forma irregular a partir de la modelación teórica en tuberías horizontales y verticales, los validan con resultados experimentales en instalaciones previamente construidas. Una investigación similar para el transporte en fase fluida es la realizada por Lampinen (1991). En la misma línea Hettiaratchi y Woodhead (1998) hacen una comparación entre la caída de presión en tuberías horizontales y verticales donde establecen la correlación entre ambas, minimizan la cantidad de experimentos a efectuar en el examen de los diferentes sistemas. En todos los artículos citados los autores no muestran el

comportamiento del transporte de los materiales en las dos fases a la vez y no efectúan una exposición del comportamiento del consumo energético que delimite la zona de operación de un sistema en particular.

No existe suficiente información sobre el transporte neumático del mineral laterítico en los materiales consultados. En el manual de operaciones de la planta de preparación del mineral de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara (1985) se encuentran algunos datos de los sistemas actuales, fundamentalmente del sistema de alimentación. Ellos emplean alimentadores de tornillo sinfín FULLER KINYON de fabricación Alemana y compresores centralizados que presentan disímiles problemas (Torres ,1999).

Mason et al (1998) desarrollan la simulación de los sistemas de transporte neumático con el fin de incrementar la flexibilidad de los métodos de diseño. Esta tarea es dividida en dos partes: la predicción del punto de operación del sistema y la influencia de los componentes individuales de la tubería en el flujo. También se debate el perfeccionamiento del algoritmo usado para predecir el punto de operación del sistema que responde a las principales inquietudes relacionadas con la eficiencia del transporte neumático.

El punto de operación de un sistema de transporte neumático puede ser especificado por tres parámetros fundamentales:

- La variación del flujo másico de sólido a través de la tubería
- La variación del flujo másico de gas usado para transportar los sólidos
- La caída de presión necesaria para manejar el flujo

El primer parámetro especifica el punto de rendimiento del sistema, mientras que los otros dos especifican el punto de operación del alimentador de aire (usualmente el componente más caro del sistema). Al usarlos se puede simular la característica de transporte la que representa el rango de posibles condiciones de operación alcanzables por un material a granel en un sistema particular.

Los sistemas de transporte neumático para su investigación se dividen en tres partes:

- Sistema de alimentación
- Sistema de transporte
- Sistema de recepción y separación de polvo.

Un modelo para el análisis de las pérdidas de presión en el sistema de transporte es el desarrollado por Pan y Wypych (1997), donde estudian el comportamiento del transporte en fase densa de materiales de forma irregular a partir de la modelación teórica en tuberías horizontales y verticales, los validan con resultados experimentales en instalaciones previamente construidas. Una investigación similar para el transporte en fase fluida es la realizada por Lampinen (1991). En la misma línea Hettiaratchi y Woodhead (1998) hacen una comparación entre la caída de presión en tuberías horizontales y verticales donde establecen la correlación entre ambas, minimizan la cantidad de experimentos a efectuar en el examen de los diferentes sistemas. En todos los artículos citados los autores no muestran el comportamiento del transporte de los materiales en las dos fases a la vez y no efectúan una exposición del comportamiento del consumo energético que delimite la zona de operación de un sistema en particular.

Los aspectos económicos de los sistemas de transporte neumático se examinan en la literatura, se destaca Hayes et al (1993), ellos dividen los costos en dos categorías fundamentales: costo capital y costo operacional. El primero incluye los costos de diseño, conexión e instalación del sistema y el segundo los costos por conceptos energéticos, de mantenimiento, entre otros. Crawley y Bell (2002) en una búsqueda análoga circunscriben ejemplos de cálculo para sistemas en fases fluida y densa.

En los últimos años se han incrementado las investigaciones relacionadas con el transporte neumático de diversos materiales, la mayoría de los autores (Lampinen, 1991; Paul, 1999; Rodes, 2001; Bachir, 2001; Farnish, 2002; Singer, 2002; Torres, 2003; Alba, 2006) distinguen dos fases fundamentales: la fluida o diluta y la densa; en esta última se hacen diferentes clasificaciones, las más completas son las efectuadas por Rodes (2001) que las divide en dos partes fundamentales (figura 1.1):

- Flujo en fase densa continua, donde el sólido ocupa la parte inferior de la tubería horizontal. El transporte en esta, requiere de altas presiones del gas y es limitado a distancias menores de un kilómetro.
- Flujo en fase densa discontinua (se incluye el flujo en fase pistón), donde existen cavidades de aire entre la carga de material transportado a través de la tubería.

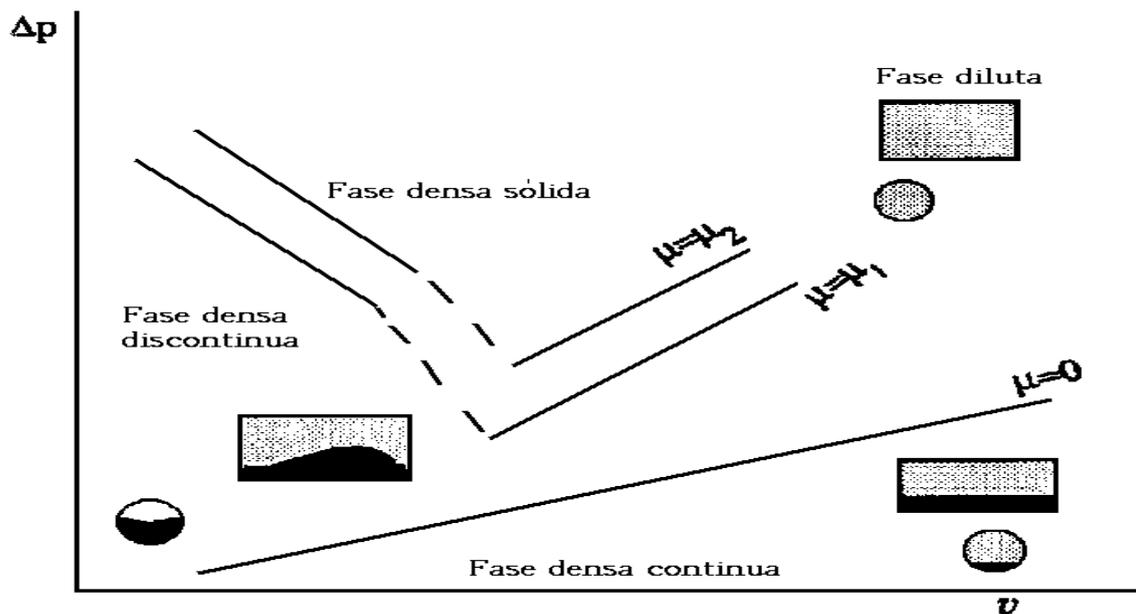


Figura 1.1. Distintas fases en el transporte neumático de materiales

Fuente: M. Rodes, 2001

1.3. Captadores de polvos en los procesos de limpieza de gases

De los captadores de polvo más difundidos, los más importantes son los siguientes:

- Captadores de polvos por acción de la fuerza de inercia
- Captadores de polvos por acción del campo eléctrico
- Captadores de polvos por acción de la fuerza centrífuga.

1.3.1. Captadores de polvos por la acción de la fuerza de inercia

Consiste en el viraje brusco de la corriente de gases con polvo donde las partículas de polvo bajo la acción de la fuerza de inercia seguirán moviéndose en la misma dirección y, en ciertas condiciones pueden ser separados de este flujo.

Una serie de construcciones de captadores de polvo se basa en la utilización de este fenómeno y se llaman **Sacos de polvo**, su principio de funcionamiento es el siguiente:

El gas con polvo entra desde abajo por el tubo central recto o de forma cónica ensanchada hacia abajo en el cuerpo del saco de polvo que es un cilindro con tolva

cónica. Los gases purificados se evacúan, generalmente por una boquilla lateral o superior. Las precipitaciones de polvo tienen lugar durante un brusco viraje de la corriente de gas a 180°C al entrar del tubo central en el cuerpo del saco, y luego al subir los gases a baja velocidad hasta la boquilla de salida, la velocidad del gas en el tubo central y en el cuerpo del saco se escogen de acuerdo con el tipo de polvo y el grado necesario de captación.

En la figura 1.2 se muestra un ejemplo de un captador de polvo por acción de la fuerza de inercia del tipo sacos de polvo.

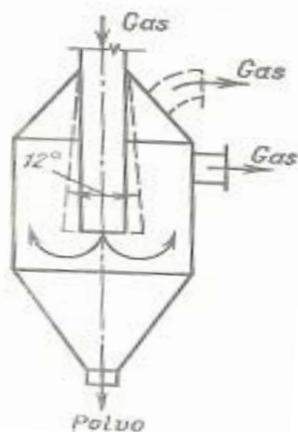


Figura 1.2. Captador de polvo por inercia tipo saco de polvo

A continuación se nombran los más difundidos:

1. Sacos de polvo.
2. Captadores de polvo reflectivos de inercia.
3. Captadores de polvo de celosías.
4. Captadores de polvo por vía húmeda:
5. Lavadoras de gas.
6. Lavadoras de gas con empaques.
7. Lavadoras de gas de otras construcciones.
8. Recogegotas.
9. Ciclones por vía húmeda.
10. Captadores de polvo rápidos (turbulentos)
11. Captadores de polvo de barbotaje y de espuma
12. Captadores de polvo por acción de la fuerza centrífuga:

13. Ciclones ordinarios.
14. Ciclones tipo batería

1.3.2. Captadores de polvo por acción del campo eléctrico

Los captadores de polvo por la acción del campo eléctrico más conocido son los llamados **electrofiltro**, su principio de funcionamiento es el siguiente:

Son equipos encargados de captar el polvo de los gases que se derivan del proceso tecnológico, por acción del campo eléctrico. El proceso de separación del polvo se produce cargando negativamente las partículas en suspensión en el fluido gaseoso, que son atraídas por un electrodo positivo receptor. Es decir, las partículas de polvo contenidas en el gas se cargan para luego ser separadas del flujo de gas bajo la acción del campo eléctrico.

El precipitador electrostático o electrofiltros también es un colector de polvo pero su principio de funcionamiento se diferencia radicalmente respecto de un filtro de mangas, porque captura las partículas creando un campo eléctrico de gran intensidad en el interior de su cuerpo, mediante placas que ionizan las partículas y las atraen. Una vez adherido el polvo a las placas, estas son golpeadas y el polvo es recolectado en tolvas que se encuentran en la parte inferior de estos equipos.

En la figura 1.3 se muestra un ejemplo de un electrofiltro precipitador de placas empleado en el mundo en industrias que se realiza la depuración de partículas.

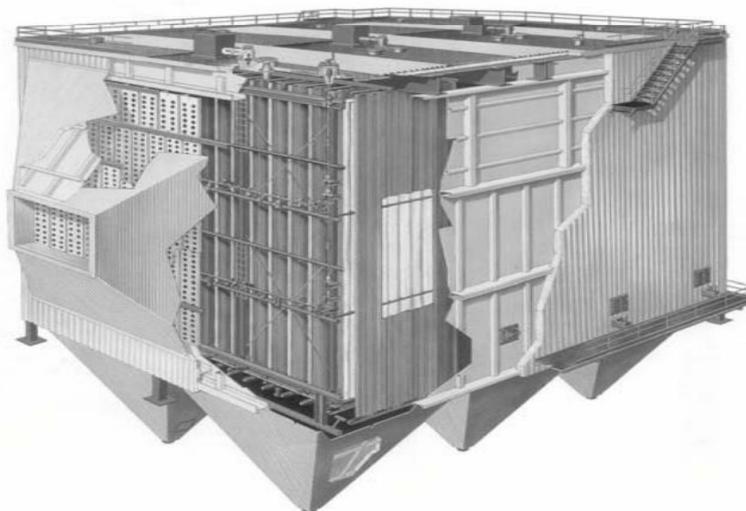


Figura 1.3. Electrofiltro precipitador de placas

Fuente: Algeciras, 2008.

