



REPÚBLICA DE CUBA  
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR

INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO DE MOA  
"Dr. Antonio Núñez Jiménez"  
DEPARTAMENTO CONTABILIDAD Y FINANZAS

# Trabajo de Diploma

*En opción al Título de  
Ingeniero Mecánico*

*Título: Evaluación del proceso de limpieza de gases  
de la Unidad Básica de Horno de Reducción  
en la empresa "Comandante Ernesto Che  
Guevara"*

*Autor: Fernando Leyva Jiménez*

*Tutores: Dr.C. Enrique Torres Tamayo  
Ing. Orlando Vega Arias*

*Moa – 2012  
"Año 54 de la Revolución"*

Declaración de

Autoridad

**DECLARACIÓN DE AUTORIDAD**

Yo: **Fernando Leyva Jiménez**, autor de este trabajo de diploma y los tutores Dr.C Enrique Torres Tamayo, Ing. Orlando Vega Arias, declaramos la propiedad intelectual de este al servicio del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa para que disponga de su uso cuando estime conveniente.

---

Fernando Leyva Jiménez

---

Dr.C. Enrique Torres Tamayo

---

Ing. Orlando Vega Arias

A decorative border in a dark teal color, consisting of two parallel lines with ornate, leaf-like flourishes at the corners and midpoints.

# Persamierito

## PENSAMIENTO

El saber no se obtiene por azar. Hay que buscarlo con afán y alimentarlo con diligencia.

**Abigail Adams.**

La perfección no existe. Pero si la buscáramos, alcanzaríamos la excelencia.

**Vince Lombarda.**

No pretendamos que las cosas cambien, si siempre hacemos lo mismo. La crisis es la mejor bendición que puede sucederle a personas y países, porque la crisis trae progresos. Es en la crisis que nace la inventiva, los descubrimientos y las grandes estrategias. Quien supera la crisis se supera a sí mismo sin quedar superado.

**Albert Einstein.**

A decorative border in a dark teal color frames the page. It consists of two parallel lines with ornate, leaf-like flourishes at the corners and midpoints.

# Agradecimientos

**AGRADECIMIENTOS**

La posibilidad de concluir este trabajo de diploma estuvo sustentada en la ayuda y colaboración de varias personas, el trabajo fue arduo y largo el camino transitado. Es por ello que dejo constancia de mi especial agradecimiento:

A mis tutores: el Dr.C. Enrique Torres Tamayo, por su apoyo y cooperación para la realización de este trabajo, porque en el momento preciso dio lo mejor de sí para que este día fuera posible, por su voluntad, orientación y dedicación absoluta durante el desarrollo de la investigación; al Ing. Orlando Vega Arias, por sus incontables ayudas en la realización de este trabajo.

A mi esposa: por el apoyo que me ha brindado, por la confianza que siempre depositó en mí, por sus esfuerzos realizados para que pudiera terminar este sueño que hoy es una hermosa realidad, por su cariño, amor y comprensión que nunca me han fallado y ellos junto a su presencia física han sido y serán por siempre de inspiración para el logro de mis aspiraciones futuras.

A los profesores del departamento de mecánica por contribuir de forma desinteresada a mi formación como ingeniero mecánico. Al profesor Tomas, que sin su ayuda y entrega hubiese sido imposible alcanzar esta meta.

A mis compañeros: Orleydis Pis, Ernesto Riera y Yoander Matos y a todos los que siempre estuvieron a mi lado brindándome su mano amiga sin reparo alguno.

A los nombrados y demás personas que verdaderamente consideran merecer este sincero agradecimiento, y no he nombrado.

**A todos “Muchas Gracias”**

El autor

A decorative border in a dark teal color, consisting of two parallel lines. The corners are adorned with ornate, symmetrical flourishes that resemble stylized leaves or scrolls.

# Dedicatória



**DEDICATORIA**

Cuando el culminar una meta deseada impone momentos de especial alegría, cuando se quiere resumir, los momentos de duda, dolor, nostalgia, se deben tener presente aquellas personas que por su dedicación y amor contribuyeron a la realidad que representa llegar hasta el final, en especial dedico este logro personal:

A: Francisca Paumier Labañino (mi abuela) por el amor que le profesó y por su constante lucha ante las dificultades que a veces me hacían dudar en la posibilidad del triunfo, a ella le debo lo que soy y lo que pueda ser mientras viva.

A: Marilín Jiménez (mi madre) por su orientación en todo momento, por su apoyo y por su cariño. A ella que siempre estuvo presente en los tiempos de dificultad y a la cual nunca defraudare.

A: mis hijos (Favian y Damián) por ser parte de mi vida, para que en el futuro les sirva de ejemplo.

A: mis hermanos (Yunier y Aritzaida) por lo que representan en mi vida, por sus fuentes de constante inspiración en mi quehacer personal y por apoyarme siempre en los momentos decisivos de mi carrera.

A mis tíos, por su constante preocupación por mis estudios y su consideración.

A todos los profesores que dedicaron parte de su apreciado tiempo a mi educación y que verdaderamente ven en mí el fruto de su arduo trabajo.

A mis amistades y colegas que me apoyaron en cualquiera de las formas posibles y a todos aquellos que de manera muy sencilla me ayudaron.

**A todos “les dedico este éxito”**

El autor

A decorative border in a dark teal color, consisting of two parallel lines. The corners are embellished with intricate, symmetrical scrollwork and floral motifs.

# Resumen

**RESUMEN**

El presente trabajo de diploma tiene como objetivo fundamental evaluar el funcionamiento de los equipos existentes en los Sistemas de Limpieza de Gases de la Planta de Hornos de Reducción de la Empresa Cdte. Ernesto Ché Guevara para evitar las emanaciones de polvo al medio ambiente y las pérdidas de mineral por este concepto.

Para ello se realizó un muestreo del mineral de entrada, salida, y el recolectado en los sistemas de limpieza de gases con el propósito de determinar su composición granulométrica. Con este estudio granulométrico se logró determinar de forma práctica los posibles arrastres hacia los sistemas de limpieza de gases y aplicando la ley de Stockes se corroboraron los obtenidos prácticamente. También, se analizaron desde el punto de vista aerodinámico las redes de distribución de gases, y se comprobó la capacidad de transportación del polvo recolectado en los sistemas de limpieza de gases de la Sección de Horno de Reducción, se comprobaron las potencias de los ventiladores de cada sistema, el tiro de la chimenea y el comportamiento de las baterías de ciclones de cada sección para las producciones actuales. Por último se muestra un estudio con datos empíricos acerca del impacto ambiental de la planta.

Con la elaboración del presente trabajo se concluyó que: de los equipos de limpieza de gases existentes en la Planta de Hornos de Reducción de la Empresa Cdte. Ernesto Ché Guevara los ventiladores, y los conductos, las baterías de ciclones, los electrofiltros y la chimenea pueden soportar la productividad de la empresa de 31000 toneladas al año de Ni+Co.

A decorative border in a dark teal color, consisting of two parallel lines. The corners are embellished with intricate, symmetrical scrollwork and floral motifs.

# Summary

## **SUMMARY**

This diploma paper main objective is to assess the current equipment operation at Commander Ernesto Ché Guevara Nickel Processing Company's Reduction furnace Gas Cleaning System in order to prevent dust emission to the environment as well as ore losses for this reason.

For this aim a sampling of inlet, outlet and ore collected in the gas cleaning system was performed, intended to determine the ore particle size. This particle size study allowed to determine in practical manner the possible ore carry over toward the gas cleaning systems and by applying Stokes' s Law, the data obtained were practically confirmed. Also, the gas distribution networks were examined aerodynamically, and the ore collected at the reduction furnace section dust conveying capacity was proved. Also each system fan powers, the stack gas flow and the operation of the cyclone batteries of each section, for present production were tested. Finally, an empirical data research on the plant environmental impact is shown.

This paper submission allows us to conclude that : from the existing gas cleaning equipment at commander Ernesto Che Guevara Ore Reduction furnace Plant, to the fans and the ducts, the cyclone battery, the electrofilters and the stack, they may assume the company production of 31 000 tones of Ni + Co per year.

A decorative border in a dark teal color, consisting of two parallel lines. The corners are embellished with ornate, symmetrical scrollwork designs.

# Index

**ÍNDICE**

INTRODUCCIÓN .....	1
CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO .....	4
1.1. Introducción.....	4
1.2. Antecedente y estado actual de las teorías relacionadas con el proceso de limpieza de gases.....	4
1.3. Captadores de polvos en los procesos de limpieza de gases. ....	9
1.3.1. Captadores de polvos por la acción de la fuerza de inercia. ....	10
1.3.2. Captadores de polvo por acción de la fuerza centrífuga .....	11
1.3.3. Captadores de polvo por acción del campo eléctrico. ....	15
1.4. Descripción del flujo tecnológico de la UBP Horno de Reducción.....	18
1.4.1. Estado actual del proceso de limpieza de gases en la UEP Horno de Reducción. ....	20
1.4.2. El Proceso de Reducción en la UEP Horno de Reducción.....	20
1.4.3. Factores que Influyen en la Operación del Horno. ....	22
1.4.4. Ventajas y Desventajas de los Hornos de Hogares Múltiples. ....	25
1.5. Conclusiones del capítulo.....	25
CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE GASES EN LA UBP HORNOS DE REDUCCIÓN .....	26
2.1. Introducción.....	26
2.2. Determinación de la composición y granulometría del mineral de entrada y salida, y recolectado en los Sistemas de Limpieza de Gases. ....	26
2.2.1. Cálculo de la densidad real de los gases a la salida del Horno.....	27
2.3. Cálculo del diámetro de las partículas de polvo que son arrastradas hacia los sistemas de limpieza de gases. ....	30
2.4. Análisis Hidrodinámico de las redes de distribución de los gases.....	31
2.5. Cálculo de la capacidad de los transportadores K11C-300 y K11C-320.....	41
2.6. Conclusiones del capítulo.....	45
CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS E IMPACTO AMBIENTAL .....	47
3.1. Introducción.....	47
3.2. Datos que se utilizaron en el capítulo 2 para la realización de los cálculos.....	47

3.3. Valoración económica .....	48
3.4. Impacto ambiental. ....	51
3.5. Impacto en el hombre. ....	52
3.6. Conclusiones. ....	57
CONCLUSIONES.....	58
RECOMENDACIONES .....	59
BIBLIOGRAFÍA .....	60
ANEXOS	



A decorative border in a dark teal color, consisting of two parallel lines. The corners are embellished with intricate, symmetrical scrollwork and floral motifs.

# Introducción

## **INTRODUCCIÓN**

La necesidad de proteger el medio ambiente implica la aplicación de procedimientos, cada vez más eficaces, para el tratamiento de efluentes de todo tipo generados por las distintas actividades humanas.

Las Industrias Metalúrgicas de Metales no Ferrosos son unas de las mayores contaminantes del medio ambiente, ya que casi todas las etapas de los procesos de producción de metales van acompañadas de la formación de polvos que salen con los gases tecnológicos y de ventilación. Junto con estos gases salen en forma de impurezas los óxidos de azufre (anhídrido sulfúrico y sulfuroso), cloruro de hidrógeno, cloro, flúor, y algunos otros componentes de la materia prima.

Para 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.

En el municipio de Moa unos de los principales problemas medioambientales que afectan a la población es la gran cantidad de gases con polvo que son lanzados a la atmósfera por las empresas niquelíferas existentes en la localidad proveniente de los sistemas de limpieza de gases y transportes de sólido en suspensión realizado de forma ineficiente. Una de las empresas que más afecta a la población en este sentido es la Empresa "Comandante Ernesto Che Guevara" por la gran cantidad de gases que en ella se generan durante el proceso de extracción del níquel.

Para reducir las grandes cantidades de gases con polvo que son lanzadas a la atmósfera por esta empresa, la misma cuenta con un Sistema de Limpieza de Gases

(SLG) en algunas de sus plantas. En unas plantas más que en otras las cantidades de gases generadas varían en concentración, en dependencia del proceso metalúrgico que en ellas se desarrolle. Con el objetivo de aumentar la eficiencia en los sistemas de Limpieza de Gases centramos nuestro estudio en la Planta de Horno de Reducción.

Teniendo en cuenta los aspectos antes mencionados se considera como situación problemática lo siguiente:

**Situación problemática:** Existencia de altas emanaciones de polvo de mineral en el Sistema de Limpieza de Gases de la Planta Horno de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

A partir de la situación problemática planteada, el problema científico se define de la forma siguiente:

**Problema científico:** El insuficiente conocimiento de la influencia de los principales parámetros operacionales y funcionamientos de los equipos en el Sistema de Limpieza de Gases que impide mantener un Medio Ambiente limpio.

**Objeto de investigación:** El proceso de Limpieza de Gases en la Planta de Hornos de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

**Hipótesis científica:** A partir de una correcta selección, montaje, y operación de los Sistemas de Limpieza de Gases de la Planta de Horno de Reducción, pese al incremento de la productividad de la Empresa Cdte. “Ernesto Che Guevara”, es posible obtener un aumento en la eficiencia de los (SLG), disminuyendo así las concentraciones de gases con polvo que se emanan a la atmósfera, el efecto nocivo de estos gases sobre la población, el consumo de energía y los gastos por reparación y mantenimiento de los (SLG).

**Objetivo general del trabajo:** Comprobar el funcionamiento de los equipos existentes en los Sistemas de Limpieza de Gases de la Planta Horno de Reducción de la Empresa Ernesto Ché Guevara.

Para dar solución al objetivo general se definen los siguientes **objetivos específicos:**

1. Caracterizar los Sistemas de Limpieza de Gases.

2. Determinar los parámetros de operación normal en la planta de hornos de reducción.
3. Valorar los efectos económico y medioambiental.

Para lograr el cumplimiento del objetivo propuesto, se plantean las siguientes:

**Tareas del trabajo:**

1. Búsqueda de información sobre (Limpieza de gases, Mecánica de los fluidos, y movimiento de partículas en una corriente de gas).
2. Muestreo del mineral de entrada, salida, y el recolectado en los Sistemas de limpieza de Gases para determinar su composición y granulometría.
3. Determinar los arrastres hacia los Sistemas de Limpieza de Gases aplicando la ley de Stockes.
4. Análisis de las redes de distribución de gases desde el punto de vista Hidrodinámico.
5. Comprobar la capacidad de transporte del polvo recolectado en los Sistemas de limpieza de Gases.

A decorative border in a dark teal color, consisting of two parallel lines. The corners are adorned with ornate, symmetrical flourishes that resemble stylized leaves or scrolls.

# Capítulo - I

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO

### 1.1. Introducción

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 a la cual es necesario dar respuesta inmediata por la necesidad de proteger el medio ambiente, los recursos naturales y la salud de la población.

En el presente capítulo se abordan los elementos teóricos fundamentales de la captación de partículas y las particularidades del proceso de limpieza de gases en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

**El objetivo** es establecer los fundamentos teóricos necesarios para la evaluación del proceso de limpieza de gases, a partir de la sistematización de los conocimientos científico-técnicos establecidos en los trabajos precedentes.

### 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.

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; Farnish, 2002; Singer, 2002) 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.

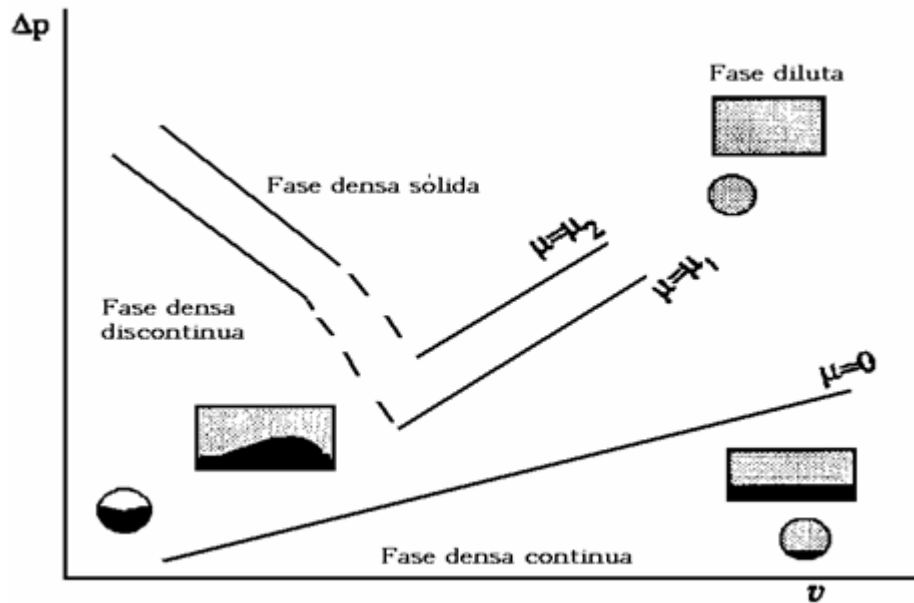


Figura 1.1. Distintas fases en el transporte neumático de materiales

Fuente: M. Rodes, 2001.

Se resalta en el trabajo el punto de tránsito entre las fases fluida y densa, el que depende de las características del material transportado, la configuración y parámetros del sistema; se describe la fase densa como la condición donde los sólidos son transportados de forma que no están suspensos totalmente en el gas, un aspecto de gran interés en el desarrollo de la presente investigación.

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 Wypych (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.

Torres: (2002), estudia las características geológicas para el transporte de fluidos bifásicos utilizando la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” como referencia, en el (2000), estudia el comportamiento del transporte neumático en secaderos rotatorios, (2001), realiza el estudio de la humedad de equilibrio y coeficiente de transferencia de masa para el secado y transporte neumático del mineral laterítico, (1999), estudios de el transporte neumático de partículas en los gases durante el secado del mineral laterítico en tambores cilíndricos rotatorios. (2000), estudio realizado a sobre el transporte de partículas en flujos de gases para el incremento de la eficiencia del proceso.

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.

Es significativo subrayar el estudio experimental del comportamiento en fase fluida de la velocidad de la partícula y el perfil de concentración con el empleo de técnicas de imágenes fotográficas en tuberías horizontales (Hui y Tomita, 2000). Otro es el de Huttli et al (2002) donde hacen un análisis de la trayectoria de las partículas por medio de la simulación directa; estos métodos también son utilizados por Yamamoto et al (1998); Tanaka y Yamamoto (1999); Miyoshi et al (1999), entre otros. Un razonamiento diferente elaboran Raheman y Jindal (1993), determinan la velocidad de deslizamiento que es la diferencia existente entre la velocidad del gas y la velocidad del material en el transporte de fluidos bifásicos gas - sólido.

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.

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.

Páez (1995) en su publicación aborda las principales características de las máquinas de flujo, desarrollando así la teoría de diferentes equipos que entregan energía al fluido, los cuales tienen una amplia aplicación en diferentes industrias de producción.

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.

De todo lo expresado resulta evidente que la consulta bibliográfica hasta el momento no da respuesta a la problemática en estudio. En su mayoría aborda elementos aislados del proceso de limpieza de gases el cual se encuentra poco estudiado desde los puntos de vista aquí tratados. Esto impone la necesidad de realizar una investigación que contribuya a una mayor eficiencia del proceso de limpieza de gases, lo cual representará una incursión novedosa en este campo para las industrias cubanas del níquel con tecnología carbonato amoniacal.

### **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 de la fuerza centrífuga.

- ✓ Captadores de polvos por acción del campo eléctrico.
- ✓ Captadores de polvo por vía húmeda.

### **Captadores de polvos por la acción de la fuerza de inercia:**

Los más difundidos son los siguientes:

1. Sacos de polvo.
2. Captadores de polvo reflectivos de inercia.
3. Captadores de polvo de celosías.

### **Captadores de polvo por acción de la fuerza centrífuga:**

1. Ciclones ordinarios.
2. Ciclones tipo batería.

### **Captadores de polvo por acción del campo eléctrico:**

1. Electrofiltros.

### **Captadores de polvo por vía húmeda:**

1. Lavadoras de gas.
2. Lavadoras de gas con empaques.
3. Lavadoras de gas de otras construcciones.
4. Recogegotas.
5. Ciclones por vía húmeda.
6. Captadores de polvos rápidos (turbulentos).
7. Captadores de polvo de barbotaje y de espuma.

#### **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.

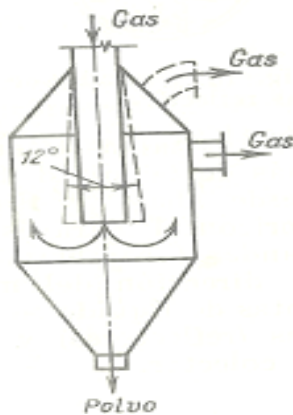


Figura 1.2. Captador de polvo por inercia tipo saco de polvo

Fuente (Gordoón G.M, Peisájov, MOSCÚ)

### 1.3.2. 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 afirma 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 fuerzas centrífugas gracias a las cuales las partículas de polvo suspendidas en la corrientes de gas rotatorios se empujan hacia las paredes del cuerpo del ciclón tanto de su parte cilíndrica, como cónica. Al acercarse el 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 evacuan del ciclón por un tubuladura 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 1.3 que refleja un ciclón tipo batería.

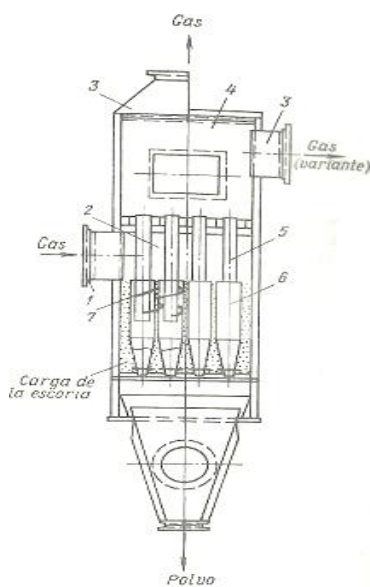


Figura 1.3 ciclón tipo batería

Fuente (Gordoón G.M, Peisájov, MOSCÚ)

**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  $1000^{\circ}\text{C}$  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  $230\text{ g/m}^3$ , o  $100\text{g/ft}^3$ ), 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  $\zeta$  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  $\varnothing$  (mm): 200, 300, 400, 500, 600, 700, 800, 900, 1000, 1200, 1400, 1600, 1800, 2000. Para los TsN-24 se agregan 2400 y 3000.

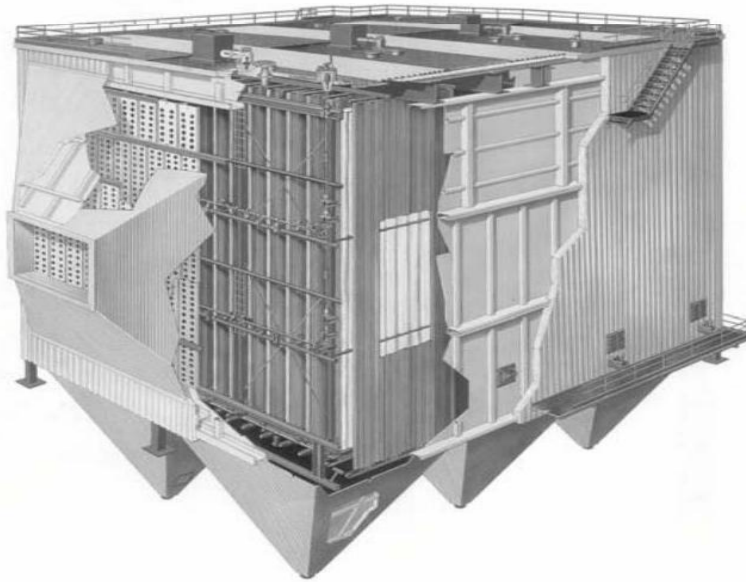
El tipo básico de ciclones NIOGAZ es el TsN-15, con este tipo de ciclones se garantiza el mayor grado de captación de polvo con el menor coeficiente de resistencia hidráulica. Los ciclones NIOGAZ TsN-24 se recomiendan para bajas exigencias en cuanto al grado de purificación (para purificación preliminar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

Los ciclones NIOGAZ del tipo TsN-11 son los existentes en la Planta de Hornos de Reducción, estos tienen un diámetro interior  $\varnothing = 800$  mm.

### 1.3.3. Captadores de polvo por acción del campo eléctrico

Principio de funcionamiento de los captadores de polvo específicamente **Electrofiltros**: 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.

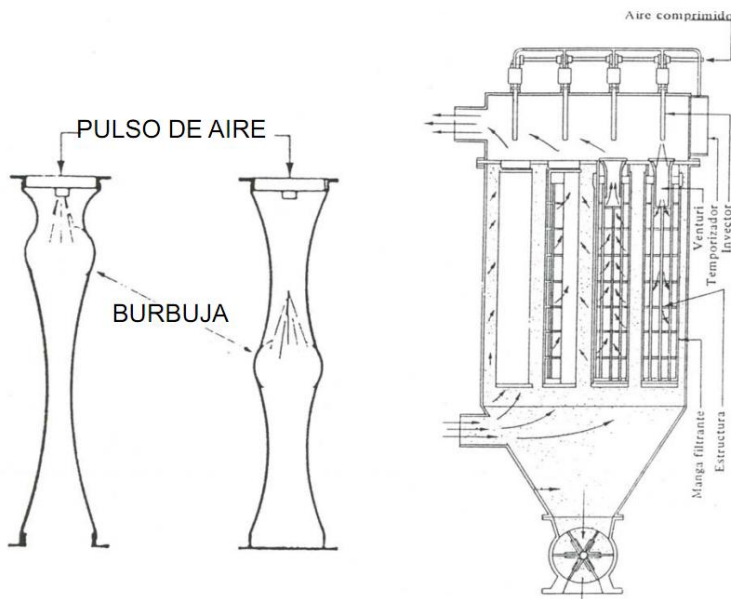
**Los electrofiltros** son equipos encargados de captar el polvo de los gases que se derivan del proceso tecnológico, por acción del campo eléctrico. El proceso de separación del polvo se produce cargando negativamente las partículas en suspensión en el fluido gaseoso, que son atraídas por un electrodo 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. En la figura 1.4 se muestra un ejemplo de un electrofiltro precipitador de placas



**Figura 1.4. Electrofiltro precipitador de placas**

**Fuente (Algeciras, 2008)**

Empleado en el mundo en industrias que se realiza la depuración de partículas y en la figura 1.5 se hace alusión a un ejemplo de un filtro de manga que se utiliza en los sistemas de limpieza de gases por pulso.



**Figura 1.5. Filtro de mangas por pulso**

**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.

#### **1.4. Descripción del flujo tecnológico de la UBP Horno de Reducción**

El objetivo del proceso que se realiza en este taller es reducir el óxido de níquel a níquel metálico, haciéndolo apto para la lixiviación amoniacal. Para ello el taller cuenta con la instalación de 24 hornos, 12 transportadores rotatorios e igual número de enfriadores.

El mineral antes de ser sometido a proceso de reducción se somete a un proceso de secado y molienda en la planta de preparación del mineral. En esta planta al mineral se le elimina la humedad hasta un 4 % aproximadamente y se muele hasta una fineza de 0,074 mm. También en los transportadores de banda se alimenta alrededor de 2,9 %

de petróleo tecnológico, por lo que se logra una homogeneización bastante completa con la desventaja de una pérdida de combustible en el trayecto hasta su alimentación.

El mineral, después de pasar por la sección de molienda, es enviado mediante transporte neumático a los silos (225 – SI) como forma de almacenaje, los cuales tienen una capacidad de 1500 ton cada uno, lo que facilita una operación en los hornos de unas 16 horas. En la sección de los silos se encuentran 9 bombas tipo TA-36 (225- BO) de una capacidad de 120 t/h, mediante las cuales el mineral es bombeado hasta las tolvas de los hornos (225 TV) que son 12 en total, dispuestas una para cada dos hornos. Estas tolvas permiten realizar una operación de 8 horas a cada horno.

Una vez el mineral en las tolvas, este pasa a los dosificadores de pasaje automático (225 – BA – 201) que son los equipos encargados de garantizar una alimentación uniforme al horno a través del pasaje que este realiza de acuerdo al tonelaje fijado, estos equipos tiene una capacidad hasta 22 t/h.