Clasificación de los electrofiltros

- 1.- Según la situación de la zona de carga y de precipitación los electrofiltros se clasifican en: Unizonal (Ia) o Bizonal (Ib).
- 2.- Según la dirección de marcha de los gases a purificar en: Verticales (IIa) u Horizontales (IIb).
- 3.- Según la forma de los electrodos de precipitación en: Tubular, Hexagonal (IIIa) o Laminar (IIIb).
- 4.- Según el número de campos eléctricos situados en serie: de un campo (IVa) y de varios campos (IVb).
- 5.- Según el número de secciones en paralelo: de una sección (Va) y de varias secciones (Vb).
- 6.- Según el estado del polvo a captar:
 - ✓ Para los polvos captados en estado seco (VI a), cuando la purificación de los gases se realiza a la temperatura superior al punto de rocío del gas.
 - ✓ Para los polvos captados en estado húmedo (VI a), cuando los gases están húmedos como resultado de la condensación de vapores de agua u otros componentes gaseosos y se quita de los electrodos por lavado.

Eficacia de los electrofiltros

La veracidad real del funcionamiento de los electrofiltros depende de muchos factores, dentro de los que podemos citar:

- 1.- Propiedades del gas a purificar (composición química, temperatura, humedad, presión).
- 2.- Propiedades del polvo a captar (su composición química, propiedades eléctricas, dispersidad) y el espesor de la capa de polvo en los electrodos de precipitación.
- 3.- Concentración del polvo en el gas (contenido de polvo inicial).
- 4.- Contaminación de los electrodos de efecto corona y de precipitación con polvo precipitado.

5.- Parámetros eléctricos del electrofiltro (tensión aplicada, intensidad del campo, intensidad de la corriente).

6.- Velocidad del gas y uniformidad de su distribución en el campo eléctrico.

Tipos de electrodos de los electrofiltros

1.- Electrodos de precipitación.

2.- Electrodos de efecto corona.

Efecto corona en los electrofiltros

El efecto corona en los electrofiltros surge con una determinada intensidad del campo, que depende de la forma y posición de los electrodos, de la composición de los gases, de su presión y de su temperatura.

El aumento de la presión del gas en el electrofiltro permite trabajar con la mayor intensidad del campo, pero el aumento de la temperatura del gas produce un efecto contrario. La corona se forma a bajas tensiones y facilita la formación de descargas por chispas.

La intensidad de encendido de la corona depende de la correlación entre los diámetros de los electrodos de efecto corona y los de precipitación. Según los datos disponibles, el efecto corona es posible, si la relación es de más de 10. Con un valor menor tendrá lugar una descarga por chispas, sin etapas del efecto corona. Este efecto corona es indispensable para lograr la captación y precipitación del polvo en los electrofiltros.

1.3.3. Captadores de polvo por acción de la fuerza centrífuga

Equipos cuyo funcionamiento está fundado en el aprovechamiento de la fuerza centrífuga. En el caso de un viraje en el movimiento de la corriente de gas o en su movimiento curvilíneo (rotación), además de la fuerza de gravedad y del flujo de gas, en la partícula acciona la inercia. Bajo su acción la partículas tienden a mantener el movimiento rectilíneo, o sea se votan del flujo. Este fenómeno se usa en ciclones.

Por lo ya antes mencionado se impone que los captadores de polvo por la acción de la fuerza centrífuga más conocido son los llamados ciclón, su principio de funcionamiento es el siguiente:

El flujo de gas con polvo se suministra a la parte superior del ciclón que es en muchos casos un cilindro cónico en la parte inferior. Las tubuladura de entrada en el ciclón, en general de forma rectangular, se sitúa sin falta según la tangente de la circunferencia de la parte cilíndrica. Los gases salen del aparato por un tubo redondo situada lo largo del eje del ciclón. Al entrar en el ciclón los gases fluyen de arriba hacia abajo girando al principio en el espacio anular entre la superficie cilíndrica exterior del ciclón y el tubo central de salida y luego en el cuerpo del ciclón, formando un torbellino rotatorio exterior. Por lo tanto se desarrolla la fuerza centrífuga gracias a las cuales las partículas de polvo suspendidas en las corrientes de gas rotatorias se empujan hacia las paredes del cuerpo del ciclón tanto de su parte cilíndrica, como cónica. Al acercarse al cono el flujo de gases se retorna hacia el tubo de salida formando un torbellino rotatorio interior. Las partículas de polvo que alcanzan las paredes del ciclón se mueven junto con los gases para abajo y de ahí se evacúan del ciclón por un tubo de salida del polvo. El movimiento de las partículas de polvo hacia la tubuladura se debe no solamente a la fuerza de la gravedad, sino en primer lugar a que la corriente de gases no solo gira cerca de las paredes de las partes cilíndricas y cónicas, sino se mueve a lo largo del eje del ciclón hacia el vértice del cono. A continuación se muestra la figura 1.4 que refleja un ciclón tipo batería.

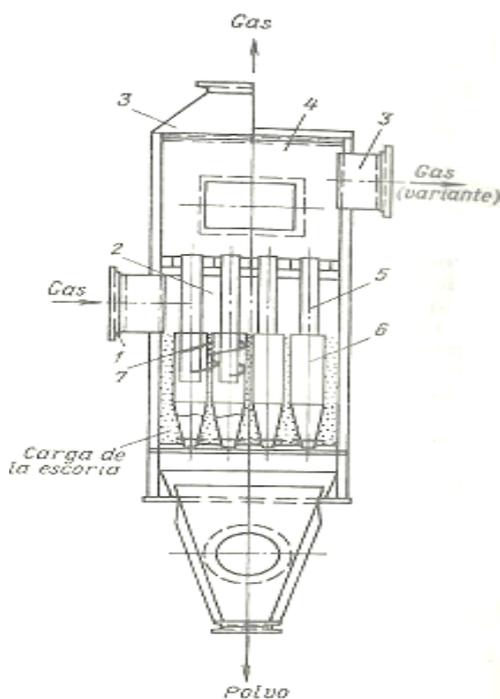


Figura 1.4. Ciclón tipo batería

Campos de aplicación de los ciclones

Su uso es en todos los tipos de industria, ya sea como separador de polvo o en la recuperación de productos de un arroyo aéreo.

Otros de sus empleos se pueden ver tanto para gases cargados de polvo como de niebla, es decir, para pequeñas partículas líquidas. Se han operado a temperaturas tan elevadas como 1000 °C y presiones tan altas como 50700 KPa (500 atm).

En casos especiales, en los que el polvo está altamente floculado o se tienen elevadas concentraciones de polvo (más de 230 g/m³), los ciclones eliminan el polvo con partículas de diámetros pequeños.

En ciertos casos se han obtenido eficiencias tan altas como 98 % en polvos cuyos diámetros de partícula varían entre 0.1 y 2.0 mm por el efecto predominante de la floculación.

Clasificación de los distintos tipos de ciclones

Los ciclones se pueden clasificar atendiendo a la manera en que se produce la carga y descarga del equipo, y en función de su eficacia.

Según a la carga y descarga de los ciclones se distinguen los siguientes tipos:

- a) Ciclones de entrada tangencial y descarga axial.
 - b) Ciclones de entrada tangencial y descarga periférica.
 - c) Ciclones de entrada y descarga axiales.
 - d) Ciclones de entrada axial y descarga periférica.
- Los ciclones de entrada tangencial y descarga axial representan el ciclón tradicional, y aunque se pueden construir con diámetros más grandes, lo más frecuente es que éstos se encuentren entre los 600 y los 915 mm.
 - En los ciclones con entrada tangencial y descarga periférica, el gas sufre un retroceso en el interior del equipo al igual que ocurre en un ciclón convencional. Sin embargo, presenta el inconveniente de que el polvo no es eliminado en su totalidad de la corriente gaseosa, aunque sí se produce una concentración del mismo.

- En los ciclones con entrada y descarga axial la diferencia fundamental es que sus diámetros son de menores dimensiones (entre 25 y 305 mm), gracias a esta característica su eficiencia se hace mayor aunque su capacidad sea menor.
 - Los ciclones de entrada axial y salida periférica proporcionan un flujo directo que es muy adecuado para conectarlos a fuentes de gran volumen, donde los cambios en la dirección del gas podrían ser un inconveniente.
- 1.- La eficacia de un ciclón está determinada en gran medida por su tamaño. Además se ha comprobado que los ciclones de menor diámetro son los que proporcionan mejores eficacias en la separación de partículas. Asimismo se observa que la altura total del equipo también afecta a la eficacia, aumentando ésta con la altura.
 - 2.- Su limitación principal es que, a menos que se utilicen unidades muy pequeñas, la eficiencia de recolección es muy baja para partículas menores de 5 mm y, en especial, para partículas menores de 2 o 3 mm.

Según este criterio se consideran los siguientes tipos de ciclones:

1. muy eficientes (98 – 99) %
2. moderadamente eficientes (70- 80) %
3. de baja eficiencia (50 %)

Construcciones de los ciclones

En la metalurgia de metales no ferrosos los ciclones más difundidos son los NIOGAZ, LIOT y SIOT. Los ciclones NIOGAZ tienen una característica peculiar que los diferencia de los otros tipos de ciclones, y es que poseen una tubuladura inclinada (en vez de la situada a 90 grados con respecto al eje del ciclón).

Existen tres tipos de ciclones NIOGAZ que se diferencian uno del otro por el ángulo de inclinación de la tubuladura de entrada.

- 1.- El tipo TsN-15 (normal) y el TsN-15u (acortado) con ángulo de inclinación de 15° .
- 2.- El tipo TsN-24 de alta productividad (con el menor coeficiente de resistencia hidráulica ζ para la partícula de polvo grueso) con ángulo de inclinación de 24° .

3.- El tipo TsN-11 eficiencia elevada (con el mayor coeficiente de resistencia hidráulica) y ángulo de inclinación 11° .

Para los ciclones NIOGAZ TsN-11, TsN-15, TsN-15u se recomiendan los siguientes diámetros interiores D (mm): 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000. Para los TsN-24 se agregan 2400 y 3000.

El tipo básico de ciclones NIOGAZ es el TsN-15, con este tipo de ciclones se garantiza el mayor grado de captación de polvo con el menor coeficiente de resistencia hidráulica. Los ciclones NIOGAZ TsN-24 se recomiendan para bajas exigencias en cuanto al grado de purificación (para purificación preliminar antes de los electrofiltros).

Los ciclones NIOGAZ del tipo TsN-11 son los existentes en la Planta de Preparación de Mineral, estos tienen un diámetro interior $D = 1800$ mm.

1.4. Descripción del flujo tecnológico de la planta

En la Planta Preparación de Mineral es donde se inicia el proceso productivo de la fábrica, según la tecnología carbonato amoniacal. El mineral procedente de la sección de trituración primaria puede ser suministrado a la Planta de Preparación de Mineral por dos vías:

- ✓ A través de grúas gantry.
- ✓ Directamente por los transportadores de enlace (No.14 ó 15).

Una vez descargado el mineral en galería es remontado y alimentado por las grúas gantry (121-GR-5, A, B, C). Estas remontan el mineral y lo homogeneizan en el deposito exterior que posee una capacidad de 360 000 t húmedos (360000000 kg), capaz de garantizar 28 días de trabajo en la Planta.

Estas grúas poseen dos capacidades de trabajo que son: 660 t/h (183,333) kg/s al remontar y 690 t/h (191,666) kg/s al alimentar a las correas.

El mineral suministrado por las grúas o el transportador No. 14 ó 15 es descargado en los transportadores 121 TR-5 y 5a, 121-TR6, 6a, cuyas capacidades son 750 t/h (208,333) kg/s cada uno.

El paso del mineral desde las grúas hacia los transportadores 5 y 5a, 6 y 6a, se realiza a través de un alimentador que se mueve solidario con las grúas 121-AL-2 A, B, C y que posee para este trabajo (de alimentación) un transportador 121-TR-8 A, B, C y de capacidad 750 t/h (208,333) kg/s.

Los transportadores 5, 5a, 6 y 6a, alimentan a los transportadores 121-TR-7 y 7a los que se encargan de llevar el mineral homogeneizado hasta el edificio de los secaderos. La capacidad de estas correas es de 750 t/h (208,333) kg/s y todo su contenido lo vierten sobre los transportadores 121-TR-8 y 8a que tiene como función la de alimentar a los secaderos y al depósito de mineral interior o de emergencia.

La alimentación a los secaderos se realiza a través de unos desviadores que se encuentran justamente sobre las tolvas de los secaderos. La alimentación al depósito Interior se realiza de la misma forma, o sea, mediante desviadores de mineral que se encuentran situados sobre tres correas colocadas entre los secaderos 2 y 3, 4 y 5 y al final del edificio. Estos transportadores 121-TR-10-1, 10-2, 10-3 poseen capacidad 750t/h (208,333) kg/s.

El mineral almacenado en el depósito interior que se usara cuando, por cualquier tipo de avería surgida en el proceso antes de los secaderos, se interrumpa el suministro de la materia prima a esta sección. La capacidad de este almacén posibilita a la planta trabajar durante 4 días.

Este depósito posee para la manipulación del material, 2 (dos) grúas de puente 121-GRL-101 A y B de capacidad igual a 350 t/h (97,222) kg/s cada una. Se encargan de alimentar a los secaderos en los casos que se explicaron en el párrafo anterior. El mineral llegará a los secaderos 121-SC-101-107 pasando a través de alimentadores de esteras 121-AL-101-107 de capacidad variable (90 a 120) t/h (25 a 33,333) kg/s y los transportadores de bandas 121-TR-9-1 al 9-7 de capacidades igual a 125 t/h (3,472) kg/s cada uno.

El tambor secador posee una longitud igual a 48000 mm y un diámetro 4500mm. El mineral al entrar al secadero lo hará con una humedad aproximadamente de (36 a 39) %, la que puede ser mayor en épocas de lluvia, y saldrá del mismo con (4,0 a 5,5) % según esta establecido.

Para lograr esto cada secadero posee una cámara de combustión 121-CC-101-107 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 1500°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 los gases al tambor secador se realiza en dirección concurrente con el 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.

Los gases calientes pueden atravesar el secadero debido a la succión que crea un ventilador 121-VE-108-113 de tiro situado a la salida del electrofiltro que posee cada secadero individualmente.

Además, estos gases son capaces de arrastrar con ellos del (36 a 40) % del polvo, que entra con el mineral o que se forma durante el proceso de secado y que por lo general poseen una granulometría de $-0,074\text{mm}$ el que será introducido al sistema de colección.

El mineral después de secado, es beneficiado en la descarga del tambor a través de un tromell, mediante el cual se rechazan las rocas mayores de 10mm hacia el transportador 11 y el resto del mineral es descargado en el transportador 11a, estas correas son denominadas comúnmente correas calientes debido a que son las primeras que hacen contacto con el mineral caliente que sale de los secaderos. La capacidad es de 490 t/h (136.111) kg/s.

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

Este mineral secado y beneficiado, es llevado (descargado) en la correa 121-TR-12a que es la vía de unión entre los secaderos y los molinos. Esta correa transportadora (121-TR-12a), posee una capacidad de 490 t/h (136,111) kg/s y descarga su

contenido en 4 tolvas, una para cada molino 121-TV-201-204 de seis metros de capacidad cada una, mediante desviadores de mineral colocados sobre la correa y justamente sobre las mencionadas tolvas.

Las rocas rechazadas son descargadas en la correa 121-TR-12, la cual transporta el material de rechazo hacia una tolva, ubicada al final del transportador, desde la cual es evacuado a través de camiones de volteo. Esta correa transportadora posee una capacidad de 490 t/h (136,111) kg/s.

Sobre estas correas se encuentra montado un sistema de adición de petróleo aditivo en forma de ducha que se mezclará conjuntamente con el mineral de forma dosificada mediante un sistema automático que regulará la relación petróleo-mineral, instalada en la misma área que es de (3,6 a 4.2)%, siendo utilizado como agente reductor en la Planta de Horno de Reducción; el por ciento a dosificar es orientado por la dirección de tecnología de la Planta Hornos de Reducción. Desde cada tolva el mineral llegara a los molinos en forma dosificada y este trabajo corresponde hacerlo a los alimentadores de disco 121-AL-201 A y B, 121-AL-204 A y B que poseen cada tolva y que pueden entregar (55 a 120)t/h (15,277 a 3,333) kg/s a las correas 121-TR-13-1a13-4 las que descargan el mineral en el molino de bolas 121-ML-201-204; la capacidad de esta correa es de 160 t/h (44,44) kg/s.

De esta forma el mineral llega al molino de bolas cuya capacidad es de 120 t/h (33,333) kg/s y tiene como dimensiones 5700mm de longitud y 3200mm 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, siendo las dimensiones las siguientes:

100 mm-10 %	5,5 t	(5500kg)
70 mm-10 %	5,5 t	(5500kg)
60 mm-15 %	8,0 t	(8000kg)
40 mm-25 %	13,5 t	(13500kg)
32 mm-40 %	<u>21,5 t</u>	<u>(21500kg)</u>
	54,0t	(54000kg)

El producto que el molino debe entregar tendrá una granulometría de (85 a 87) % de -0,074mm.

Todo lo que entra al molino saldrá del mismo mediante barrido con aire, que es producido por un ventilador de recirculación 121-VE-205-208 de 134 000 m³/h (3,722) m³/s de capacidad situado a la descarga del molino y cerrando un circuito que está formado por el molino, 1 separador 121-SE-201, 4 ciclones 121-CN-201-204 A ,B, C y D, 2 baterías de 6 ciclones 121-CN-205-210 A, B, C, D, E, F. Con este ventilador se barre el mineral molido y se succiona; este doble efecto propicia la obtención del mineral molido.

El mineral barrido y succionado es introducido en un separador neumático de diámetro 4 250mm donde sufre una clasificación de forma que, el que tenga características de producto final pasará al sistema de colección primaria (a los ciclones) y el que no posea estas características pasará al molino (constituyendo el rechazo) para su ulterior tratamiento hasta que alcance la granulometría adecuada.

Este equipo puede realizar este trabajo a merced de damper que posee y que son regulados para obtener la granulometría del mineral que se quiera.

El sistema de colección primaria formada por ciclones, se encarga de recoger el polvo producido y lo descarga en las tolvas de producto final 121-TV-205 A y B. Lo que no se recoge en los ciclones y que es por lo general, un mineral con granulometría -0,044 mm pasará por un sistema de limpieza de gases de filtros de mangas donde se captura la casi totalidad del polvo que entra en él.

De igual forma, todo el polvo recogido es enviado hacia las tolvas de producto final mediante el empleo de bombas en vacío 121-BO-201 A, B, C, D, E y F de 50 t/h (13,888) kg/s de capacidad. Todo el mineral molido es transportado hacia los silos del mineral de la Planta de Hornos de Reducción mediante el empleo de bombas neumáticos 121-BO-107-112 colocadas en la descarga de las tolvas.

1.4.1. Limpieza de gases de molienda

El polvo no recolectado en el sistema de colección primaria formado por las 4 (cuatro) baterías de ciclones (cuatro ciclones cada una) y 8 (ocho) baterías de ciclones secundarios (seis ciclones cada una), llegará a la sección de limpieza de gases formada por 2 (dos) filtros de mangas 121-FM-201 y 202 de las secciones de molienda 121-ML-201 al 204. Los filtros de mangas 121-FM-201 y 202 cuentan con tres (3) compresores destinados a la producción de aire para el transporte del

mineral colectado hacia las tolvas de producto final (121-TV-205-A y B), así como garantizar la operación de dichos filtros.

Todo el polvo colectado en los Filtros de Mangas 121-FM-201 y 202 es llevado a las tolvas de producto final 121-TV-205 A y B de los molinos mediante el empleo del transporte por medios densos. De aquí es bombeado a los silos de almacenaje de mineral de la Unidad Básica de Producción de Hornos de Reducción mediante el empleo de bombas neumáticas 121-BO-107-112.

El aire limpio de polvo, con concentración de $< 20\text{mg/m}^3\text{n}$, es expulsado a la atmósfera mediante el uso de 2 (dos) ventiladores de tiro (121-VE-201 y 202) colocados al final de cada filtro respectivamente, con capacidad de $210\,000\text{ m}^3/\text{h}$ ($58.33\text{ m}^3/\text{s}$) a través de una chimenea metálica de 80 m de alto (121-CH-201).

1.5. Influencia de las propiedades y parámetros más importantes del mineral laterítico en los sistemas de transporte neumático

Un paso importante en el diseño de los sistemas de transporte neumáticos es determinar las propiedades físicas y aerodinámicas del mineral en las condiciones en que se realizará el transporte del mismo (humedad, temperatura, granulometría), y otras características del producto tales como fragilidad, propiedades abrasivas, higroscopicidad, explosividad, entre otros.

En la tabla 1.1, se muestra una síntesis de la técnica, escogida en el diseño de un sistema de transporte neumático el cual está influenciado por las propiedades más significativas del material.

Tabla.1.1. Influencia de las propiedades y parámetros principales del producto en los sistemas de transporte neumático.

Propiedades	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Densidad del sólido		X				X		X	
Angulo de reposo					X				
Temperatura	X		X	X		X		X	X
Humedad	X	X			X			X	
Granulometría		X				X		X	

Continuación de la Tabla 1.1.

Propiedades	A	B	C	D	E	F	G	H	I
Forma de la partícula	X					X	X	X	
Dureza	X	X	X			X	X		
Fragilidad	X	X				X	X		
Flotabilidad	X				X	X	X		
Fluidez	X				X				
Higroscopicidad	X			X	X				
Agresividad química			X						X
Toxicidad	X								X
Explosividad	X			X					X
Sensibilidad				X					

Donde:

- A. Sistema de transporte
- B. Velocidad de transporte
- C. Materiales de construcción
- D. Características del gas
- E. Almacenaje
- F. Sistema de alimentación
- G. Sistema de recepción
- H. Filtración
- I. Seguridad

El segundo paso en el proceso de proyección de las instalaciones es la selección del tamaño del sistema en función de las propiedades y parámetros requeridos.

Esto permite la determinación del flujo de gas, el diámetro del tubo y la presión de operación requerida, como consecuencia, esto permite definir las dimensiones del equipo y la planta.

Una correcta selección del tamaño del sistema debe estar basado en el conocimiento exacto de los parámetros característicos del producto que va a ser manipulado.

- Velocidad del aire mínima para el transporte.
- Caída de presión por unidad de longitud de la mezcla (gas - sólido), en función de la concentración expresada como una relación entre el peso del producto y el gas utilizado para el transporte.