Después que el mineral es pesado, se produce la descarga del mismo al sinfín alimentador (225-TR-202) el cual transporta el mineral al horno hacia el hogar cero.

El mineral una vez dentro del horno es sometido al proceso de reducción, el que se logra estableciendo un perfil de temperatura dentro del mismo y una concentración determinada de gases reductores (CO-H<sub>2</sub>) para ello el horno dispone de 9 cámara de combustión con quemadores de alta presión para la combustión incompleta del petróleo, el cual permite además de lograr el perfil de temperatura enriquecer la atmósfera reductora.

El proceso de reducción se efectúa en un horno de hogares múltiples tipo IIM 17 K-6, 8, de 23,5 m de alto y 6,8 m de diámetro, con 17 hogares ó soleras. Además, el horno (225-HR-205). Cuenta con un eje central al cual se le articulan 68 brazos (4 en cada hogar). Estos brazos tienen dispuestos diente o paletas con la que mediante la rotación del eje central facilitan el traslado de mineral de un hogar a otro.

El movimiento o traslado de mineral de un hogar a otro se realiza en forma de zigzag, ya que los hogares pares tienen su descarga por la periferia y los hogares impares por el centro. Ver Anexo 1.

#### **1.4.1. Estado actual del proceso de limpieza de gases en la UEP Horno de Reducción**

Los gases que salen de los Hornos de Reducción, arrastran consigo partículas muy finas de mineral, las que se hace necesario recuperar. Para ello, la Planta de Hornos de Reducción cuenta con una batería de seis ciclones para la limpieza de los gases en cada horno, que llevan a cabo la colección primaria de polvo con una eficiencia de un 77%. Las partículas de polvo recuperadas caen por gravedad al horno y las otras son enviadas a los electrofiltros por medio de los ventiladores de gases. En los electrofiltros, ocurre la purificación eléctrica de los gases, con una eficiencia de 99,6%.

Los gases al salir de los electrofiltros, son enviados por tres ventiladores de aspiración (uno para ocho hornos), a la sección de secaderos. El polvo recuperado en los electrofiltros cae a los transportadores de paleta, los que trasladan el mineral hacia las tolvas y de éstas, utilizando bombas neumáticas, se envían hacia las tolvas de la sección de Molienda y luego hacia los Silos, formando así el ciclo de Hornos de Reducción. Ver Anexo 2.

#### **1.4.2. El Proceso de Reducción en la UEP Horno de Reducción**

El proceso de reducción es eminentemente endotérmico. Por este motivo el horno dispone de 10 cámaras de combustión dispuestas en los hogares 15, 12, 10, 8 y 6 con quemadores de petróleo de alta presión, que son los encargados de producir los gases calientes para el calentamiento del mineral, a la vez que enriquece la atmósfera reductora del horno ya que trabaja con combustión incompleta. Ver figura 1.6 de cámara de combustión.



Figura 1.6. Cámara de Combustión.

Fuente (Fernández P. F. (2008))

La presión del aire utilizado en las cámaras de combustión es de 14 kPa, Así, tenemos que el mineral en su descenso es sometido a un perfil ascendente de temperatura que permite un calentamiento gradual, a la vez que penetra en un perfil gaseoso que garantiza un aumento en la concentración de reductores. La atmósfera reductora es controlada mediante la relación CO<sub>2</sub> / CO en H-10 que de ser de 1,2 %. Un perfil típico de temperatura es como sigue:

Hogar	H0	H4	H6	H7	H9	H11	H13	H15
T Gas	350. °C	720 °C	690 °C	695 °C	710 °C	720 °C	740 °C	760 °C

En estas condiciones, es posible el desarrollo de las reacciones de reducción a pesar del corto tiempo de retención del mineral en el horno (90 min).

1. NiO (s) + CO (H<sub>2</sub>) → Ni met + CO<sub>2</sub> (H<sub>2</sub>O) (g)
2. 3Fe<sub>2</sub>O<sub>3</sub> (s) + CO (H<sub>2</sub>) → 2Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> + CO<sub>2</sub> (H<sub>2</sub>O) (g)
3. Fe<sub>3</sub>O<sub>4</sub> (s) + CO (H<sub>2</sub>) → 3 FeO + CO<sub>2</sub> (H<sub>2</sub>O) (g)
4. FeO (s) + CO (H<sub>2</sub>) → Fe met + CO<sub>2</sub> (H<sub>2</sub>O) (g)

Esta operación se complementa con la introducción de aire en los hogares 4 y 6 (2000 m<sup>3</sup>/h) para la postcombustión de los gases con un cierto contenido de CO y H<sub>2</sub> no consumidos en la reacción química, para evitar un incremento de las concentraciones de los mismos en el sistema de limpieza de gases (precipitador electrostático) al mismo

tiempo se aprovecha el calor de reacción exotérmica liberado en la combustión para facilitar el perfil de temperatura ideal en el horno.

### 1.4.3. Factores que Influyen en la Operación del Horno

En esta sección se enumeran los factores que influyen en la operación de los hornos y que deben tenerse en cuenta de cara al diseño de cualquier procedimiento de optimización del proceso industrial que se vaya a desarrollar.

Entre estos tenemos los siguientes:

1. Temperatura.
2. Granulometría.
3. Composición química de la materia prima
4. Concentración de gases.
5. Número de hogares.
6. Estabilidad en la alimentación.
7. Tiempo de retención.

#### **Influencia de la Temperatura:**

Este es un parámetro fundamental en todo el proceso pirometalúrgico, ya que la temperatura facilita el cambio de estado o el debilitamiento de la estructura cristalina. El perfil de temperatura se mantiene mediante la utilización de quemadores de petróleo que se encuentran en las cámaras de combustión. En éstas se trata de mantener una relación aire-petróleo que garantice la combustión incompleta, a la vez ayuda a enriquecer la atmósfera reductora dentro del horno, además en los hogares 4 y 6 se introduce aire secundario proveniente de las camisas de enfriamiento en los hogares 4 y 6 para quemar el CO residual. Debido a esta reacción exotérmica se produce una cantidad de calor adicional que contribuye al calentamiento del mineral y a mantener el perfil térmico del horno.



Durante la operación se debe mantener un perfil de temperatura aumentando de arriba hacia abajo que garantice un calentamiento gradual para que las pérdidas de agua de los silicatos no sean bruscas y no se afecte la extracción del mismo.

**Influencia de la Granulometría:**

Por este ser un proceso heterogéneo la granulometría influye determinantemente en los buenos resultados de reducción. Las reacciones ocurren fundamentalmente en la línea divisoria de las fases y la velocidad de la reacción está determinada por la penetración del gas al interior de la partícula. Si estas son pequeñas, aumentara la superficie activa del mineral, será mayor el contacto entre las fases, lo que incide directamente en la conversión de la reacción.

En la práctica se trabaja con un 83 - 85% de fracción- 0,074 mm, con lo que se puede lograr extracciones aceptables para este proceso sin que el arrastre de polvo sea incrementado sustancialmente.

**Composición de la Materia Prima:**

La composición química de la materia prima influye directamente en los resultados de la reducción. Atendiendo a esta se fijan las temperaturas en el horno y el régimen de calentamiento de mineral así por ejemplo, cuando el mineral es serpentinoso o sea que su contenido de hierro sea bajo, el régimen de temperatura debe ser más alto, así como la concentración de reductores debe ser elevada para reducir el níquel en el momento del debilitamiento de los cristales por la expulsión de agua cristalina.

Para el mineral laterítico. Las condiciones de reducción pueden ser menos severas ya que estos minerales se reducen a bajas temperaturas (500 °C).

**Concentración de Gases:**

La reducción se lleva a cabo mediante el contacto de los gases reductores con el mineral. Ambas fases se ponen en contacto en la cama de mineral y las caídas de un hogar a otro.

Al encontrarse el petróleo aditivo en hogares con temperaturas superiores a 350 °C, comienza la descomposición del mismo, formándose el CO y H<sub>2</sub> una vez reaccionado el carbono activo en la primera etapa de la cadena de reacción química, además la atmósfera reductora es enriquecida por el gas producto de la combustión incompleta en los quemadores de petróleo. La concentración de los gases influye directamente en la conversión del níquel.

### **Número de Hogares:**

Este ha sido un factor de importancia en el desarrollo de los hornos modernos, ya que fue detectado que el número de caídas de un hogar a otro influía directamente en los resultados de la reducción debido a que en el momento de las caídas ocurre mayor contacto entre las fases, y las partículas son bañadas completamente por el gas, calentándolas a las temperaturas indicadas y reduciendo el níquel. La reducción en la cama de mineral lleva el peso de la reducción alrededor de un 70% de la misma, gracias al petróleo aditivo.

### **Estabilidad en la Alimentación:**

La inestabilidad en la alimentación al horno afecta seriamente el perfil de temperaturas, y por ende la operación del mismo, ya que todas las condiciones son fijadas para el tonelaje a procesar, y si en este tiempo al horno se les suministra más mineral que el fijado, la temperatura comenzarán a bajar y si ocurre lo contrario la temperatura aumentan y ambas situaciones no son conveniente para el proceso ni para una buena estabilidad en la operación.

### **Tiempo de Retención:**

En este equipo éste es un factor que incide directamente en los resultados de la reducción por el grado de terminación de la reacción.

#### 1.4.4. Ventajas y Desventajas de los Hornos de Hogares Múltiples

Dentro de las ventajas de este horno podemos citar las facilidades de regulación del perfil de temperatura, lo que permite lograr un aumento gradual de la misma mejorando las extracciones para los minerales silicatos.

En él se conjugan las dos formas de tostación, en capa y en suspensión, que ocurre en los momentos de la caída que es donde se obtiene mayor contacto entre las fases. Por esto la altura de los hogares es variable, para que el tiempo de contacto sea el mayor posible.

El arrastre de polvo en este equipo es pequeño en comparación con los hornos de cama fluida. Por este motivo no es necesario reciclar mucho polvo.

#### **Desventajas:**

Las desventajas fundamentales de este horno son la cantidad tan grandes de piezas cambiables (brazos y dientes, refractarios de cámaras, piezas de quemadores, etc.) que ocasionan pérdida a de tiempo y de eficiencia.

Otra de las desventajas es la baja productividad, que es de 17 t/h, mientras que en equipos más modernos llega hasta 30 t/h.

Desde el punto de vista tecnológico, la reacción en la cámara de mineral ocurre sustancialmente en la superficie de contacto y en el material que está en la profundidad de este, gracias a la introducción del petróleo aditivo que en este caso es muy controlante para una buena extracción.

#### 1.5. Conclusiones del capítulo

- ✓ En las literaturas científicas consultadas existe suficiente información para la evaluación del proceso de limpieza de gases. Sin embargo, en el caso del proceso de captación de polvos es necesario considerar las características del mineral y sus particularidades dentro del sistema.

- ✓ En el análisis del comportamiento del sistema de limpieza de gases en la Planta de Horno de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara” se necesitan mediciones de los parámetros fundamentales que intervienen en el proceso. La selección de los parámetros de trabajo y la pérdida de eficiencia está influenciada por el conocimiento de las principales variables involucradas en el transporte de partículas en flujos de gases.

A decorative border in a dark teal color frames the page. It consists of two parallel lines with ornate, symmetrical flourishes at the corners and midpoints.

Capítulo - 2

## CAPÍTULO II. PROCEDIMIENTO PARA LA EVALUACIÓN DEL SISTEMA DE LIMPIEZA DE GASES EN LA UBP HORNOS DE REDUCCIÓN

### 2.1. Introducción

El proceso de limpieza de gases depende de diversos parámetros los cuales deben ser considerados en el procedimiento de cálculo. El conocimiento del proceso y el desarrollo de expresiones matemáticas que representen el fenómeno físico permiten la interpretación de las múltiples situaciones que se presentan durante su análisis.

**El objetivo** de este capítulo es establecer el procedimiento de cálculo que incide en la eficiencia y parámetros de trabajo del sistema de limpieza de gases en la UBP Horno de Reducción de la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.

### 2.2. Determinación de la composición y granulometría del mineral de entrada y salida, y recolectado en los Sistemas de Limpieza de Gases

Para el muestreo del mineral de entrada, salida, y el recolectado en los Sistemas de Limpieza de Gases se realizaron 3 muestras fundamentales, con los siguientes juegos de tamices (mallas de 100, 170, 200, +325 y -325).

Muestra 1 de 100 gramos (a la salida de los Enfriadores).

Muestra 2 de 100 gramos (a la salida de los Ciclones).

Muestra 3 de 100 gramos (a la salida de los Electrofiltros).

De la masa total analizada (300 gramos) fueron procesados 299,59 gramos de mineral por pérdida de un 0,41% de mineral en manipulación (tabla 2.1). Los 299,59 gramos representan un 99,86% de la masa total analizada. De estos se quedaron en cada malla lo siguiente:

Tabla: 2.1. Representación de los tamices utilizados en el experimento

Mallas	100	170	200	325	-325	Total
MT (gr)	13,45	12,78	1,44	6,60	265,33	<b>299,59</b>
MT (%)	4,48	4,26	0,48	2,20	88,44	<b>99,86</b>

La masa total que se arrastra hacia los electrofiltros y ciclones corresponde a 200 gramos, y en cada malla se obtienen los resultados siguientes:

Tabla 2.2. Representación de la masa total arrastrada hacia los electrofiltros y ciclones

Mallas	100	170	200	325	-325	Total
MTarr (gr)	0,15	0,85	0,28	1,43	197,04	<b>199,75</b>
MTarr (%)	1,12	6,65	19,44	21,67	74,26	<b>24,63</b>

La masa total arrastrada (199,75 gr) hacia los electrofiltros y ciclones  $MTarr$  (%) es:  
 $MTarr = 24,63\%$  de la masa total procesada.