1.6. Conclusiones del capítulo 1

- 1.- Se desarrolló el marco teórico de la investigación, el mismo tiene en cuenta entre otros aspectos: los antecedentes de las teorías relacionadas con el proceso de limpieza de gases; las partes componentes de los sistemas y la descripción de la planta donde se encuentra el objeto de estudio. Estos criterios constituyen los elementos más importantes a considerar en la evaluación de los sistemas de limpieza de gases.
- 2.- Se han desarrollado diversos trabajos relacionados con los sistemas de limpieza de gases en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”. Sin embargo, la instalación investigada no ha sido suficientemente estudiada con la finalidad de evaluar los parámetros principales de operación.

Capítulo 2

CAPÍTULO 2

PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE GASES

2.1- Introducción

Desde el inicio del proceso revolucionario hasta la actualidad, el incremento de la actividad económica ha alcanzado resultados impresionantes con el aumento de las inversiones en nuevas plantas y la modernización de otras por parte del Ministerio de la Industria Básica, lo que unido últimamente a la implementación del Perfeccionamiento Empresarial, ha ocasionado un efecto multiplicador que ha dinamizado la economía y la investigación científica como vía para la obtención de nuevas tecnologías que minimicen los costos de producción y tengan en cuenta la protección del ambiente.

La búsqueda de una tecnología adecuada para el proceso de secado del mineral en la planta de preparación de mineral, permitirá el desarrollo acelerado de la empresa, dando respuesta a la misión de esta industria que es: incrementar y diversificar la producción de níquel y cobalto alcanzando los estándares internacionales de eficiencia metalúrgica, costos de producción y productividad (...) que permita maximizar los aportes al estado (Quintana, 1999).

Recientemente se han realizado trabajos relacionados con el proceso de secado en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” referidos a la eficiencia metalúrgica de la planta, pero en ninguno de los casos se ha realizado un estudio de la instalación de limpieza de gases de los electrofiltros en los silos.

En tal sentido el objetivo del capítulo es: establecer los métodos y procedimientos necesarios para la evaluación del sistema de limpieza de gases de electrofiltro de los silos en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

2.2- Instrumentos utilizados en la medición de los parámetros

Para la toma de los valores de los parámetros que indican el funcionamiento de la instalación se emplearon los recursos puestos a disposición en el panel de control de la planta de preparación del mineral (CYTEC-SCADA). En dicho panel se registran las mediciones de temperatura, medidas con termoresistencias en los distintos puntos requeridos en el sistema de limpieza de gases. Otros equipos empleados son los flujómetros, manómetros, entre otros.

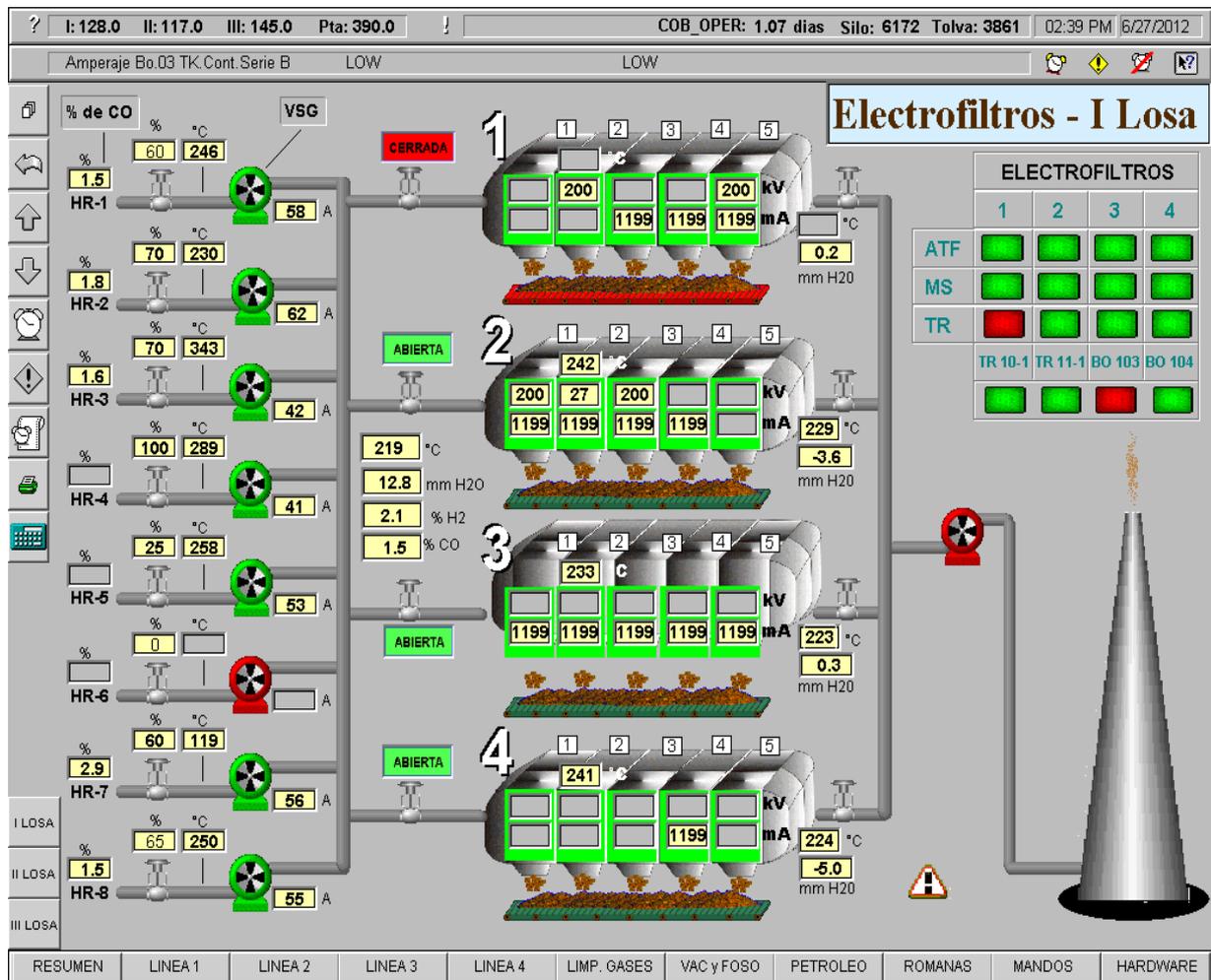


Figura 2.1. Imagen del sistema CYTEC-SCADA utilizado para la medición.

2.3- Procedimiento para la evaluación del sistema

En el presente epígrafe se expone el procedimiento de cálculo, fundamentado en la ley de conservación de masa y energía; establecida en la bibliografía especializada en la temática (Pavlov, 1981; Cherkaski, 1986; Nekrasov, 1990; Torres, 2003).

Según Alba (2006) para la selección de los parámetros fundamentales del sistema de aspiración de polvo es necesario el conocimiento previo de las características del material a transportar.

La tabla 2.1 muestra las mediciones realizadas en la planta de preparación de mineral las cuales constituyen la base de los cálculos realizados por el autor.

- Las condiciones normales que se toman son a (0°C y 760 mm Hg (1 atm)).

La densidad del polvo es $\rho_{polvo} = 830 \text{ kg/m}^3$.

Esta densidad (densidad del polvo) es un dato de proyecto utilizado en el departamento de ingeniería de la empresa.

- La eficiencia para la batería característica de ciclones de 93,62 %
- La densidad real de los gases 1,15 kg/m³
- Diámetro máximo de la partícula en suspensión que circula.

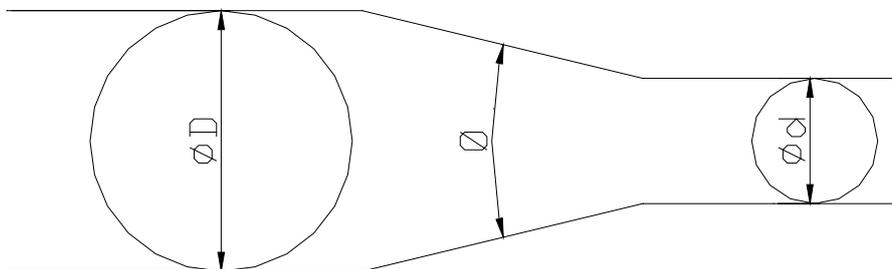
Tabla 2.1. Relación tamaño partículas – velocidad crítica de sedimentación

Tamaño de partículas	Velocidad crítica (m/s)
149μ m	14,32
75μ m	8,09
44μ m	2,38

- Determinación de los coeficientes de pérdidas (K) para cada accesorio

Los coeficientes de pérdida de cada accesorio (excepto los reducidos y los ensanchamientos) se determinaron a través de las tablas del Prontuario de ventilación.

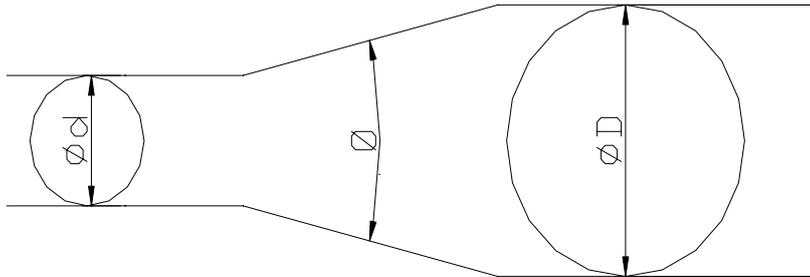
- **Cálculo de los reducidos (de redondo a redondo) K_r**



$$\text{Si } \theta < 45^\circ \quad K_r = 0.8 \cdot \text{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2} \right)$$

$$\text{Si } 45^{\circ} < \theta < 180^{\circ} \quad K_9 = 0.5 \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right) \cdot \sqrt{\frac{\text{sen } \theta}{2}}$$

➤ Para los ensanchamientos (de redondo a redondo) K_{10}



$$\text{Si } \theta < 45^{\circ} \quad K_{10} = 2.6 \cdot \text{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2$$

$$\text{Si } 45^{\circ} < \theta < 180^{\circ} \quad K_{10} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2$$

- Cálculo de la velocidad

$Q = V \cdot A$ de donde;

$$V = \frac{Q}{A} \tag{2.1}$$

Donde;

V : Velocidad de los gases, [m/s]

Q : Gasto volumétrico, [m³/s]

A : Área, [m²]

$$A = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \tag{2.2}$$

d : Diámetro, [m]

- Cálculo del número de Reynolds

$$R_e = \frac{V \cdot d}{\nu} = \frac{V \cdot \rho \cdot d}{\mu} \quad (2.3)$$

Donde;

V : Velocidad de los gases, [m/s]

ρ - densidad, [Kg/m³]

μ - viscosidad dinámica, [N, s/m²]

ν - viscosidad cinemática, [m²s]

- Cálculo de la longitud equivalente para cada tramo

Este se basa en calcular las pérdidas de cargas que representan los distintos accidentes (accesorios) de una canalización en longitudes de conducto recto con las mismas pérdidas. De esta forma se llega al cálculo de una tubería recta de longitud tal que da las mismas pérdidas que la conducción real con sus distintos elementos que modifican su trayectoria.

La longitud equivalente de un accesorio se determina por la siguiente ecuación:

$$L_{eq} = \frac{K \cdot D_{eq}}{\lambda} \quad (2.4)$$

Donde:

K : es el coeficiente de pérdida del accesorio

D_{eq} : es el diámetro equivalente del tramo, [m]

λ : es el coeficiente de fricción que está en dependencia del número de Reynolds, el diámetro equivalente y la rugosidad de la tubería para cada tramo.

Repetiendo este sencillo cálculo para cada uno de los accidentes (accesorios) de la conducción se llega a obtener una serie de sumandos, constituidos por los tramos

rectos equivalentes a los mismos, que junto con los trozos rectos reales de la tubería darán la longitud total que servirá para determinar la pérdida de carga.

Los coeficientes de pérdidas (K) de los accesorios se determinan por tablas o por ecuaciones matemáticas de acuerdo a las características de cada accesorio (ver anexo 1).

- Longitud equivalente total

Este se basa en sumar la longitud equivalente ($LeqT$) en cada tramo con la longitud de los tramos rectos.

$$LeqT = \Sigma L_{eq} \quad (2.5)$$

- Cálculo de la pérdida de presión en cada tramo

La instalación de limpieza de gases del electrofiltro de los silos, presenta un sistema complejo de 10 tuberías ramificadas.

Para el cálculo de las pérdidas de presión en los ductos que transportan gases más polvo se analizó teniendo en cuenta todas las líneas de suministro. Esta metodología se puede emplear, para todas las líneas aunque la misma no posean igual configuración (aquí se tiene en cuenta también la cantidad de equipos de limpieza de gases).

Para el análisis de las pérdidas de presión, la línea seleccionada fue dividida por tramos. Este compartimiento está en dependencia de la variación del flujo en los diferentes tramos de la línea y del diámetro del tramo.

La ecuación utilizada para determinar las pérdidas de presión por tramos se muestra a continuación.

La diferencia de niveles $\Delta Z = 0$ porque se trabaja con gases, entonces la curva de la red es igual a la sumatoria de todas las pérdidas en la línea.

$$h = \frac{\lambda \cdot LeqT \cdot Q^2}{12.1 \cdot D^5} \quad (2.6)$$

- Pérdidas totales por cálculo de flujo

Las pérdidas totales se calculan a partir de la sumatoria de las calculadas para cada tramo y pertenecen a todas las tuberías que entran al colector.

$$H_{red} = \Sigma h = \frac{\lambda \cdot LeqT \cdot Q^2}{12.1 \cdot D^5} \quad (2.7)$$

- Cálculo de la potencia del ventilador

$$N_v = \frac{Q \cdot H}{102 \cdot \eta} \quad (2.8)$$

Donde:

N_v : es la potencia de trabajo del ventilador, [kW]

Q: es el gasto en el punto de trabajo, [m³/s]

H: es la altura de presión en el punto de trabajo, mm H₂O

η : es el rendimiento del ventilador (75 %)

2.4- Datos de la instalación y mediciones de las variables más importantes

- Análisis de las redes de distribución por sectores

Tabla 2.2. Accesorios de los 9 primeros sectores

Accesorios	Sectores									
	TR11		Silos V		Silos H		Losa 2y3		Losa 1	
	Cant	Fr	Cant	Fr	Cant	Fr	Cant	Fr	Cant	Fr
Válvula de Mariposa	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.35
Unión en Y recto	1	0.44	0	0	1	0.44	0	0	0	0
Unión en Y codo	1	0.35	0	0	0	0	0	0	0	0
Campana	0	0	1	0.35	1	0.35	0	0	0	0
Ensanchamiento	0	0	1	0.25	1	0.25	0	0	0	0
Codo Continuo	0	0	3	0.9	3	0.9	1	0.3	4	1.2
Codo Obtuso	0	0	0	0	2	1.1	0	0	0	0
Codo de 4 secciones de 90°	5	1.75	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 3 secciones de 90°	2	0.94	0	0	0	0	0	0	0	0

Continuación de la Tabla 2.2.

Accesorios	Sectores									
	TR11		Silos V		Silos H		Losa 2y3		Losa 1	
	Cant	Fr	Cant	Fr	Cant	Fr	Cant	Fr	Cant	Fr
Codo de 4 secciones 45 ⁰	2	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 3 secciones 45 ⁰	6	1.92	0	0	0	0	0	0	0	0
Total		5.9		1.5		3.04		0.3		1.55
Accesorios	Silo 1		Tvm1y2		Tvm2		Silo D			
	Cant	Fr	Cant	Fr	Cant	Fr	Cant	Fr		
Válvula de Mariposa	0	0	0	0	0	0	0	0		
Unión en Y recto	1	0.44	1	0.44	0	0	2	0.88		
Unión en Y tipo codo	0	0	0	0	0	0	0	0		
Campana	0	0	2	0.7	1	0.35	0	0		
Ensanchamiento	1	0.25	1	0.25	0	0	1	0.25		
Codo Continuo	6	1.8	8	2.4	6	1.8	2	0.6		
Codo Obtuso	0	0	0	0	0	0	1	0.55		
Codo de 4 secciones de 90 ⁰	0	0	1	0.35	0	0	0	0		
Codo de 3 secciones de 90 ⁰	0	0	0	0	0	0	0	0		
Codo de 4 secciones 45 ⁰	0	0	0	0	0	0	0	0		
Codo de 3 secciones 45 ⁰	0	0	0	0	0	0	0	0		
Total		2.49		4.14		2.15		2.28		

Nota: Fr es el factor de resistencia (Fuente: Prontuario de Ventilación Data, 2002)

En la tabla 2.2 para los 9 primeros sectores del sistema de limpieza de gases se muestran los diferentes accesorios y sus respectivos factores de resistencia. En la sección del transportador (TR11) existe el mayor valor de este factor, debido a la cantidad de accesorios que lo constituyen.

- Red de distribución transportador 12

En la tabla 2.3 se muestran los diferentes accesorios y sus respectivos factores de resistencia del transportador 12. El mencionado transportador consta de 18 tramos los cuales fueron considerados en los cálculos.

Tabla 2.3. Tramos del transportador 12.

Accesorios	Tramos											
	#	1	#	2	#	3	#	4	#	5	#	6
Tubería de entrada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0

Continuación de la Tabla 2.3.

Accesorios	Tramos											
	#	1	#	2	#	3	#	4	#	5	#	6
Válvula de Compuerta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Globo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Cheque	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula Bola	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Mariposa	1	0.3	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35
Válvula de macho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unión en Y recto	0	0	1	0.44	1	0.44	1	0.44	1	0.44	1	0.44
Unión en Y tipo codo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Campana	1	0.35	1	0.25	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35
Reducido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ensanchamiento	1	0.33	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.33
Unión en Te	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 4 secciones de 90 ⁰	3	1.05	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 3 secciones de 90 ⁰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 4 secciones 45 ⁰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 3 secciones 45 ⁰	5	1.4	0	0	0	0	1	0.28	1	0.28	1	0.28
Tubería de salida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Factor de Resistencia Total, (nt)		3.43		1.04		1.14		1.42		1.42		1.75
Accesorios	Tramos											
	#	7	#	8	#	9	#	10	#	11	#	12
Tubería de entrada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Compuerta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Globo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Cheque	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula Bola	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Mariposa	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35	0	0
Válvula de macho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unión en Y recto	1	0.44	1	0.44	1	0.44	1	0.44	1	0.44	0	0
Unión en Y tipo codo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Campana	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35
Reducido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.15
Ensanchamiento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unión en Te	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 4 secciones de 90 ⁰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 3 secciones de 90 ⁰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 4 secciones 45 ⁰	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 3 secciones 45 ⁰	1	0.28	1	0.28	1	0.28	1	0.28	1	0.28	0	0
Tubería de salida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Factor de Resistencia Total, (nt)		1.42		1.42		1.42		1.42		1.42		0.5

Continuación de la Tabla 2.3.

Accesorios	Tramos											
	#	13	#	14	#	15	#	16	#	17	#	18
Tubería de entrada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Compuerta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Globo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Cheque	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula Bola	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Mariposa	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35
Válvula de macho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unión en Y recto	1	0.44	1	0.44	1	0.44	1	0.44	1	0.44	1	0.44
Unión en Y tipo codo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Campana	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35	1	0.35
Reducido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ensanchamiento	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unión en Te	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 4 secciones de 90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 3 secciones de 90°	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 4 secciones 45°	0	0	1	0.22	0	0	0	0	0	0	1	0.22
Codo de 3 secciones 45°	1	0.28	0	0	1	0.28	1	0.28	1	0.28	0	0
Tubería de salida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Factor de Resistencia Total, (nt)		1.42		1.36		1.42		1.42		1.42		1.36

De la tabla 2.3 se infiere que el tramo 1 presenta el mayor valor de factor de resistencia por la presencia de 11 accesorios. Lo anterior según las fuentes bibliográficas consultadas (Pavlov, 1981; Cherkaski, 1986; Nekrasov, 1990) determinará en gran medida la características de la red y por consiguiente el punto de operación del sistema.

- Relación de datos de flujo, densidad viscosidad y diámetro interior

Tabla 2.4. Datos para los 9 primeros sectores

Datos	TR 11	Silos V	Silos H	Losa 2y3	Losa1	Silo 1	Tvm1y2	Tvm2	Silo D
Flujo, m ³ /h	25620	5629	5629	2199	1099	3166	4398	2199	3166
Densidad, kg/m ³	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
Viscosidad Cinemática, m ² /s (E-05)	1.710	1.495	1.495	1.495	1.495	1.495	1.495	1.495	1.495
Diámetro interior, m	0.85	0.4	0.35	0.5	0.35	0.3	0.5	0.3	0.35

- Relación de datos de flujo, densidad viscosidad y diámetro interior de todos los tramos del transportador 12

Tabla 2.5. Datos de los tramos del transportador 12.

Tramos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Flujo, m ³ /h	18005	550	3360	819	940.8	728	963.2	6720	6720
Densidad, kg/m ³	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
Viscosidad Cinemática, m ² /s (E-05)	1.982	1.495	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.5	1.495
Diámetro interior, m	0.8	0.3	0.4	0.4	0.25	0.4	0.3	0.3	0.4
Tramos	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Flujo, m ³ /h	980	980	3360	6720	980	980	6720	980	6720
Densidad, kg/m ³	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15	1.15
Viscosidad Cinemática, m ² /s (E-05)	1.5	1.495	1.5	1.5	1.5	1.495	1.5	1	1.495
Diámetro interior, m	0.4	0.3	0.5	0.3	0.4	0.4	0.3	0.3	0.4

- Factor de fricción para los 9 primeros sectores

Tabla 2.6. Factor de fricción en los 9 primeros sectores

Datos	TR 11	Silos V	Silos H	Losa 2y3	Losa 1	Silo I	Tvm 1 y 2	Tvm 2	Silo D
Factor de Fricción	0.013	0.015	0.015	0.018	0.020	0.016	0.016	0.017	0.016

- Factor de fricción transportador 12

Tabla 2.7. Factor de fricción del transportador 12

Tramos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Factor de Fricción	0.013	0.022	0.016	0.021	0.019	0.022	0.020	0.015	0.015
Tramos	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Factor de Fricción	0.020	0.020	0.017	0.015	0.020	0.020	0.015	0.020	0.015

- Longitud de tramos rectos en los primeros 9 sectores

Tabla. 2.8. Longitud de tramos rectos de los 9 primeros sectores.

Tramos	TR 11	Silos V	Silos H	Losa 2y3	Losa 1	Silo I	Tvm 1 y 2	Tvm 2	Silo D
Longitud en tramos rectos, m	189	35	40	15	5	29	69.60	64.00	37

Tabla. 2.9. Longitud de tramos rectos transportador 12.

Tramos	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Longitud en tramos rectos, m	86	1.2	1.95	2.17	1.2	1.49	1	0.8	1.54
Tramos	10	11	12	13	14	15	16	17	18
Longitud en tramos rectos, m	1.57	0.87	13.5	0.9	1.49	1.06	0.65	0.5	1.1

2.5- Otros datos de interés del ventilador que se requieren para los cálculos

- Ventilador: DH – 26
- Aspiración del humo de rotación derecha e izquierda.
- Caudal: 160 000 m³/h
- Altura de presión: 500 kgf/m².