### 2.2.1. Cálculo de la densidad real de los gases a la salida del Horno

Cálculo del flujo másico total de polvo arrastrado hacia los SLG  $Q_{tparr}$  (kg / h)

$$Q_{mtparr} = \frac{P \cdot M_{Tarr}}{100} \quad (2.1)$$

$$Q_{mtparr} = 4679,7 \text{ kg / h}$$

Cálculo del flujo volumétrico total de polvo arrastrado hacia los SLG

$$Q_{vtparr} (m^3 / h)$$

$$Q_{vtparr} = \frac{Q_{tparr}}{\rho_{polvo}} \quad (2.2)$$

$$Q_{vtparr} = 5,51 m^3 / h$$

Cálculo del % de polvo arrastrado hacia los SLG  $X_{parr}(\%)$

$$X_{parr} = \frac{Q_{vt_{parr}} \cdot 100}{Q_{tgss}} \quad (2.3)$$

$$X_{parr} = 0,018352596\%$$

Cálculo de la fracción molar del polvo arrastrado hacia los SLG  $\bar{X}_{parr}$

$$\bar{X}_{parr} = \frac{X_{parr}}{100} \quad (2.4)$$

$$\bar{X}_{parr} = 0,000183526$$

Cálculo de la fracción molar de los gases  $\bar{X}_{gases}$

$$\bar{X}_{gases} = \frac{100 - X_{parr}}{100} \quad (2.5)$$

$$\bar{X}_{gases} = 0,99982$$

**Tabla 2.3. Densidad de los gases de combustión en condiciones normales,  $\rho^0$  (kg/m<sup>3</sup>)**

$\rho^0 CO_2$	$\rho^0 SO_2$	$\rho^0 N_2$	$\rho^0 O_2$	$\rho^0 H_2$	$\rho^0 H_2O$	$\rho^0 CO$
1,963	2,926	1,250	1,429	0,0899	0,00484	1,250

**Tabla 2.4. Flujo de los gases de combustión en condiciones normales (m<sup>3</sup>/h)**

Flujo de los gases de combustión en condiciones normales (m <sup>3</sup> /h)						
$Q_{CO_2}$	$Q_{SO_2}$	$Q_{N_2}$	$Q_{O_2}$	$Q_{H_2}$	$Q_{H_2O}$	$Q_{CO}$
113,100	6,300	320,587	24,756	0,300	82,066	11,410

### 2.2.2. Cálculo del flujo total de los gases de combustión

$$Q_{tgc} = Q_{CO_2} + Q_{SO_2} + Q_{N_2} + Q_{O_2} + Q_{H_2} + Q_{H_2O} + Q_{CO} \quad (2.6)$$

$$Q_{tgc} = 559m^3 / h$$



Cálculo del % de cada elemento de la combustión

$$\%CO_2 = \frac{QCO_2 \cdot 100}{Qtgc} \quad (2.7)$$

$$\%CO_2 = 20,23$$

**Tabla2.5. Porciento de cada elemento de la combustión**

% de cada elemento de la combustión						
%CO <sub>2</sub>	%SO <sub>2</sub>	%N <sub>2</sub>	%O <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub>	%H <sub>2</sub> O	%CO
20,233	1,127	57,350	4,429	0,054	14,681	2,041

Cálculo la fracción molar de cada elemento de la combustión

$$\bar{X}CO_2 = \frac{\%CO_2}{100} \quad (2.8)$$

$$\bar{X}CO_2 = 0,20233$$

**Tabla 2.6. Fracción molar de cada elemento de la combustión**

$\bar{X}CO_2$	$\bar{X}SO_2$	$\bar{X}N_2$	$\bar{X}O_2$	$\bar{X}H_2$	$\bar{X}H_2O$	$\bar{X}CO$
0,20233	0,01127	0,57350	0,04429	0,00054	0,14681	0,02041

Cálculo de la densidad total de los gases de combustión en condiciones normales

$$\begin{aligned} \rho^0 Tgc &= \rho^0 CO_2 \cdot \bar{X}CO_2 + \rho^0 SO_2 \cdot \bar{X}SO_2 + \rho^0 N_2 \cdot \bar{X}N_2 + \\ &\rho^0 O_2 \cdot \bar{X}O_2 + \rho^0 H_2 \cdot \bar{X}H_2 + \rho^0 H_2O \cdot \bar{X}H_2O + \rho^0 CO \cdot \bar{X}CO \end{aligned} \quad (2.9)$$

$$\rho^0 Tgc = 1,23659 kg / m^3$$

Cálculo de la densidad real de los gases de combustión

$$\rho rgc = \rho^0 Tgc \cdot \frac{273 \cdot (760 - Pe)}{(273 + Tgss) \cdot 760} \quad (2.10)$$

$$\rho rgc = 0,506 kg / m^3$$

Cálculo de la densidad real de los gases a la salida del Horno

$$\begin{aligned} \rho_{rgss} &= \rho_{rgc} \cdot \bar{X}_{gases} + \rho_{polvo} \cdot \bar{X}_{parr} \\ \rho_{rgss} &= 0,662 \text{kg} / \text{m}^3 \end{aligned} \quad (2.11)$$

La densidad real de los gases a la salida del electrofiltro es  $\rho_{rgse} = \rho_{rgc} = 0,506 \text{kg} / \text{m}^3$

### 2.3. Cálculo del diámetro de las partículas de polvo que son arrastradas hacia los sistemas de limpieza de gases

Cálculo de la velocidad de las partículas en el interior del Horno  $w_p(m/s)$

Diámetro del horno  $d_{hor} = 6,8m$

Longitud del horno  $L = 23,5m$

Área del horno  $A_{hor}(m^2)$

$$\begin{aligned} A_{hor} &= \frac{\pi \cdot d_{hor}^2}{4} \\ A_{hor} &= 36,317m^2 \end{aligned} \quad (2.12)$$

$$\begin{aligned} w_p &= \frac{Q_{tgss}}{A_{hor}} \\ w_p &= 0,23m/s \end{aligned} \quad (2.13)$$

Cálculo del diámetro de las partículas en el interior del Horno según la ley de Stockes.

El coeficiente de viscosidad cinemática de los gases  $\nu(m^2/s)$  a una temperatura de los gases en el colector de Horno de  $T_{gss} = 230^{\circ}C$  es igual a  $\nu = 36,7 \cdot 10^{-6} m^2/s$

Coeficiente dinámico de viscosidad  $\mu = \nu \cdot \rho_{rgss}$

Aceleración de la gravedad  $g = 9,81m/s^2$ .

$$dp = \sqrt{\frac{18 \cdot wp \cdot v \cdot \rho_{gss}}{g \cdot \rho_{polvo}}}$$

$$dp = 0,000110m \tag{2.14}$$

$$dp = 0,110mm$$

$$dp = 110\mu m$$

**2.4. Análisis Hidrodinámico de las redes de distribución de los gases**

Cantidad de tramos, sus diámetros, y accesorios existentes en la línea se muestran en la tabla 2,7.

**Tabla 2.7. Diámetro nominal y cantidad de accesorios en cada tramo de la línea # 1**

Tramos	D (m)	C-90	C-30	C-45	Red.	Exp.	Vál.	Tr.
1	1,020	1	0	0	1	0	0	0
2	0,920	3	0	1	0	2	1	0
3	1,620	0	0	1	1	0	1	0
4	2,200	0	0	0	0	0	0	0
5	2,220	0	0	0	0	0	0	0
6	1,220	2	1	0	0	1	1	0
7	1,620	1	0	1	0	1	0	0
8	2,420	0	0	0	0	1	0	1
Total	-	7	1	3	2	5	3	1

**Tabla 2.8. Cantidad de coeficientes de entrada (Coef., e), y de salida (Coef., s)**

Tramos	1	2	3	4	5	6	7	8	Total
C, e	1	2	1	0	0	1	0	0	5
C, s	1	2	0	0	0	1	0	1	5

El valor medio de rugosidad para los tubos de acero es igual a  $e = 0,0002m$

Cálculo de la velocidad de los gases para cada tramo de tubería y para los ciclones,

$$V = \frac{Q}{A} \quad (2.15)$$

**Tabla 2.9. Velocidad de los gases para cada tramo de tubería y los ciclones,**  
 $V(m/s)$

Tramos y ciclones de diámetro $d = 0,800m$ $Qtgssciclone = 5003,8m^3 / h$									
1	2	3	4	5	6	7	8	Ciclón	Pr,
10,21	12,55	4,05	2,19	2,15	7,13	4,05	1,81	2,765	5,52

Es necesario señalar en este punto que los valores de velocidad en los ciclones están en los rangos permisibles establecidos en las normas (son de 2,5 a 3,5 m/s,)

**Tabla 2.10. Cálculo del Reynolds  $Re$  para cada tramo de tubería de la planta**  
 $Re = V \cdot d/\nu$  (2.16)

Tramos	1	2	3	4	5	6	7	8	Pr,
$Re \cdot 10^5$	2,84	3,15	1,79	1,31	1,30	2,37	1,79	1,19	1,97

**Tabla 2.10.1. Cálculo de la relación  $d/e$  para cada tramo de tubería de la planta**

Tramos	1	2	3	4	5	6	7	8	Pr,
$d/e$	5100	4600	8100	11000	11100	6100	8100	12100	8275

**Tabla 2.10.2. Determinación del coeficiente de fricción ( $\lambda_a$ ) para cada tramo**

Tramos	1	2	3	4	5	6	7	8	Pr,
$\lambda_a$	0,0165	0,016	0,0133	0,013	0,014	0,0145	0,0135	0,013	0,0142

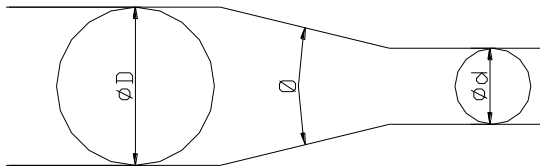
Tabla2.10.3. Longitud de cada tramo recto  $L_{Trec.}(m)$  de tubería,

Tramos	1	2	3	4	5	6	7	8
$L_{Trec.}(m)$	5,20	40,80	9,70	19,30	6,10	26,80	40,40	55,50

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

$\rho^0 (kg/m^3)$  Para las T ramales de  $\alpha = 120^\circ$   $K_8 = 1$

Para los reducidos (de redondo a redondo)  $K_9$



$$C = D - d \quad \theta = \tan^{-1} \frac{C}{L}$$

$$\text{Si } \theta < 45^\circ \quad K_9 = 0,8 \cdot \text{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right)$$

$$\text{Si } 45^\circ < \theta < 180^\circ \quad K_9 = 0,5 \cdot \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right) \cdot \sqrt{\frac{\text{sen} \theta}{2}} \quad (2.17)$$

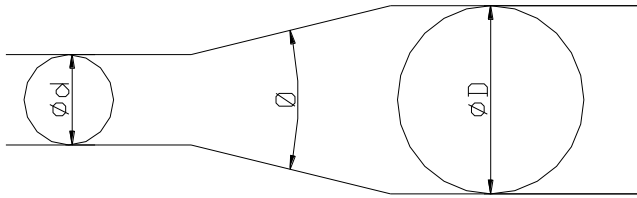
Para los reducidos y ensanchamientos (de cuadrado a cuadrado) se determina el  $deq(m)$

$$deq = 4 \cdot Rh$$

$$Rh = \frac{A}{P} \quad (2.18)$$

$$Rh = \frac{a \cdot b}{2 \cdot (a + b)}$$

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



Si  $\theta < 45^\circ$  
$$K_{10} = 2,6 \cdot \text{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2$$

Si  $45^\circ < \theta < 180^\circ$  
$$K_{10} = \left(1 - \frac{d^2}{D^2}\right)^2 \tag{2.19}$$

Para los ensanchamientos (de cuadrado a cuadrado) se determina el  $deq(m)$

**Tabla 2.11. Cálculo de los coeficientes de pérdida de cada accesorio, para cada tramo**

Coeficientes de pérdida (K) en accesorios, para cada tramo de la línea # 1									
Tramos	C-90°	C-30°	C-45°	Red.	Exp.	Vál.	T.r.	C.e	C.s
1	1	0	0	1	0	0	0	1	1
2	3	0	1	0	2	1	0	2	2
3	0	0	1	1	0	1	0	1	0
4	0	0	0	0	0	0	0	0	0
5	0	0	0	0	0	0	0	0	0
6	2	1	0	0	1	1	0	1	1
7	1	0	1	0	1	0	0	0	0
8	0	0	0	0	1	0	1	0	1
<b>Total</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>3</b>	<b>2</b>	<b>5</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>5</b>	<b>5</b>

Cálculo de las pérdidas en los electrofiltros  $Helec(mmH_2O)$  estas pérdidas para los cálculos se tomaron constantes

$$Helec = 26mmH_2O$$

Cálculo de las pérdidas en los ciclones  $Hcicl(mmH_2O)$

$$Hcicl = \frac{\zeta * Vc^2 \rho g_{ss}}{2 * g} \tag{2.20}$$

Estas pérdidas se calcularon en función del gasto  $Qtg_{ss}(m^3/s)$ , del coeficiente de resistencia hidráulica  $\zeta$ , y del diámetro del ciclón  $dcicl(m)$ . Para los ciclones tipo TsN-11  $\zeta = 250$

**Tabla 2.12. Cálculo de las longitudes equivalentes en accesorios, la total en cada tramo y la total referida al tramo 3 de diámetro 1,62 m desde el tramo 1 al 5**

Tramos	$Lacc(m)$	$LT(m)$	$LTr(m)$
1	139,721	144,921	86,511
2	170,789	211,587	211,587
3	190,819	200,519	11,845
4	0,000	19,300	0,247
5	0,000	6,100	0,075
<b>Total</b>	-	-	<b>310,263</b>

**Tabla 2.12.1. Cálculo de las longitudes equivalentes en accesorios, la total en cada tramo y la total referida al tramo 6 de diámetro 1,22 m desde el tramo 6 al 8**

Tramos	$Lacc(m)$	$LT(m)$	$LTr(m)$
6	227,442	254,242	61,999
7	101,436	141,836	8,378

Tramos	$Lacc(m)$	$LT(m)$	$LTr(m)$
8	238,314	293,814	2,333
<b>Total</b>	-	-	<b>72,711</b>

### Características de la red:

La instalación de limpieza de gases de la planta de Hornos de reducción, presenta un sistema complejo de tuberías ramificadas donde los datos de la instalación se encuentran en anexos 3,

Para el cálculo de las pérdidas de presión en los ductos que transportan gases más polvo se analizó teniendo en cuenta la línea de mayor longitud (el ducto de mayor longitud desde el horno hasta la chimenea), la cual se encuentra en la primera losa (ver anexo 3),