Motor

- Motor asíncrono
- Potencia: 320 kW
- Velocidad de rotación: 720 r.p.m
- Voltaje: 6000 V.
- Frecuencia: 60 Hz.

Como se aprecia, la instalación objeto de estudio consta con una amplia gama de accesorios y partes componente que determinan el comportamiento de los parámetros de funcionamiento (punto de operación, pérdidas de carga en red y potencia necesaria del ventilador). Los mencionados parámetros se calculan en el capítulo siguiente.

2.6. Conclusiones del capítulo 2

- La instalación de limpieza de gases de la planta de preparación de minerales se encuentra en una etapa avanzada desde el punto de vista de la automatización y control de los parámetros. La misma tiene un sistema CYTEC-SCADA que permite la medición, el control y el registro en computadora de los parámetros de operación más importantes de la referida instalación.
- Quedó establecido el procedimiento para la evaluación del sistema de limpieza de gases de electrofiltros de los silos. El mismo se fundamenta en los métodos de cálculo de longitud equivalente y pérdidas en las diferentes tuberías y accesorios que componen la red.

Capítulo 3

CAPÍTULO 3

ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN ECONÓMICA E IMPACTO AMBIENTAL

3.1- Introducción

El total conocimiento los factores subjetivos que influyen el buen desempeño del proceso productivo, así como la implementación de estrategias para mejorar la cultura energética de directivos y operadores de instalaciones industriales o de servicios y además de que; el diagnóstico es vital en una instalación consumidora de energía; logrando analizar el grado de eficiencia en la utilización de los equipos que componen dicha instalación.

Luego de la aplicación del procedimiento del cálculo descrito anteriormente, se procede al análisis de los resultados.

Por tanto los objetivos de este capítulo son analizar el comportamiento de los parámetros de trabajo de la red con respecto al ventilador instalado.

3.2. Análisis de los resultados

3.2.1. Cálculo de los parámetros principales de la instalación

Al observar detalladamente los valores calculados para la velocidad de la sustancia de trabajo (mezcla de aire y polvo) se aprecia que la misma es elevada, lo anterior determinó que el número de Reynolds fuera, en todos los casos, superior al valor crítico ($Re_{crítico} = 2300$) lo cual determinó, según la literatura consultada (Nekrasov, 1990), la existencia del régimen de transporte turbulento (Tabla 3.1).

Al respecto se puede afirmar que cuando el sistema trabaja bajo estas condiciones se reduce la posibilidad de que ocurra la precipitación de las partículas en suspensión porque para el tamaño considerado ($44\mu m$) la velocidad calculada siempre fue superior a la crítica (2,38 m/s). Estos resultados permiten pronosticar un adecuado funcionamiento de la instalación referido a este criterio.

En el análisis de las pérdidas de presión de los primeros 9 sectores, el transportador (TR 11) tiene el mayor valor (82 mm H₂O), esto se debe fundamentalmente a que es el más largo y contiene 16 accesorios los cuales influyen apreciablemente en el parámetro calculado, lo anterior puede observarse claramente en la expresión 2.7.

Tabla 3.1. Resultados del cálculo en los 9 primeros sectores

Parámetros	TR 11	Silos V	Silos H	Losa 2y3	Losa 1	Ec.
Velocidad, m/s	12.55	12.45	16.26	3.12	3.18	2.1
No. Reynolds	623831	333110	380669	104348	74448	2.3
Longitud equivalente en los tramos, m	372.98	39.18	69.88	8.25	27.71	2.4
Longitud equivalente Total, m	561.98	74.18	109.88	23.25	32.71	2.5
Pérdida de presión Lequiv, mm H ₂ O	82	26	74	0.48	1.08	2.7
Parámetros	Silo I	Tvm 1 y 2	Tvm 2	Silo D	Ec.	
Velocidad, m/s	12.45	6.23	8.65	9.15	2.1	
No. Reynolds	249833	208362	173579	214214	2.3	
Longitud equivalente en los tramos, m	46.01	128.12	37.76	48.64	2.4	
Longitud equivalente Total, m	75.01	197.72	101.76	85.64	2.5	
Pérdida de presión Lequiv, mm H ₂ O	37	21	31	20	2.7	

- Transportador 12

Los resultados mostrados en la Tabla 3.2 contienen diversos elementos que resultan de interés para la presente investigación. En primer lugar se observan variaciones significativas en la velocidad de transporte obtenidas, la cual oscila entre 1,61 y 26,41 m/s en los 18 tramos analizados. Lo anterior puede ser atribuible a las características geométricas y constructivas de las diferentes secciones que componen la tubería.

Sobre este aspecto es bueno destacar que en determinados tramos del sistema investigado (2; 4; 6; 10; 14 y 15) es posible que se produzca la sedimentación de las partículas debido a las bajas velocidades de transportes obtenidas, las cuales son inferiores a la velocidad crítica. Sin embargo, al valorar el régimen de transporte se aprecia que en todos los tramos es turbulento ($Re_{\text{calculado}} > 2300$), aunque el valor difiere sustancialmente entre ellos. Esto hace suponer que las bajas velocidades de alguna manera se compensan con las propiedades termofísicas de las partículas (la densidad, viscosidad aparente) y que existe igualmente una compensación entre las fuerzas viscosas y de sustentación que caracterizan a al criterio adimensional considerado (el número de Reynolds).

Tabla 3.2. Resultados del cálculo para el transportador 12

Parámetros	1	2	3	4	5	6	Ec
Velocidad, m/s	25	2.17	7.43	1.82	5.33	1.61	2.1
No. Reynolds	1009082	43545	198796	48696	89130	43077	2.3
Longitud equivalente en los tramos, m	214.85	14.26	27.71	26.75	18.49	32.12	2.4
Longitud equivalente Total, m	300.85	15.46	29.66	28.92	19.69	33.61	2.5
Pérdida de presión Lequiv, mm cH ₂ O	28	0.309	4	0.29	2.513	0.28	2.7
Parámetros	7	8	9	10	11	12	Ec
Velocidad, m/s	3.79	26.41	14.86	2.17	3.86	4.76	2.1
No. Reynolds	76054	529967	397592	58061	77459	2E+05	2.3
Longitud equivalente en los tramos, m	21.73	28.54	37.91	27.73	21.80	14.81	2.4
Longitud equivalente Total, m	22.73	29.34	39.45	29.30	22.67	28.31	2.5
Pérdida de presión Lequiv, mm cH ₂ O	1.248	60	19	0.41	1.284	1	2.7
Parámetros	13	14	15	16	17	18	Ec
Velocidad, m/s	26.41	2.17	2.17	26.41	3.86	14.86	2.1
No. Reynolds	529967	58061	58061	5E+05	77459	397592	2.3
Longitud equivalente en los tramos, m	28.54	26.56	27.73	28.54	21.80	36.31	2.4
Longitud equivalente Total, m	29.44	28.05	28.79	29.19	22.30	37.41	2.5
Pérdida de presión Lequiv, mm cH ₂ O	60	0.40	0.41	59	1	18	2.7

En el transportador 12 las mayores pérdidas de carga se obtienen en los tramos 8; 13 y 16 con valores iguales a 60; 60 y 59, respectivamente. Lo anterior es congruente con la longitud equivalente total de la sección analizada, por cuanto, su interrelación es directamente proporcional (ver ecuación 2.7). También estos resultados están determinados en buena medida por la cantidad y la tipología de los accesorios con que cuentan estos tramos, los cuales introducen más o menos resistencia en correspondencia con la clasificación de estos (ver anexo 1).

El comportamiento de las pérdidas de carga en la instalación completa (10 sectores) se expone en la figura 3.1. En ella se observan las diferencias ya explicadas anteriormente.

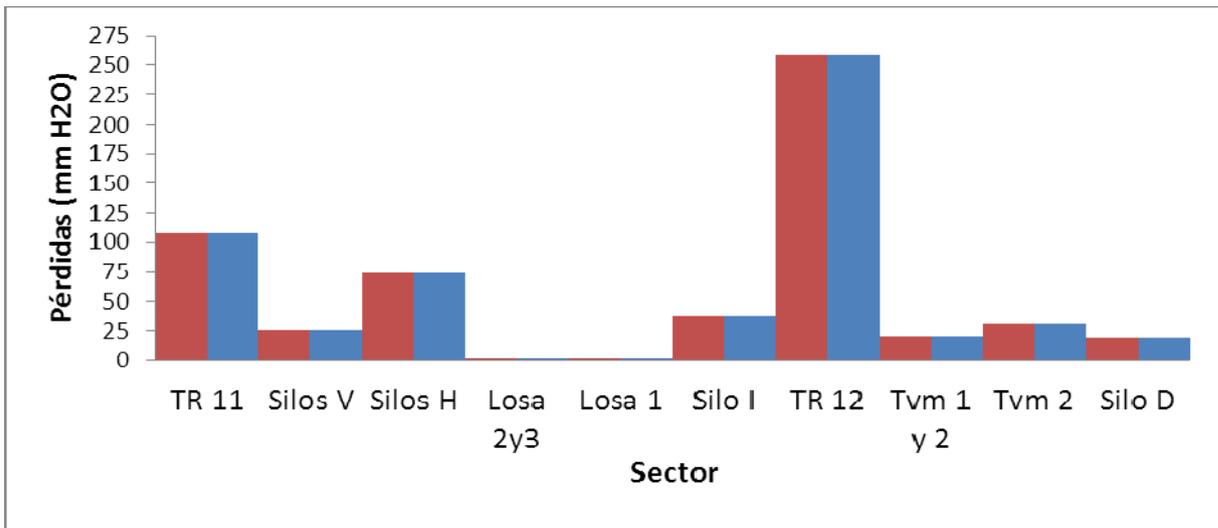


Figura 3.1. Comportamiento de las pérdidas por sectores

3.2.2 Punto de operación del sistema

Ventilador

El punto de trabajo obtenido mediante la intersección de las curvas del ventilador y de la red (ver Figura 3.2) se encuentra en la zona estable de trabajo recomendada por el fabricante.

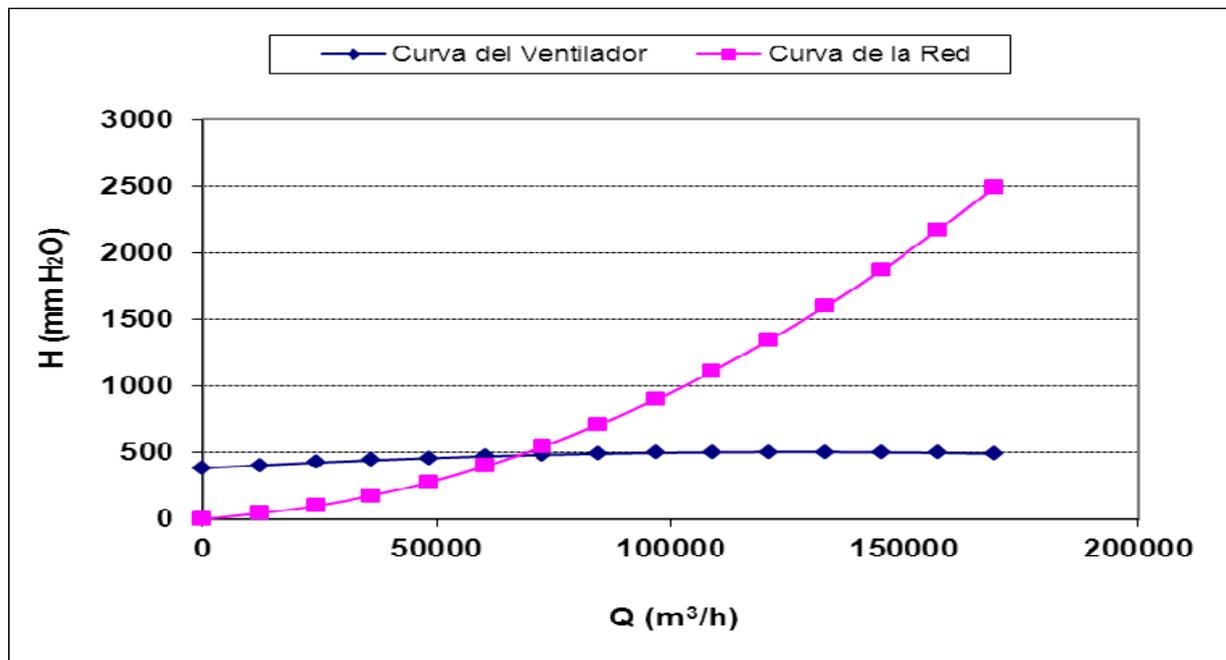


Figura 3.2. Curva de comportamiento de la red y un ventilador.

Para la elaboración de este gráfico (figura 3.2) se tiene en cuenta todas las pérdidas en los diferentes sectores que componen el sistema. En el caso analizado la red tiene 574 mm H₂O de pérdida es superior al punto de trabajo del sistema 496 mm H₂O, por lo que es válido analizar la posibilidad de modificar la red o sustituir el ventilador por uno de mayor capacidad instalada para que pueda vencer todas las resistencias que le impone la red.

El resultado obtenido mediante la aplicación de la metodología de cálculo y los datos reales es correcto y demuestra que el ventilador no desarrolla la carga dinámica total o sea que la presión de impulsión es inferior a la carga total que se introduce por las pérdidas de presión que ocurre en las redes. Lo anterior permite recomendar el cambio de ventilador que por otro que desarrolle mayor presión ya que el ventilador actual trabaja en la condición de sobredimensionado. De los resultados obtenidos en los cálculos y la figura 3.2 se obtiene el punto de operación es 72 000 m³/h; 496 mm H₂O.

3.3 Valoración económica

El análisis desarrollado en este epígrafe está orientado, esencialmente, al consumo de energía eléctrica del ventilador durante su operación. Para ello se considera que el equipo trabaja de forma continua. La potencia instalada del equipo es 320 kW, al considerar el precio actual del kW (0,18 CUC) se obtiene que la empresa debe erogar 57,6 CUC por cada kW-h de operación. Al tener en cuenta el trabajo continuo del equipo el gasto asciende a 504 576 CUC al año.

3.4. Impacto ambiental

3.4.1 Influencia del polvo en el medio ambiente

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, pues es en este medio donde el mismo se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentra el polvo industrial y ruido por solo citar algunos.

Las partículas suspendidas en la atmósfera absorben la luz solar, reduciendo la energía que llega a la tierra y produciendo cambios que disminuyen notablemente la luminosidad y visibilidad; además de la luz solar las partículas en suspensión absorben la luz producida por medios artificiales.

Este fenómeno se encuentra ligado a la concentración. Para una misma concentración las partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetro comprendido entre 0,1 a 1 μm . Entre los efectos que pueden tener sobre los materiales están:

Abrasión: realizadas por aquellas partículas de mayor tamaño y dotadas de elevada velocidad (efecto de pequeña incidencia).

Ataque químico: puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases existentes conjuntamente, tras el efecto de abrasión realizado por las partículas.

Los efectos que produce sobre la vegetación pueden considerarse como muy pequeños y prácticamente inexistentes. Solo pueden cifrarse como peligrosos aquellos que se derivan para zonas muy próximas a puntos de producción de partículas en grandes cantidades. Las partículas solas o en combinación con otros contaminantes representan un peligro notable para la salud.

Sin embargo cuando se habla del organismo humano, la situación se torna aún más preocupante, ya que lo afecta directamente en mayor o menor medida. Los contaminantes penetran en el organismo fundamentalmente por dos vías:

- Inhalación de polvos en el aire por las vías respiratorias.
- Absorción de polvos a través de la piel.

Las partículas entran al cuerpo humano a través del sistema respiratorio y el efecto que se produce depende de su tamaño, la composición química y mineralógica, densidad, superficie específica y otras.

Las partículas de tamaño superior a 5 μm de diámetro quedan retenidas en los bellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapadas por la mucosa que tapiza la tráquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre 0,5 y 5 μm son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí a que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de algunas horas por respiración.

La situación más preocupante corresponde a las partículas menores de 0,5 μm , ya que se ha estimado que más del 50% de las partículas de 0,01 a 0,1 μm que penetran en

los alvéolos se depositan allí, donde es difícil eliminarlos por carecer de cilios y mucosas, pudiendo permanecer durante meses e incluso durante años degradando la salud del hombre.

Las partículas pueden tener efecto tóxico de las maneras siguientes:

- Pueden ser intrínsecamente tóxicas por las características químicas inherentes.
- Pueden interferir con uno o más de los mecanismos que despejan usualmente el aparato respiratorio.
- Puede actuar como un conductor de una sustancia tóxica absorbida en su superficie.

Los polvos se clasifican según la forma de acción biológica sobre el organismo humano en:

Polvos inherentes: son aquellos que no provocan reacción aparente en los depósitos linfáticos pulmonares, pero obstruyen el flujo normal de la linfa.

Polvos tóxicos: ocasionan en uno o varios órganos y sistemas específicos del organismo humano.

Polvos energéticos: son los causantes de afecciones alérgicas, sus efectos dependen en gran medida de la susceptibilidad del individuo.

Polvos fibrógenos: ocasionan fibrosis pulmonar característica de la neumoconiosis.

3.4.2 Influencia del ruido en el medio ambiente

Las emisiones continuas de ruido es uno de los impactos directos que afecta al hombre en su medio laboral. El origen del mismo es el funcionamiento continuo de equipos de grandes dimensiones, que como resultado de su operación emiten determinados niveles de ruido que alcanzan valores muy intensos en algunas zonas de la instalación.

La presencia del ruido es uno de los elementos que más afectan las condiciones de trabajo en el ambiente laboral incidiendo directamente sobre la salud física y mental de los trabajadores y tributa a la aparición de las enfermedades profesionales asociadas a este fenómeno fundamentalmente cuando no se cuenta con los medios de protección individuales.

La afectación directa de este impacto produce lesiones en el oído interno destruyendo las células ciliadas del órgano de corti, dando lugar a la hipoacusia neurosensorial pura de percepción, con la disminución de los niveles de audición tanto por vía ósea como aérea, la cual además es una lesión irreversible y progresiva dependiendo especialmente de la intensidad y el tiempo de exposición.

Estas afectaciones producen efectos indirecto y negativos como el incremento de la presión sanguínea, la aceleración del ritmo cardiaco, la contracción de los capilares de la piel, el incremento del metabolismo, la lentitud de la digestión, las afectaciones al sueño y la disminución en la capacidad de trabajo físico y mental fundamentalmente.

3.4.3 Medidas para la protección del medio ambiente durante el secado del mineral

En la planta de preparación de mineral se expulsa a la atmósfera polvo de mineral proveniente de la limpieza de gases. A la chimenea de 140 m de altura y 6 m de diámetro se descargan los gases provenientes de los secadores, después de pasar por el sistema de purificación mecánico y electrostático (ciclones y electrofiltros). Los gases que se expulsan a la atmósfera contienen CO₂, SO₂, N₂, O₂, y vapor de agua, el contaminante principal es el polvo a razón de 40,55 a 74,4 g/seg. Para eliminar los problemas ambientales se proponen las siguientes medidas:

1. Construcción de transportadores de enlace entre recepción y trituración y la planta de secadero.
2. Techado y reparación de los electrofiltros según proyecto de mantenimiento.
3. Limpieza de los canales de drenaje.
4. Limpieza de la canalización fluvial.
5. Aprovechamiento de los gases calientes de horno a la cámara de combustión (mantenimiento del ducto de gases).
6. Instalación de un nuevo sistema de combustión para el secado de mineral (cámara Voltón).
7. Instalación para la dosificación y mezclado del petróleo en los alimentadores de los molinos.
8. Instalación de tarjetas de control automatizado en los electrofiltros, mejorando la eficiencia de estos.

3.5. Conclusiones del capítulo 3

1. Se desarrolló el análisis de los principales resultados obtenidos en la investigación. El mismo considera la evaluación de la instalación de limpieza de gases en los electrofiltros de los silos, la valoración económica por concepto de consumo de energía eléctrica del ventilador y el impacto ambiental asociado a sistema de transporte.
2. Se comprobó que existen elevados consumos de energía eléctrica en el ventilador y que por tanto la empresa debe erogar grandes cantidades pesos por este concepto. Además se identificó que las fuentes contaminantes más influyentes en la instalación son el polvo y el ruido.

Conclusiones Generales

CONCLUSIONES GENERALES

1. Se evidenció que la mayor parte los valores de velocidad de la sustancia de trabajo (mezcla de aire y polvo), es elevada con valores superiores a la velocidad de transportación crítica la cual es 2.38 m/s. Lo anterior determinó que el número de Reynolds fuera, en todos los casos, superior a 2300 el cual constituye al valor crítico. Este comportamiento determinó la existencia del régimen de transporte turbulento.
2. En el análisis de las pérdidas de presión de los 10 sectores, el transportador 12 (TR 12) tiene el mayor valor 258 mm H₂O, esto se debe fundamentalmente a que es el más largo con una longitud equivalente de 772,4 m y contiene 18 tramos con una gran cantidad de accesorios los cuales influyen apreciablemente en el parámetro calculado.
3. La aplicación del procedimiento de cálculo demostró que el ventilador no desarrolla la carga dinámica total debido a que la presión de impulsión es inferior a la carga total que se introduce por las pérdidas de presión que ocurre en las redes. Lo anterior permite recomendar el cambio de ventilador por otro que desarrolle mayor presión ya que el mismo trabaja en la condición de sobredimensionado. De los resultados obtenidos en los cálculos se obtiene que el punto de operación del sistema es 72 000 m³/h; 496 mm H₂O.
4. Para las condiciones analizadas el ventilador consume 320 kW, al considerar el precio actual del kW se obtiene que la empresa debe erogar 504 576 CUC al año. Por su parte, las principales afectaciones medioambientales encontradas en la instalación son las emanaciones de polvo y las emisiones de ruido, las mismas afectan considerablemente la salud de los trabajadores de la planta.

Recomendaciones



RECOMENDACIONES

1. Considerar los resultados obtenidos en la investigación durante la toma de decisiones relacionada con la instalación de limpieza de gases estudiada.
2. Evaluar el sistema de transporte analizado considerando las propiedades del material en el momento de la evaluación.
3. Utilizar el informe de la tesis como material de consulta en las asignaturas “Mecánica de los fluidos I y II” y “Fenómenos de transporte” que se imparten en la carrera Ingeniería Mecánica.