Esta metodología se puede emplear, siempre que las demás líneas homólogas a la seleccionada posean la misma 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,

Determinación de la ecuación del ventilador,

$$H_{\text{ventilador}} = -1,554 \cdot 10^{-8} \cdot Q^2 + 3,93 \cdot 10^{-4} \cdot Q + 215 \quad (2.21)$$

La ecuación del ventilador se determinó mediante un modelo matemático de matrices,

Cálculo de la curva de la red  $H_{red} = (mmH_2O)$

De la ecuación fundamental de la hidráulica se obtiene que la curva de la red es igual a

$$H_{red} = \Delta Z + \Sigma h \quad (2.22)$$



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,  $H_{red} = \Sigma h$

$$\Sigma h = \frac{\lambda \cdot LeqT \cdot Q^2}{12,1 \cdot D^5} \quad (2.23)$$

La ecuación queda de la siguiente forma:

$$H_{red} = \Sigma h = \frac{\lambda \cdot LeqT \cdot Q^2}{12,1 \cdot D^5} \quad (2.24)$$

$H_{red} = (m)$

Multiplicando esta ecuación por la densidad real de los gases  $\rho_{rgs}(kg/m^3)$  los resultados se obtienen en unidades de presión  $H_{red} = (mmH_2O)$ ,

$$H_{red} = \frac{\lambda \cdot LeqT \cdot Q^2}{12,1 \cdot D^5} \cdot \rho_{rgss} \quad (2.25)$$

$H_{red} = (mmH_2O)$

La curva de la red con gasto  $Qtgss = 37500m^3/h = 10,416m^3/s$  es:

$$H_{red} = \frac{\lambda \cdot LeqT \cdot Q^2}{12,1 \cdot D^5} \cdot \rho_{rgss}$$

$H_{red} = 200,76mmH_2O$

En las condiciones actuales el punto de trabajo del ventilador está a una altura de  $H_{red} = 200,76mmH_2O$  y un gasto de  $Qtgss = 37500m^3/h$ ,

A continuación se muestran las curvas características contra el sistema para varias condiciones en la instalación,

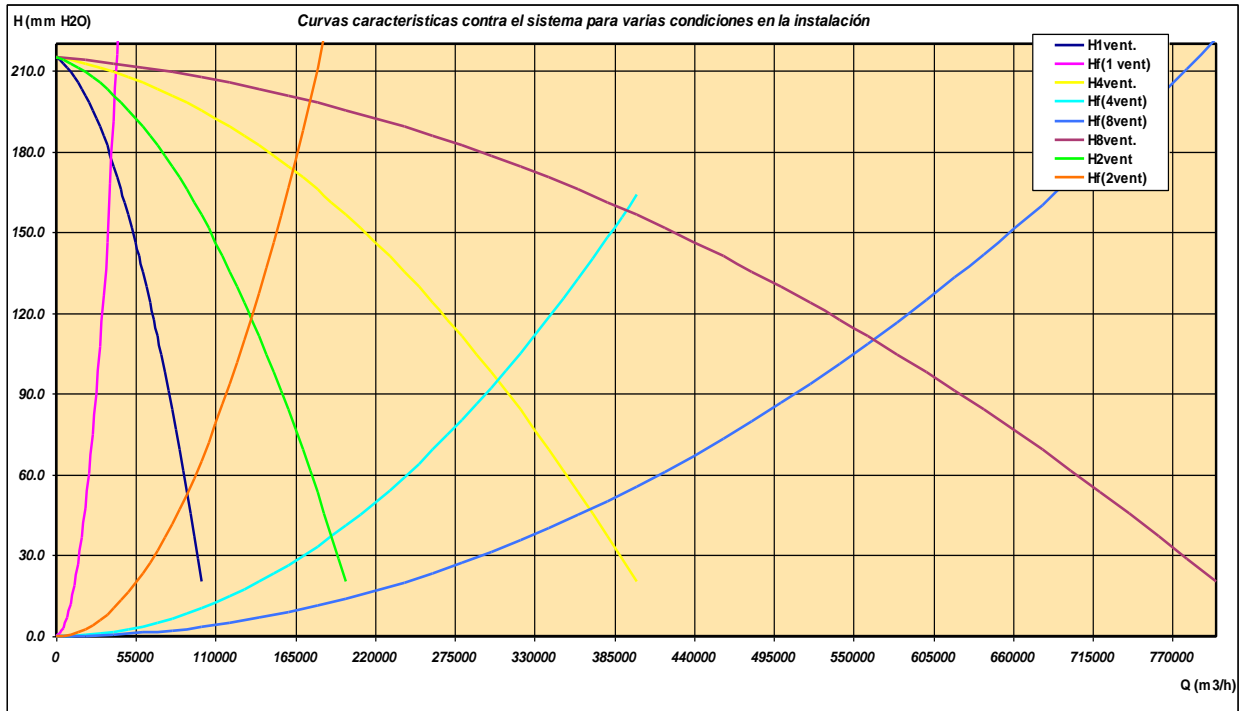


Figura: 2.1. Curvas características contra el sistema para varias condiciones en la instalación

Cálculo de la potencia actual que consume el ventilador:  $N_{ven}(KW)$

Características Principales del ventilador centrífugo de doble entrada modelo BM-20.

Caudal (gasto):  $Q = 39500m^3 / h$

Altura de presión:  $H = 173,35mmH_2O$

Potencia:  $N = 32,7KW$

Número de revoluciones:  $n = 987rpm$

Máxima Eficiencia:  $\eta = 0,84\%$

$Qtgss = 37500m^3 / h$

$H_{red} = 200,76mmH_2O$

$\eta = 0,675\%$

$$N_{ven} = \frac{(Q_{tgss} / 3600) \cdot H_{red}}{\eta \cdot 102} \quad (2.26)$$

$$N_{ven} = 30,37KW$$

Chimenea

Altura de la chimenea:  $H_{ch} = 120m$

Diámetro de la base de la chimenea:  $D = 13m$

Diámetro de la cabeza de la chimenea:  $d = 5,0m$

Densidad del aire:  $\rho_{aire} = 1,293kg / m^3$

Cálculo del área de la chimenea:  $A_{ch}(m^2)$

$$A_{ch} = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \quad (2.27)$$

$$A_{ch} = 19,635m^2$$

Cálculo del tiro de la chimenea

$$T_{ch} = H_{ch} - (\rho_{aire} - \rho_{rgss}) \quad (2.28)$$

$$T_{ch} = 75,759mmH_2O$$

Cálculo del flujo total de gases a la chimenea (suponiendo que están trabajando 24 Hornos):  $Q_{tgch}(m^3 / h)$

$$Q_{tgch} = Q_{tgss} \cdot 24 \quad (2.29)$$

$$Q_{tgch} = 720552m^3 / h$$

Cálculo de la velocidad de salida de los gases por la chimenea:  $V_{ch}(m/s)$ . Para determinar el valor de velocidad de salida de los gases por las chimeneas debe tenerse en consideración el rango de valores permisibles establecido ( $V_{ch} = 10 - 30m/s$ ),

$$V_{ch} = \frac{Q_{tgch} / 3600}{A_{ch}} \quad (2.30)$$

$$V_{ch} = 10,194 \text{ m/s}$$

Valor medio de rugosidad de la chimenea de hormigón sin enlucir  $e = 0,006$

Relación  $d/e = 833$

Cálculo del Reynolds  $Re$ ,

$$Re = \frac{V_{ch} \cdot d}{\nu} \quad (2.31)$$

$$Re = 1,389 \cdot 10^6$$

El coeficiente de fricción es:

$$\lambda = 0,0125$$

Cálculo del coeficiente de pérdidas de la chimenea  $K_{ch}$  (la chimenea se calcula como un reducido)

$$C = D - d \quad \theta = \tan^{-1} \frac{C}{H_{ch}} \quad \text{Como } \theta < 45^\circ$$

$$K_{ch} = 0,8 \cdot \text{sen} \frac{\theta}{2} \cdot \left( 1 - \frac{d^2}{D^2} \right) \quad (2.32)$$

$$K_{ch} = 0,02271$$

Cálculo de la longitud equivalente de la chimenea,  $Le_{qch}(m)$

$$Le_{qch} = \frac{K_{ch} \cdot d}{\lambda} \quad (2.33)$$

$$Le_{qch} = 9,084 \text{ m}$$

Cálculo de la longitud total de la chimenea,  $LT_{ch}(m)$

$$\begin{aligned}
 LTch &= Hch + Leqch \\
 LTch &= 129,084m
 \end{aligned}
 \tag{2.34}$$

Cálculo de las pérdidas de presión en la chimenea,  $\Delta Hch(mmH_2O)$

$$\begin{aligned}
 \Delta Hch &= \frac{\lambda \cdot LTch \cdot Qtgch}{12,1 \cdot deqch^5} \cdot \rho g s s \\
 \Delta Hch &= 1,131mmH_2O
 \end{aligned}
 \tag{2.35}$$

Cálculo del tiro real de la chimenea,  $TRch(mmH_2O)$

$$\begin{aligned}
 TRch &= Tch - \Delta Hch \\
 TRch &= 74,628mmH_2O
 \end{aligned}
 \tag{2.36}$$

El cálculo del tiro real de la chimenea nos dice que los ventiladores ubicados después de los electrofiltros tienen una reserva de presión numéricamente igual al tiro real de la chimenea de  $Trch = 74,628mmH_2O$ , lo cual permite que los ventiladores trabajen más eficientemente.

## 2.5. Cálculo de la capacidad de los transportadores KIIC-300 y KIIC-320

En los sistemas de limpieza de gases de la Planta de Horno de Reducción el electrofiltro y los embudos muertos poseen tolvas de almacenamiento de mineral, este mineral es descargado en los transportadores de paletas hundidas KIIC-300 de 5 t/h de capacidad, cada transportador llevará su carga a otros transportadores similares KIIC-320 pero de mayor capacidad 20 t/h. Estos últimos descargan su contenido en las tolvas de mineral que alimentan a las bombas de transporte neumático con una capacidad de 120 t/h. Estas bombas envían los minerales hacia las tolvas de producto final de la sección de molienda de la UBP Planta de Preparación de Mineral para más tarde ser bombeado hacia los silos, formando así el ciclo de horno.

Para producir 31000 t/año de mineral seco con 20 Hornos trabajando actualmente, es necesario suministrar a la planta un tonelaje de mineral de ver tabla 2,13.

Tabla 2.13. Valores para producir 31000 t/año de mineral seco

(t/año)	(t/días)	(t/horas)	(t/Horno)
3311192,4	9071,76	377,99	18,90

El flujo de polvo que se arrastra hacia los SLG y que debe ser captado por los equipos del SLG es: el 24,63% de las 18,9 toneladas de mineral seco por horno, representando unas  $Q = 4,65t/h$ . Además estas 4,65 t/h serán llevadas por los transportadores KIIC-300 a los KIIC-320 y estos hasta las tolvas de almacenamiento de mineral.

Para determinar la capacidad real de los transportadores para las producciones actuales se realizaron los siguientes cálculos.

Para el transportador KIIC-300 de:

Velocidad del transportador  $V_t = 0,13m/s$

Capacidad  $Q_n = 5t/h$

Longitud  $L = 26,91m$

Ancho de la paleta  $a_p = 0,290m$

Altura de la paleta  $b_p = 0,060m$

Ancho de la canal  $a_c = 0,320m$

Altura de la canal  $b_c = 0,410m$

Motor eléctrico modelo 4A100L4T2

Número de revoluciones por minutos: 1690 rpm

Voltaje: 240 v

Frecuencia: 60 Hz

Potencia: 4 kW

Relación de transmisión  $i = 90$

Coefficiente de llenado  $\Psi = 1$

Coefficiente que depende del ángulo de inclinación del transportador:  $C_3 = 1$

El área de transportación del mineral es igual al área de la paleta:  $A_0 = A_p$

$$A_0 = a_p \cdot b_p \tag{2.37}$$

$$A_0 = 0,0174m^2$$

Cálculo de la productividad horaria  $Qh(t/h)$  de los transportadores KIIC-300 a una velocidad de transportación de  $Vt = 0,13m/s$ .

$$Qh = \left( 3600 \cdot A_0 \cdot C_3 \cdot \Psi \cdot Vt \cdot \frac{\rho_{polvo}}{1000} \right) \cdot 2 \tag{2.38}$$

$$Qh = 13,311t/h$$

Estos transportadores KIIC-300, de capacidad 5 t/h cada uno, trabajando a una velocidad de transportación de  $Vt = 0,13m/s$ , con  $\Psi = 1$ , son capaces de llevar todo el mineral que se capta en los SLG hacia el transportador KIIC-320.

Para el transportador KIIC-320 de:

Velocidad del transportador  $Vt = 0,16m/s$

Capacidad  $Q_h = 20t/h$

Longitud  $L = 37,417m$

Ancho de la paleta  $a_p = 0,290m$

Altura de la paleta  $b_p = 0,060m$

Ancho de la canal  $a_c = 0,320m$

Altura de la canal  $b_c = 0,410m$

Motor eléctrico modelo 4AM132SAT2

Número de revoluciones por minutos: 1750 rpm

Voltaje: 240 v

Frecuencia: 60 Hz

Potencia: 7,5 kW

Relación de transmisión  $i = 90$

Coefficiente de llenado  $\Psi = 1$

Coefficiente que depende del ángulo de inclinación del transportador:  $C_3 = 1$

El área de transportación del mineral es igual al área de la paleta:  $A_0 = A_p$

$$\begin{aligned} A_0 &= a_p * b_p \\ A_0 &= 0,0174m^2 \end{aligned} \tag{2.39}$$

Cálculo de la productividad horaria  $Qh(t/h)$  del transportador КПС-320 para las producciones actuales a una velocidad de transportación de  $Vt = 0,16m/s$ ,

$$\begin{aligned} Qh &= \left( 3600 * A_0 * C_3 * \Psi * Vt * \frac{\rho_{polvo}}{1000} \right) * 2 \\ Qh &= 17,038t/h \end{aligned} \tag{2.40}$$



Este transportador KΠIC-320, de capacidad 20 t/h, trabajando a una velocidad de transportación de  $V_t = 0,16 \text{ m/s}$ , y con  $\Psi = 1$ , es capaz de llevar todo el mineral que descargan en él los transportadores KΠIC-320, hacia las tolvas de alimentación de las bombas de transporte neumático.

Los transportadores KΠIC-300 y KΠIC-320 la velocidad de ellos están (dentro del rango de 0,1 a 0,63 m/s) estipulado lo que nos permiten una buena productividad horaria de los transportadores.

## 2.6. Conclusiones del capítulo

- ✓ El método de cálculo desde el punto de vista aerodinámico se comprobó que los ventiladores, y la red garantiza la evacuación correcta, ya que se encuentran dentro de los márgenes establecidos por la literatura técnica especializada y los pasaporte técnico de los fabricantes.
- ✓ Las mediciones experimentales de los parámetros de operación del ventilador realizadas están en correspondencia con la exigencia técnicas del equipo.
- ✓ El nuevo sistema de aspiración de los Transportadores- KΠIC-300 y KΠIC-320 de la UBP horno con su velocidad son capaz de llevar todo el mineral que descargan en él hacia las tolvas de alimentación de las bombas de transporte neumático.

A decorative border in a dark teal color, consisting of two parallel lines. The corners are adorned with intricate, symmetrical scrollwork and floral motifs.

Capítulo - 3

## CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS E IMPACTO AMBIENTAL

### 3.1. Introducción

El capítulo que a continuación se presenta, tiene como objetivo principal la evaluación del sistema de limpieza de gases para esto es necesario hacer una valoración del impacto ambiental que emite la UBP horno de reducción y su influencia en la salud de los obreros que laboran en esta área, la población del municipio de Moa y el medio ambiente en general, definiendo las posibles vías de afectaciones y la determinación de los niveles de emanaciones logrados una vez implementado el trabajo.

El **objetivo** del presente capítulo es: Analizar los resultados obtenido en el trabajo considerando el impacto ambiental asociado a la misma.

### 3.2. Datos que se utilizaron en el capítulo 2 para le realización de los cálculos.

**Tabla 3.1. Datos de entrada para realizar el balance de Masa y Energía en el Colector de Horno de Reducción**

Flujo másico del mineral húmedo alimentado:	$Q_{min\ ha} = 17,5t/h$
Valor calórico del petróleo:	9600 kcal/kg
Temperatura de los gases en el Hornos de Reducción:	$T_{ghr} = 780^{\circ}C$
Por ciento de CO en los gases de Hornos de Reducción:	$\%CO_{ghr} = 1,47$
Flujo volumétrico de los gases de Hornos de Reducción:	$Q_{ghr} = 60789m^3n/h$
Presión en el interior del horno :	$P_{int.\horno} = 3mmH_2O$

**Tabla 3.2. Datos de salida del balance de Masa y Energía en el Colector de Horno de Reducción**

Flujo real de los gases a la salida del Horno:	$Qtgss = 30023m^3 / h$
Flujo normal de gases a la salida del Horno:	$Qngss = 240183m^3 n/ h$
Temperatura del los gases a la salida del horno:	$Tgss = 380^{\circ} C$
Flujo másico asumido para los cálculos de $Qtparr P = 19000kg / h$	
Presión estática promedio del colector de hornos de 1 <sup>a</sup> , 2 <sup>a</sup> , 3 <sup>a</sup> losa	$Pe = 224mmch_2O$ $Pe = 16,477mmchHg$
Las condiciones normales que se toman se reflejan a continuación	
(0 °C y 760 mm Hg (1 atm))	
La densidad del polvo es	$\rho_{polvo} = 850kg / m^3$

### 3.3. Valoración económica

**Cantidad de Fuel utilizado en el calentamiento de los gases fríos que se inyectaban al SLG de los hornos de reducción:**

A los SLG de los hornos se le inyecta un volumen de aire frío en los hogares H4 y H6 de 2000 m<sup>3</sup>/h, a una temperatura 32 °C, con una presión del aire utilizado en la cámara de combustión de 14 kPa. Esto se logra con el uso de ventiladores centrífugos capaces de mantener una operación estable en dicha área.

#### **Cantidad de calor necesaria para el calentamiento**

Partiendo de la ecuación de balance térmico planteamos.

Para aire frío a una temperatura  $t_a = 30^{\circ} C$ .

$$C_{p\text{aire}} (30^{\circ} C) = 0,240 \text{ Kcal/Kg } ^{\circ} C$$

$$G_{m.\text{aire}} = 5,7 \text{ Kg/seg}$$

$$t_{\text{gases}} = 120^{\circ} C$$

$$Q_1 = G_{m. \text{ Aire}} \cdot C_{p_{\text{aire}}} (30 \text{ }^\circ\text{C}) \cdot (t_{\text{gases}} - t_a)$$

$$Q_1 = 443232 \text{ Kcal/h}$$

**Cantidad de petróleo que se ahorra por calentar el aire**

$$G_{pet.} = \frac{Q}{V.C.B} \quad \text{Donde: VCB valor calórico (9 600 kcal/kg)}$$

$$G_{pet.} = 46,17 \text{ Kg/h}$$

Obteniendo un valor total de **404,45 ton fuel / al año con un precio de 523,366 \$/ton**

Valor ahorrado = **211675,38 \$/año.**

**Tabla 3.3. Valores obtenidos y costo del Fuel utilizado en el calentamiento de los gases fríos que se inyectaban al SLG de los hornos de reducción**

Cantidad de petróleo que se ahorra por calentar el aire.	$G_{pet}=46,17 \text{ Kg/h}$
Valor total	404,45 ton fuel/al año
Precio al año	523,366 \$/ton
Valor ahorrado	211675,38 \$/año

Según comprobaciones actuales a través de mediciones, se confirma que la UBP horno de reducción emite a la atmósfera una carga de polvo de 0,28 t/h, teniendo en cuenta que una tonelada de mineral seco cuesta \$ 3591,66 esto trae una perdida económica de \$ 1005,66 por ineficiencia en el SLG.

**Tabla 3.4. Valores de perdidas económicas que tiene la planta por el mineral que se va por chimenea que no se capta por el SLG**

Carga de polvo que emite la planta a la atmósfera	0,28 t/h
Costo de una tonelada de mineral seco	\$ 3591,66
Perdida económica	\$ 1005,66

**Tabla 3.5. Residuales, gases y polvo. Sección de Hornos de Reducción**

N <sub>0</sub>	Descripción	Proyecto	Real 2011
1	Volumen de trabajo de los gases	293,000 m <sup>3</sup> /h	248,700 m <sup>3</sup> /h
2	Volumen de los gases en condiciones normales	127,600 m <sup>3</sup> N/h	172,823 m <sup>3</sup> N/h
3	Temperatura	320 a 380 °C	250 a 270 °C
4	Composición de los gases (salida de horno)	CO <sub>2</sub> : 10,2 % H <sub>2</sub> O : 33 % SO <sub>2</sub> : 0,1 % CO : 3,0 % N <sub>2</sub> : 52,1 % Z : 0,2 g/m <sup>3</sup>	CO: 1,0-1,5%  Z: 1,611 g/m <sup>3</sup> N
5	Cantidad de polvo descargado a chimenea	25,52 Kg/h	278,40 Kg/h

Los gases de Hornos de Reducción, se utilizan actualmente en los secaderos para el aprovechamiento del calor de estos gases, pero por mantener la política de ahorro por planta, la combustión de los gases reductores en los hogares superiores del horno, se ha hecho más profunda, bajando el contenido de CO desde 3,0% hasta 1,0-1,5%, en el momento de este estudio. Esto ha reportado una disminución del consumo de petróleo de 54 a 50 Kg por tonelada de mineral seco.

**Tabla 3.6. Componentes de los electrofiltros y consumo energético en la UPB Horno de Reducción**

No	Descripción	Potencia	Cantidad	Total
1	Mecanismo de sacudida	0,6 kW	29	17,4 kW
2	Máquinas ATF - 600	60 kW	5	300 kW
3	Transformador	1 kW	1	1 kW
4	Ventilador de Soplado	0,4 kW	1	0,4 kW
5	Transportadores Cortos	3 kW	1	3 kW
6	Condensador	96 kW	1	96 kW

No	Descripción	Potencia	Cantidad	Total
	<b>Total</b>	-	-	<b>411,8 kW</b>

En la planta de Horno de Reducción operan 12 electrofiltros con un consumo de electricidad equivalente a  $411,8 \text{ kW} \cdot 12 = 5013,6 \text{ kW/h} = (5 \text{ mW/h})$ .

**Tabla 3.7. Valores del consumo en mW/hora y costo económico de los electrofiltros en la UBP Horno de Reducción**

Consumo de electricidad	5 mW/h
Costo de 1 mW/h	189,5 CUC
Consumo total del costo eléctrico en los electrofiltros	947,5 CUC/h

### 3.4. Impacto ambiental

La protección del medio ambiente se ha convertido, en los últimos años, en una de las cuestiones que inquietan a la humanidad. Los grandiosos medios técnicos de que dispone el hombre para explotar las riquezas naturales, el acelerado desarrollo de la economía y el crecimiento de la población, han dado lugar a consecuencias indeseables para la humanidad, tales como: el agotamiento de recursos naturales, la contaminación ambiental, los ruidos, la pérdida de los valores estéticos del medio circundante y la merma acelerada del fondo genético, entre otros. No es por tanto casual que las organizaciones científicas, sociales, políticas, los estados y los gobiernos de muchas partes del mundo se hallan preocupado por tomar medidas que, de una forma u otra, están dirigidas a garantizar el uso racional de los recursos naturales y la protección del medio ambiente.

El período industrial moderno se ha caracterizado por la creación masiva de máquinas y los procesos de fabricación que emplean energía. Las principales fuentes de estos son los carbones, el petróleo, el gas natural y de alguna otra manera la energía hidráulica y Nuclear.

El estado de salud del trabajador depende en gran medida de las condiciones de trabajo, su entorno laboral y su labor específica, pues en este medio es donde el mismo

se expone a los diferentes contaminantes, entre los que se encuentran el polvo industrial, ruidos, gases, etc.

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 artificialmente.

Este fenómeno se encuentra ligado a la concentración de partículas, pero así mismo influye el tamaño de estas. Para una misma concentración las partículas que absorben una mayor cantidad de energía son las de diámetros entre 0.1 a 1  $\mu\text{m}$ .

Estas influyen sobre los materiales. Entre los efectos que pueden tener sobre estos se encuentran:

- ✓ **Abrasión:** realizadas por aquellas partículas de mayor tamaño y dotadas de elevadas velocidades (efecto de pequeña incidencia).
- ✓ **Ataque químico:** puede realizarse directamente por las partículas o generalmente por los gases existentes conyugalmente tras el efecto de abrasión realizado por las partículas.

Los efectos que producen sobre la vegetación pueden considerarse como muy pequeños y prácticamente inexistentes. Tan solo pueden cifrarse como peligrosos aquellos que se derivan para zonas muy próximas a puntos de producción de partículas de cantidades notables.

Las partículas solas o en combinación con otros contaminantes representan un peligro muy grave para la salud.

### 3.5. Impacto en el hombre

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



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

Las partículas superior a  $5\mu\text{m}$  de diámetro quedan detenidas en los vellos de la cavidad nasal y también pueden quedar atrapados por la mucosa que tapiza la traquea y la cavidad nasal. Los comprendidos entre  $0.5-5\mu\text{m}$  son capaces de penetrar hasta el sistema respiratorio inferior depositándose en los bronquios. De aquí que en la mayoría de los casos sean eliminados al cabo de pocas horas por espiración.

La situación más preocupantes corresponde a las partículas menores de  $0.5\mu\text{m}$  ya que se ha estimado que más del 50% de las partículas de  $0.01-0.1\mu\text{m}$  que penetra en los alvéolos se depositan allí, donde es más difícil eliminarlos por carecer de cilios y mucosa, pudiendo permanecer durante meses e incluso años degradando la salud del hombre.

Las partículas de pequeño tamaño generalmente menores de  $10\mu\text{m}$  de diámetro son de gran importancia porque dado su tamaño permanecen en el aire mucho tiempo antes de sedimentarse.

Las partículas pueden tener un efecto toxico de unas o más de las maneras siguientes:

- ✓ Pueden ser intrínsecamente tóxicas por sus características inherentes químicas.
- ✓ 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.

De acuerdo con la forma de acción biológica sobre el organismo humano, los polvos industriales se clasifican en:

- ✓ **Polvos inertes:** Son aquellos que no provocan reacción aparente en los depósitos linfáticos pulmonares, pero obstruyen el flujo normal de la linfa.

- ✓ **Polvos tóxicos:** Son los que ocasionan daños en unos o varios órganos y sistemas linfáticos pulmonares, pero obstruyen el flujo normal de la linfa.
- ✓ **Polvos alergenitos:** Son los causantes de afecciones alérgicas, sus efectos dependen en gran medida de la susceptibilidad del individuo.
- ✓ **Polvos fibrogénicos:** Ocasionan fibrosis pulmonar característica de la neumoconiosis.

Los elementos metálicos que se relacionan en este trabajo tienen las siguientes características toxicológicas sobre el hombre.

**Níquel:** La aspiración de aerosoles ricos en sales solubles de níquel puede provocar corizas crónicas y sinusitis. A pesar que la dermatitis de níquel es provocada normalmente a través de contacto externo con aleaciones de níquel o sales se ha reportado también reacciones alérgicas en pacientes sensibles. Al níquel también se le atribuyen propiedades cancerígenas, actuando fundamentalmente sobre los pulmones.

**Cobalto:** Presenta propiedades dañinas sobre el riñón, también se le atribuyen la aparición de dermatitis por ser altamente irritante, además se ha reportado que provoca cambios hematológicos, digestivos y pulmonares.

**Hierro:** Los polvos finos de óxido de hierro son inertes y pueden como máximo interrumpir las funciones de los órganos respiratorios.

**Cobre:** La inhalación de vapores de cobre es peligrosa para diferentes órganos como el páncreas y los pulmones, algunos de los compuestos del cobre son irritantes de la piel y de la conjuntiva lo cual a la base de algunos procesos alérgicos y los óxidos de cobre son irritantes de los ojos y el tacto respiratorio.