Referencias Bibliográficas

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alberti (1991). E. Advanced Design of Pneumatic Conveying Systems. Bulk solids handling. 11(1): 103 – 110.
2. Arnold, P.C; P.W. Wipych (1991). The development of pneumatic conveying in. Bulk solids handling. 11(1): 85 – 91, Australia.
3. Aróstegui, J. M. (1978). Metodología del Conocimiento Científico. Editorial de Ciencias Sociales, La Habana, Cuba.
4. Bradley, M. (1990). Pressure losses caused by bends in pneumatic conveying pipelines. Powder handling processing. 2(4). USA.
5. CEPRONI (1995). Determinación de las velocidades en los ductos de las baterías de ciclones B1-3, B1-4, B1. Centro de Proyecto del Níquel. Moa. Holguín.
6. Crawley, M; J. Bell (2002). The application of life cycle cost analysis to pneumatic conveying systems. <http://www.macawber.com>. July.
7. Darren, T. (2000). Pneumatic conveying, basic design and component options. <http://www.Powderandbulk.com>. July.
8. Dinulescu, H. A.; Eckert, E.R.G.(1985). Analysis of the one dimensional moisture migration caused temperature gradients in porous medium. Int. J. Heat Mass Transfer. 28 (9): 1069 – 1077.
9. Dynamic Air (2002). Sistemas de transporte neumático en fase densa. <http://www.dinamicair.com>. July.
10. Farnish R. (2002). Wear in lean – phase pneumatic conveying pipelines. <http://www.powderanbulk.com>. September.
11. Fitzgerald S. A (1996). Pneumatic conveying powder delivery system for continuously heterogeneous material deposition in solid freeform fabrication. Thesis of Master. Faculty of the Virginia Polytechnic Institute and State University. 140p.
12. Gordón, G. M (1981). Captación de polvos y purificación de gases en la metalurgia de metales no ferrosos. Editorial MIR, 391pp. Moscú.



13. Guzmán D. (2001). Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniaca. Tesis doctoral. ISMM, Moa, Cuba. 124p
14. Hayes, J; A. R. Reed; M. S. Bradley (1993). Economics of pneumatic conveying systems. Powder handling processing. 5(1): 1 – 5.
15. Hettiaratchi, K; S. Woodhead (1998). Comparison between pressure drop in horizontal and vertical pneumatic conveying pipelines. Powder technology, 95: 67 – 73. USA
16. Hurtado, F. G. (1999). Estudio de la Influencia en el Medio Ambiente del Sistema de Generación de la Empresa del Níquel Ernesto Che Guevara y el Sistema de Transmisión Eléctrico Adyacente. Tesis doctoral. ISMM, Moa. 120p.
17. Kallel, F.; et al (1993). Effects of moisture on temperature during drying of consolidated porous materials. J. Heat Transfer, ASME Trans. 115: 724 – 733.
18. Lampinen, M. (1991). Calculation Methods for Determining the pressure Loss of Twophase Pipe Flow and Ejectors in Pneumatic Conveying Systems. Acta polytechnica scandinavica. Mechanical Engineering series No 99.
19. Mason, D; P.(1998). Marjanovic; A. Levy. A simulation system for pneumatic conveying systems. Powder Technology. 95 (1): 7 – 14.
20. Massoudi M; K. R. Rajagopal; T. X. Phuoc (1999). On the fully developed flow of a dense particulate mixture in a pipe. Powder technology. 104 (1): 258 – 268.
21. Méndez E, Toro F. (2003). Manual de usuario proyecto CITRIX planta preparación de mineral (<http://www.ecg.moa.minbas.cu/CheNet/>) Moa. Holguín.
22. Mesarovich, M. (1996). Fundamentación de la Teoría General de los Sistemas. Editorial MIR. URSS, pp. 422-436.
23. Miranda, J. L. (1996). Comparación y conjugación de métodos de determinación de humedad en la Industria del Níquel. Minería y Geología. Moa. 13 (2): 42 – 47.
24. Neidigh S. (2002). Introduction to the theoretical and practical principles of pneumatic conveying. <http://www.porttechnology.org/journals/ed12/pdfs/pt12-235.pdf>. November.



25. Pacheco Berlot, P. (1984). Ecuaciones para el diseño de instalaciones a transporte neumático por tuberías verticales de materiales polvorientos, granulados, polimorfos y poli dispersos. Tesis doctoral. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. 120p.
26. Pan, R; P. Wypych (1997). Scale – up procedures for pneumatic conveying design. Powder handling processing. 4(2): 167 – 172.
27. Paul, S. (1999). What is Dense Phase Conveying. <http://www.powderandbulk.com>. March.
28. Reed, R; Bradley, M.(1991). Advances in the Design of Pneumatic Conveying Systems. Bulk solids handling. 11(1): 93 – 98.
29. Rodes, M. (2001). Pneumatic Transport of Powders. <http://www.erpt.org>. Octubre.
30. Serrano L. (2008). Tecnología de depuración de partículas. Universidad de Cádiz, Sevilla, España
31. Singer T. (2002). You too, can select a pneumatic conveying system. <http://www.powderanbulk.com>. September.
32. Torres, E. (1999). Investigación del transporte neumático de partículas en los gases durante el secado del mineral laterítico en tambores cilíndricos rotatorios. Tesis de Maestría. Facultad de Metalurgia y Electromecánica, ISMM, Moa, Holguín. 87p
33. Torres, E. (2002). Características físicas y aerodinámicas del mineral laterítico utilizado en los sistemas de transporte neumático de la industria del níquel. Memorias de la tercera conferencia internacional CINAREM 2002. Moa, Holguín.
34. Weber, M. (1991). Friction of the Air and the Air/Solid Mixture in Pneumatic Conveying. Bulk solids handling. 11(1): 99 – 102.
35. Whitaker, S. (1977). Simultaneous heat, mass and momentum transfer and theory of drying. Adv. Heat Transfer. 13: 119 – 203.
36. Wypych, P; P. Arnold (1989). Plug – Phase Pneumatic Transportation of Bulk Solids and the importance of Blow Tank Air injection. Powder handling processing. 1(3): 271 – 275.

Anexos

ANEXO 1. HOJA DE CÁLCULO REALIZADA EN EL EXCEL PARA LA EVALUACIÓN DE LOS PRIMEROS 9 SECTORES DE LA INSTALACIÓN

Información de la tubería		Aspiración																
Datos	#	TR 11	#	Silos V	#	Silos H	#	Losa 2y3	#	Losa 1	#	Silo I	#	Tvm 1 y 2	#	Tvm 2	#	Silo D
Flujo, m ³ /h		25620		5629		5629		2199		1099		3166		4398		2199		3166
Densidad, kg/m ³		1.15		1.15		1.15		1.15		1.15		1.15		1.15		1.15		1.15
Viscosidad Cinemática, m ² /s		2E-05		1E-05		1E-05		1.5E-05		1.5E-05		1E-05		1.5E-05		1E-05		1E-05
Diámetro interior, m		0.85		0.4		0.35		0.5		0.35		0.3		0.5		0.3		0.35
Cálculo	#	1	#	2	#	3	#	4	#	5	#	6	#	8	#	9	#	10
Velocidad, m/s		12.55		12.45		16.26		3.12		3.18		12.45		6.23		8.65		9.15
No. Reynolds		623831		333110		380669		104348		74448		249833		208362		173579		214214
Factor de Fricción		0.013		0.015		0.015		0.018		0.020		0.016		0.016		0.017		0.016
Factor de Resistencia, (n)	#	1	#	2	#	3	#	4	#	5	#	6	#	8	#	9	#	10
Tubería de entrada	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Compuerta	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Globo	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Cheque	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula Bola	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de Mariposa	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.35	0	0	0	0	0	0	0	0
Válvula de macho	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Unión en Y recto	1	0.44	0	0	1	0.44	0	0	0	0	1	0.44	1	0.44	0	0	2	0.88
Unión en Y tipo codo	1	0.35	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Campana	0	0	1	0.35	1	0.35	0	0	0	0	0	0	2	0.7	1	0.35	0	0
Reducido	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Ensanchamiento	0	0	1	0.25	1	0.25	0	0	0	0	1	0.25	1	0.25	0	0	1	0.25
Unión en Te	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo Continuo	0	0	3	0.9	3	0.9	1	0.3	3	0.9	6	1.8	8	2.4	6	1.8	2	0.6
Codo Obtuso	0	0	0	0	2	1.1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.55
Codo de 4 secciones de 90°	5	1.75	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	1	0.35	0	0	0	0
Codo de 3 secciones de 90°	2	0.94	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 4 secciones 45°	2	0.5	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Codo de 3 secciones 45°	6	1.92	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Tubería de salida	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Factor de Resistencia Total, (nt)		5.9		1.5		3.04		0.3		1.25		2.49		4.14		2.15		2.28
Longitud en tramos rectos, m		378		35		40		15		5		29		69.60		64.00		37

Longitud equivalente en los tramos, m	385.77	40.00	70.93	8.33	21.88	46.69	129.38	37.94	49.88
Longitud equivalente Total, m	763.77	75.00	110.93	23.33	26.88	75.69	198.98	101.94	86.88
Pérdida de presión Lequiv, mm cH₂O	108	26	74	0.48	0.91	37	20	31	19
Método K equivalente	2	10	30	1	10	47	10	68	25
Pérdidas Totales por cálculo de flujo	574								
Flujo Total Cálculado	120331								
Pérdidas por medición de flujo	837								

ANEXO 2. DIAGRAMA DE MOODY

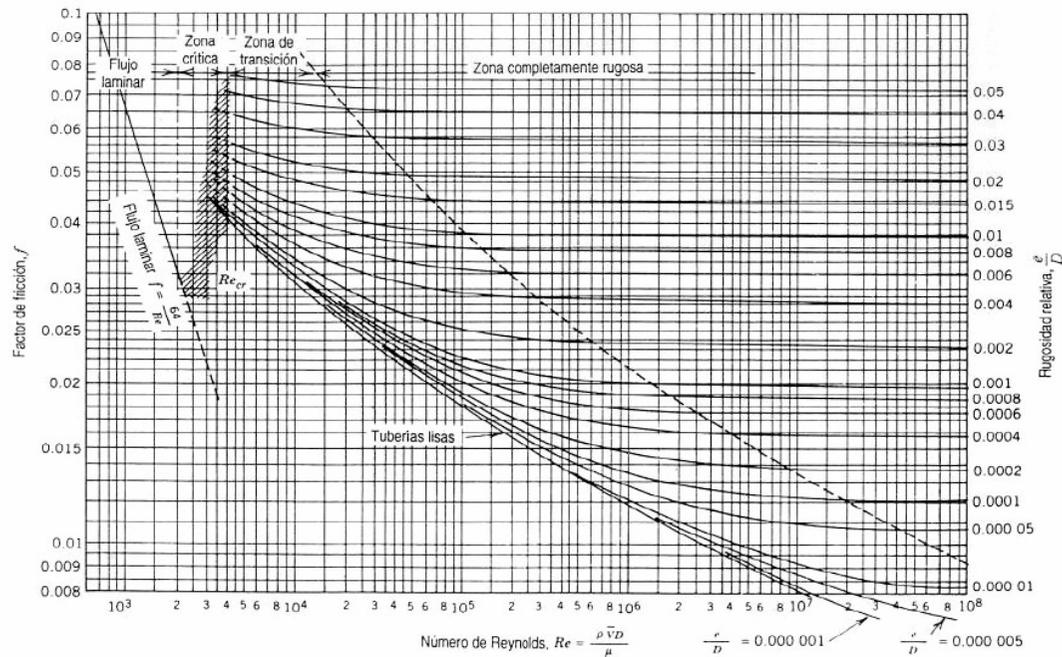


Fig. 8.14 Factor de fricción para flujo completamente desarrollado en tuberías circulares. (Datos de [6], empleados con autorización.)

En este método se obtiene el factor de rugosidad absoluta en la tabla 1, luego se determina la relación rugosidad absoluta/diámetro (ϵ/d) y con este resultado y el Reynolds entro al diagrama de Moody y obtengo el factor de fricción.

Type of pipe (new, clean,condition)	Absolute Roughness ϵ (mm)
Drawn tubing- glass, brass, plastic	0,001524
commercial steel or wrought iron	0,04572
cast iron - asphalt dipped	0,12192
galvanized iron	0,1524
cast iron - uncoated	0,25908
wood stave	0.18288 - 0.9144
concrete	0.3048 - 3.408
riveted steel	0.9144 - 9.144