**Zinc:** No es intrínsecamente un metal tóxico, pero la exposición a los compuestos de zinc causa daños a la membrana mucosa.

**Manganeso:** La exposición a los polvos de manganeso provoca la aparición de diversas infecciones respiratorias.

**Causas:**

Los principales problemas detectados en relación con el medio ambiente en la planta de Hornos de reducción comienzan en los silos. En esta área se producen emanaciones de polvo principalmente en las bombas por los sellos de las mismas, así como existen salideros en la parte superior de los silos (rajaduras), y esto ocurre cuando los silos son llenados a máxima capacidad; esta contaminación afecta el área de trabajo. La limpieza que se realiza en esta parte es manual.

En la planta de Hornos la contaminación es provocada por salideros de mineral, en romanas, alimentadores, sinfines de polvos etc. El derrame de mineral cae a los pisos inferiores y éste es eliminado mediante el soplado con aire lo que provoca contaminación en el área y en el exterior de la planta.

El derrame y salideros de mineral en la planta por los sellos de los transportadores, cae a la planta baja, este mineral se somete a la limpieza con agua y es trasladado por canales hacia tres pozos (uno para cada 8 hornos). Mediante bombas la pulpa se envía hacia la canalización oeste de la fábrica, que lo descarga al río Moa (este residual contiene gran cantidad de sólidos y grasas) sin tratamiento previo.

Otro foco de contaminación es provocados por los salideros de gases (escotilla, mirillas, cámaras, sellos de los transportadores) estos gases contienen: CO<sub>2</sub>, CO, H<sub>2</sub>, y son expulsados a la atmósfera y al área de trabajo por las variaciones de presión dentro del horno. Se requiere hacer un monitoreo sistemático de monóxido de carbono en el área de trabajo.

Los gases de la planta son ventilados hacia secaderos y parte oeste de trabajo de la planta, cuando cambia el sentido del aire estos gases afectan la fábrica en general y áreas aledañas (CIL, Base de Apoyo y Aseguramiento de Punta Gorda).

El agua en la piscina de los enfriadores se contamina con polvo y grasa por los salideros de los sellos del enfriador del mineral y por las grasas de la transmisión del mismo que necesita para su movimiento. También el agua en la piscina puede ser

afectada por la rajadura del shell lo cual permite la entrada de agua al interior del mismo. Otra afectación que provoca este equipo es la salida del mineral a una temperatura por encima de los 200 °C, que trae consigo la revaporización del licor fresco a la atmósfera en la sección de contacto.

Según estudios realizados en la planta de Hornos de Reducción, las pérdidas de partículas y concentración de gases emitidas por el SLG y hornos al espacio en el año que transcurrió, se muestra a continuación en la tabla 3.8.

**Tabla 3.8. Valores de las pérdidas de partículas y concentración de gases emitidas por el SLG y hornos al espacio**

<b>Año 2011</b>	<b>Pérdidas por SLG de hornos</b>	<b>Pérdidas por hornos al espacio</b>
Enero	794.24	440.27
Febrero	606.63	431.22
Marzo	112.14	435.79
Abril	168.75	319.05
Mayo	1476.55	666.13
Junio	1389.47	332.15
Julio	699.68	306.42
Agosto	174.27	182.87
Septiembre	1084.28	373.47
Octubre	1687.88	139.77
Noviembre	1161.09	397.92
Diciembre	0.00	0.00

A continuación se muestra en el gráfico el comportamiento de las pérdidas de partículas y gases que se emiten por los SLG y horno al espacio,

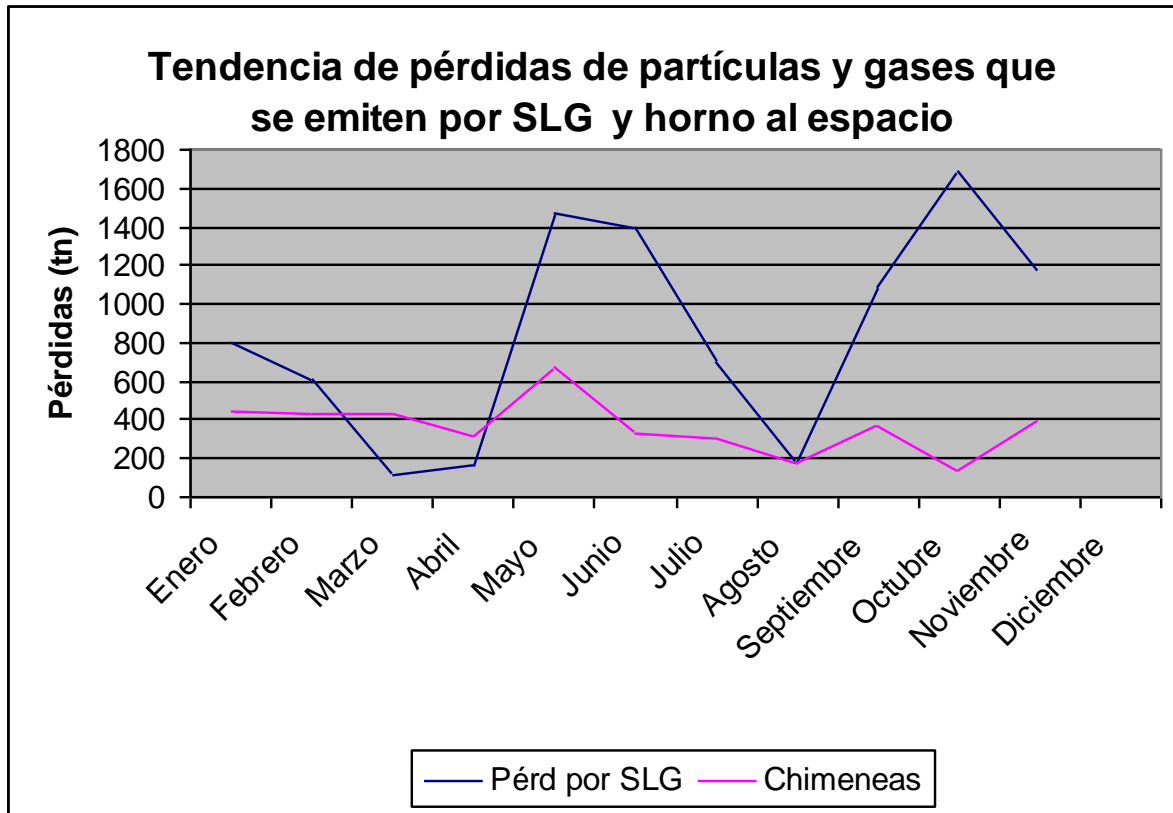


Figura: 3.1. Tendencia de pérdidas de partículas y gases que se emiten por SLG y horno al espacio

### 3.6. Conclusiones.

1. Se demuestra que por ineficiencia del SLG y por sobre producción la planta tiene una pérdida económica de \$ 1005,66 por mineral que se va por chimenea.
2. En estudio realizado se demostró que bajando el contenido de CO desde 3,0% hasta 1,0-1,5%, disminuye el consumo de petróleo de 54 a 50 kg por tonelada de mineral seco.
3. Se hizo un balance del consumo energético de los electrofiltros de horno y se demostró que estos consumen 5MW/h con un costo económico equivalente a 947,5 cuc/h.
4. Se demostró para la eliminación del daño que las emanaciones de polvo provoca a la salud humana y al medio ambiente, es factible tener en cuenta el estudio realizado en el SLG.

A decorative border in a dark teal color frames the page. It consists of two parallel lines with ornate, leaf-like flourishes at the corners and midpoints.

# Conclusiones

## CONCLUSIONES

Después de analizar los resultados de los cálculos del capítulo 2 se llegaron a las siguientes conclusiones:

- ✓ El Sistema de Limpieza de Gases de la planta de Hornos de Reducción para la producción actual mantiene un comportamiento eficiente, lo que no conlleva a realizar alguna modificación a la misma.
- ✓ Los ventiladores del sistema de limpieza de gases para la producción actual tienen un punto de trabajo ( $37500 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $200,76 \text{ mm H}_2\text{O}$ ) los cuales trabajan dentro del rango permisible dado por el fabricante ( $39500 \text{ m}^3/\text{h}$ ;  $1,70 \text{ kPa}$ ).
- ✓ Los ciclones cumplen con la condición de trabajo de velocidad, los cuales se encuentran actualmente funcionando para una velocidad de  $2,765 \text{ m/s}$ , incluida dentro del rango optimo.
- ✓ Según los cálculos la chimenea en la actualidad tiene un tiro de  $74,628 \text{ mm H}_2\text{O}$  lo que para la condición de trabajo es eficiente.
- ✓ La capacidad actual de los transportadores KIIC-300 es de ( $Q_{inst.transp.} = 13,311t/h$ ) y este descarga a otro transportadores KIIC-320  $Q_{inst.transp.} = 17,038t/h$  lo que demuestra que los transportadores del Sistema de Limpieza de Gases son efectivo en su trabajo demandado.

A decorative border in a dark teal color, consisting of two parallel lines. The corners are adorned with intricate, symmetrical scrollwork designs.

# Recomendaciones



**RECOMENDACIONES**

De acuerdo a lo expuesto anteriormente en las conclusiones en cuanto a las producciones futuras se recomienda:

- ✓ Evaluar la posibilidad de incrementar la temperatura de los gases a la salida de la chimenea en vista a un mejoramiento de las condiciones del tiro para las producciones futuras
- ✓ Hacer un estudio detallado del transportador de rastrillo para elevar su velocidad y ver los factores que actúan en el aumento de la misma.
- ✓ Capacitar el personal de operación y de mantenimiento del sistema de limpieza de gases en cuanto al comportamiento del mismo en el aumento de la producción.
- ✓ Evaluar la sustitución de los sistemas de captación de partículas finas (electrofiltros) por otros de mayor eficiencia ya que los instalados se encuentran en un estado deplorable y su eficiencia de captación ha disminuido considerablemente.

A decorative border in a dark teal color, consisting of two parallel lines. The corners are adorned with intricate, symmetrical scrollwork and floral motifs.

# Bibliografía

**BIBLIOGRAFÍA**

1. ALBERTI, E (1991). 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. CRAWLEY, M; J. BELL (2002). The application of life cycle cost analysis to pneumatic conveying systems. <http://www.macawber.com>. July.
4. DYNAMIC, AIR (2002). Sistemas de transporte neumático en fase densa. <http://www.dinamicair.com>. July.
5. FARNISH, R.(2002). Wear in lean – phase pneumatic conveying pipelines. <http://www.powderanbulk.com>. September.
6. FERNANDEZ P. F. (2008). Aproximación funcional mediante redes de funciones de base radial, una alternativa para la predicción en el proceso de reducción de mineral de la tecnología Caron de producción de Níquel. Tesis doctoral. Universidad de Holguín y Universidad de Granada. 146p, Granada.
7. 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.
8. GORDÓN, G. M (1981). Captación de polvos y purificación de gases en lá metalurgia de metales no ferroso. Editorial MIR, 391 pp. Moscú.
9. GUZMAN D.(2001). Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal. Tesis doctoral. ISMMANJ Moa, Cuba. 124p.
10. HAYES, J; A. R. REED; M. S. BRADLEY (1993). Economics of pneumatic conveying systems. Powder handling processing. 5(1): 1 – 5.

11. HETTIARATCHI, K; S. WOODHEAD (1998). Comparison between pressure drop in horizontal and vertical pneumatic conveying pipelines. *Powder technology*, 95: 67 – 73. USA
12. HUI L; Y. TOMITA. (2000). "Particle Velocity and Concentration Characteristics in a Horizontal Dilute Swirling Flow Pneumatic Conveying". *Power Technology*. 107 (2): 144 – 152.
13. 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.
14. HUTTL T; J. HERNANDO; C. H. RIBEIRO; C. WAGNER. (2002). Analysis of particle trajectories and turbulence structures in fully developed pipe flow by means of direct numerical simulation. <http://www.irz-muenchen.de/projekte/hlr-projects.pdf>. November.
15. 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.
16. MASON, D; P. (1998). Marjanovic; A. Levy. A simulation system for pneumatic conveying systems. *Powder Technology*. 95 (1): 7 – 14.
17. 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.
18. MESAROVICH, M. (1996). Fundamentación de la Teoría General de los Sistemas. Editorial MIR. URSS, pp. 422-436.
19. MIYOSHI, A; T. KAWAGUCHI; T. TANAKA; Y. TSUJI. (1999). "Effect of Pulsation Frequency and Bed Height on Granular Flow Pattern in Two-Dimensional Pulsating Fluidized Bed". *Proc. of Asian Symp. On Multiphase Flow 1999 (ASMF'99)*,: 13 -18. Takatsuki, Japan.

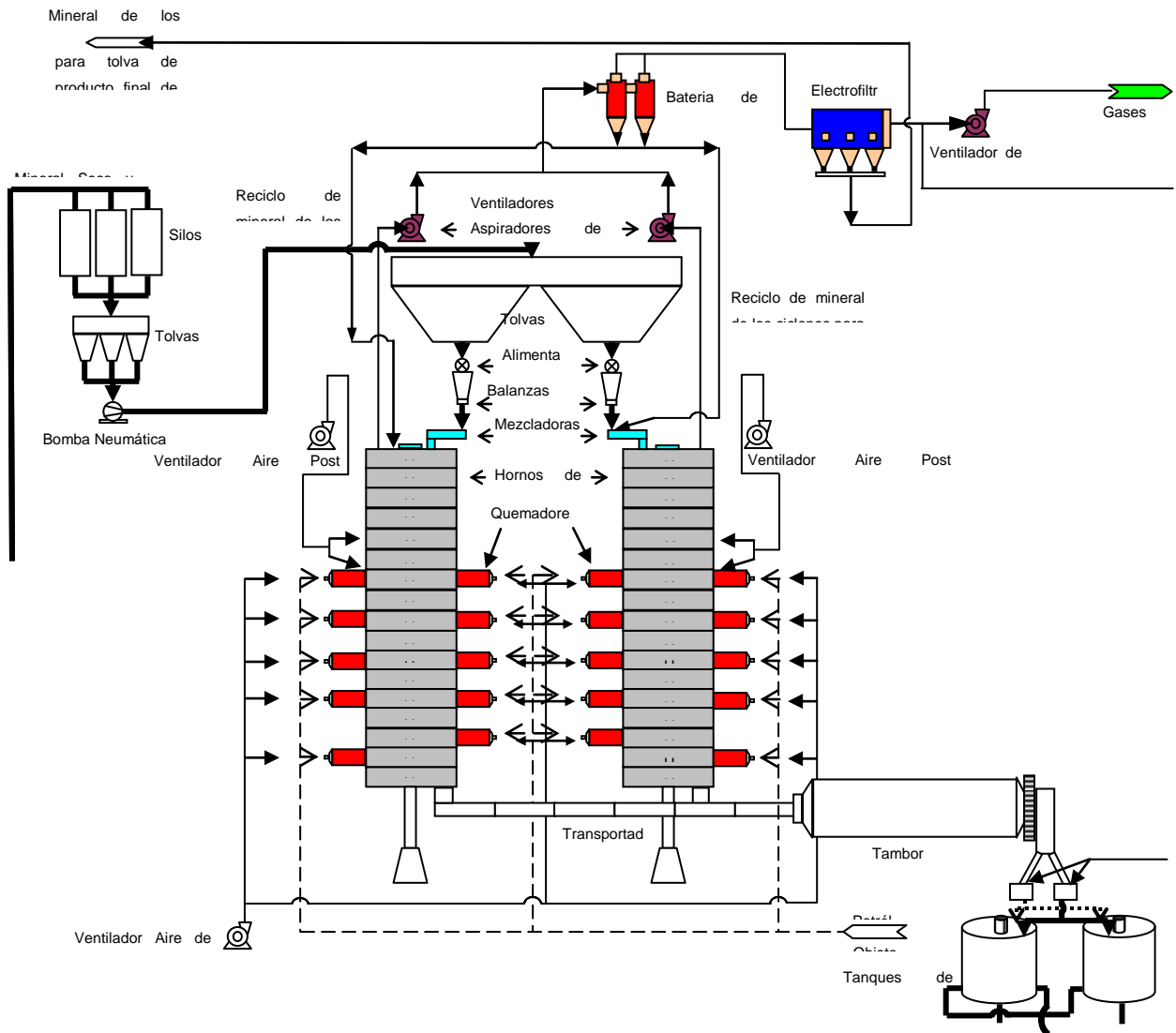
20. NEIDIGH S. (2002). Introduction to the theoretical and practical principles of pneumatic conveying. <http://www.porttechnology.org/journals/ed12/pdfs/pt12-235.pdf>. November.
21. PACHECO BERLOT, P. (1984). Ecuaciones para el diseño de instalaciones a transporte neumático por tuberías verticales de materiales polvorientos, granulados, polimorfos y polidispersos. Tesis doctoral. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. 120p.
22. PAN, R; P. WYPYCH. (1997). Scale – up procedures for pneumatic conveying design. Powder handling processing. 4(2): 167 – 172.
23. PAN, R; P. WYPYCH. SCALE (1992) – up procedures for pneumatic conveying design. Powder handling processing. 4(2): 167 – 172.
24. PAUL, S. (1999). What is Dense Phase Conveying?. <http://www.powderandbulk.com>. March.
25. RAHEMAN, H; V. K. JINDAL. (1993). Slip velocity in pneumatic conveying of agricultural grains. Powder technology. 5 (1): 60 – 67.
26. REED, R; BRADLEY, M. (1991). Advances in the Design of Pneumatic Conveying Systems. Bulk solids handling. 11(1): 93 – 98.
27. RODES, M. (2001). Pneumatic Transport of Powders. <http://www.erpt.org>. Octubre.
28. SINGER T. (2002). You too, can select a pneumatic conveying system. <http://www.powderanbulk.com>. September.
29. 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
30. TORRES, E. (2000). Comportamiento del transporte neumático de partículas en secadores rotatorios. Minería y Geología. 17(2): 73 – 77.

31. TORRES, E. (2001). Humedad de equilibrio y coeficiente de transferencia de masa para el secado y transporte neumático del mineral laterítico de la empresa "Comandante Ernesto Che Guevara". *Minería y Geología*. 18 (3): 66 – 71.
32. TORRES, E. (2002). Características físicas y aerodinámica del mineral laterítico utilizado en los sistemas de transporte neumático de la industria del níquel. *Memorias de la tercera conferencia internacional CINAREM*. Moa, Holguín.
33. WEBER, M. (1991). Friction of the Air and the Air/Solid Mixture in Pneumatic Conveying. *Bulk solids handling*. 11(1): 99 – 102.
34. 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.
35. YAMAMOTO, Y; T. TANAKA; Y. TSUJI. (1998). "Effect of Spatial Resolution of LES on Particle Motion," *Proc. of FEDSM'98*. 1 – 8. Washington DC, USA.

A decorative border in a dark teal color, consisting of two parallel lines. The corners are adorned with ornate, symmetrical flourishes that resemble stylized leaves or scrolls.

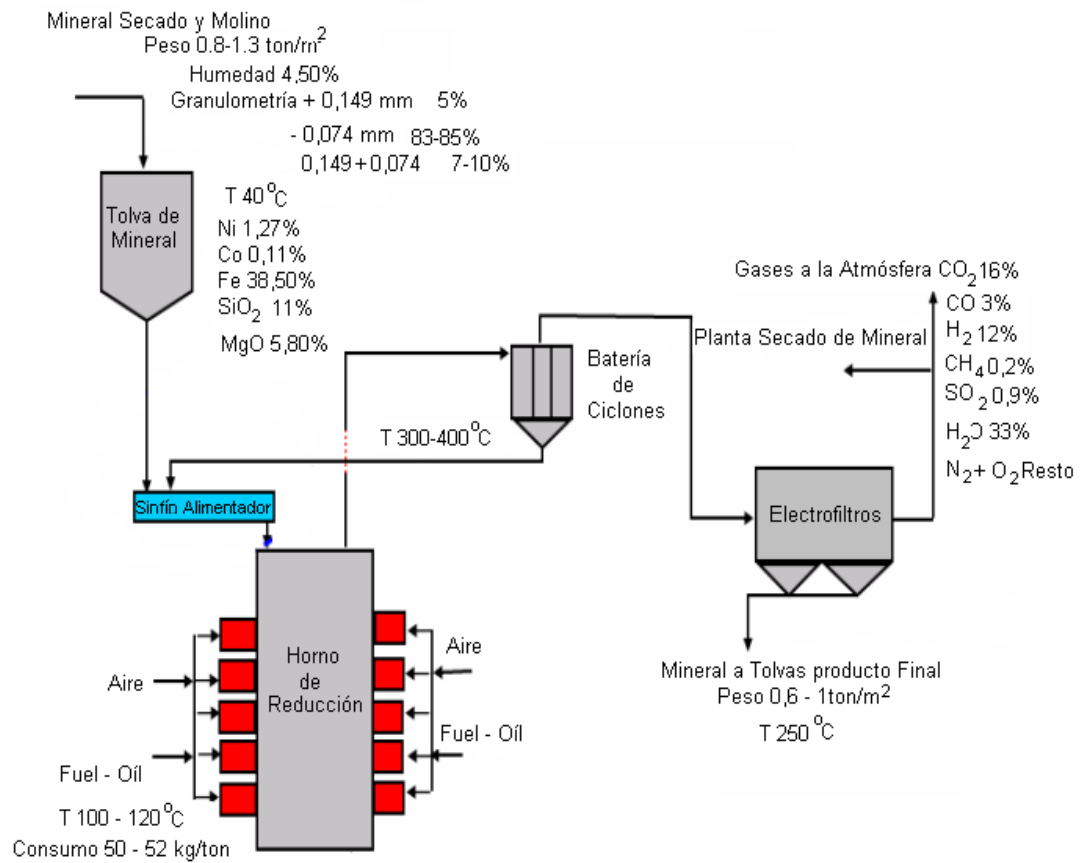
**Aretos**

### Anexo 1. Flujo Tecnológico de la Planta de Hornos de Reducción de Mineral





**Anexo 2. Flujo Tecnológico del Sistema de Limpieza de Gases del proceso de Reducción de Mineral.**



**Anexo 3. Esquema de Cálculo de la Planta de Hornos de Reducción.**

<b>Muestra 1 de la Planta de Horno (Entrada a los Horno) masa: 100 g.</b>										
<b>Muestra</b>	<b>Mallas</b>									
	<b>100</b>		<b>170</b>		<b>200</b>		<b>325</b>		<b>-325</b>	
	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>
1	4.37	4.37	6.94	6.94	0.47	0.47	2.53	2.53	85.54	85.54
2	8.53	8.53	10.42	10.42	2.49	2.49	0.66	0.66	77.75	77.75
3	4.48	4.48	7.46	7.46	1.83	1.83	0.25	0.25	85.83	85.83
4	7.49	7.49	11.68	11.68	0.68	0.68	3.08	3.08	76.92	76.92
5	7.99	7.99	9.14	9.14	1.31	1.31	1.60	1.60	79.81	79.81
6	5.23	5.23	10.37	10.37	2.02	2.02	1.76	1.76	80.47	80.47
7	4.89	4.89	8.56	8.56	1.93	1.93	2.32	2.32	82.15	82.15
<b>Prom.</b>	<b>6.14</b>	<b>6.14</b>	<b>9.22</b>	<b>9.22</b>	<b>1.53</b>	<b>1.53</b>	<b>1.74</b>	<b>1.74</b>	<b>81.21</b>	<b>81.21</b>
<b>Muestra 2 de la Planta de Horno (Salida de los Enfriadores) masa: 100 g.</b>										
<b>Muestra</b>	<b>Mallas</b>									
	<b>100</b>		<b>170</b>		<b>200</b>		<b>325</b>		<b>-325</b>	
	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>
1	10.58	10.58	11.33	11.33	0.63	0.63	5.53	5.53	71.78	71.78
2	18.63	18.63	12.56	12.56	1.28	1.28	5.18	5.18	62.20	62.20
3	11.45	11.45	10.47	10.47	1.13	1.13	4.64	4.64	72.16	72.16
4	12.55	12.55	10.93	10.93	1.51	1.51	4.85	4.85	70.01	70.01
5	13.26	13.26	12.87	12.87	1.19	1.19	5.12	5.12	67.41	67.41
6	10.80	10.80	9.83	9.83	0.98	0.98	4.12	4.12	74.12	74.12
7	15.81	15.81	15.53	15.53	1.39	1.39	6.74	6.74	60.38	60.38
<b>Prom.</b>	<b>13.30</b>	<b>13.30</b>	<b>11.93</b>	<b>11.93</b>	<b>1.16</b>	<b>1.16</b>	<b>5.17</b>	<b>5.17</b>	<b>68.29</b>	<b>68.29</b>
<b>Muestra 3 de la Planta de Horno (Salida de los Ciclones) masa: 100 g.</b>										
<b>Muestra</b>	<b>Mallas</b>									
	<b>100</b>		<b>170</b>		<b>200</b>		<b>325</b>		<b>-325</b>	
	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>
1	0.10	0.10	0.96	0.96	0.33	0.33	1.06	1.06	97.38	97.38
2	0.00	0.00	0.76	0.76	0.09	0.09	1.49	1.49	97.54	97.54
3	0.09	0.09	0.83	0.83	0.12	0.12	1.60	1.60	97.21	97.21
4	0.00	0.00	0.87	0.87	0.36	0.36	1.07	1.07	97.58	97.58
5	0.04	0.04	0.74	0.74	0.38	0.38	1.40	1.40	97.27	97.27
6	0.05	0.05	1.13	1.13	0.36	0.36	1.22	1.22	97.08	97.08
7	0.02	0.02	0.39	0.39	0.26	0.26	1.21	1.21	98.00	98.00
<b>Prom.</b>	<b>0.04</b>	<b>0.04</b>	<b>0.81</b>	<b>0.81</b>	<b>0.27</b>	<b>0.27</b>	<b>1.29</b>	<b>1.29</b>	<b>97.44</b>	<b>97.44</b>
<b>Muestra 4 de la Planta de Horno (Salida de los Electrofiltro) masa: 100 g.</b>										
<b>Muestra</b>	<b>Mallas</b>									
	<b>100</b>		<b>170</b>		<b>200</b>		<b>325</b>		<b>-325</b>	
	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>	<b>masa</b>	<b>%</b>
1	0.08	0.08	0.06	0.06	0.01	0.01	0.13	0.13	99.62	99.62
2	0.17	0.17	0.07	0.07	0.01	0.01	0.11	0.11	99.51	99.51
3	0.13	0.13	0.00	0.00	0.00	0.00	0.15	0.15	99.63	99.63
4	0.06	0.06	0.00	0.00	0.00	0.00	0.13	0.13	99.70	99.70
5	0.17	0.17	0.00	0.00	0.00	0.00	0.12	0.12	99.62	99.62
6	0.03	0.03	0.12	0.12	0.02	0.02	0.22	0.22	99.50	99.50
7	0.11	0.11	0.03	0.03	0.00	0.00	0.09	0.09	99.65	99.65
<b>Prom.</b>	<b>0.11</b>	<b>0.11</b>	<b>0.04</b>	<b>0.04</b>	<b>0.01</b>	<b>0.01</b>	<b>0.14</b>	<b>0.14</b>	<b>99.60</b>	<b>99.60</b>

<b>Mallas</b>	<b>100</b>	<b>170</b>	<b>200</b>	<b>325</b>	<b>-325</b>	<b>Total</b>
---------------	------------	------------	------------	------------	-------------	--------------

Masa Total (gr)	13.45	12.78	1.44	6.60	265.33	299.59
Masa Total (%)	4.48	4.26	0.48	2.20	88.44	99.86
Masa arr. (gr)	0.15	0.85	0.28	1.43	197.04	199.75
Masa arr. (%)	1.12	6.65	19.44	21.67	74.26	24.83

Den polvo(kg/m3)	P (kg/h)	Qmtparr(kg/h)	Qvtparr(m3/h)	QTgss (m3/h)	Xparr(%)	X'polvo	X'gases
850	19000	4679.70	5.51	30023	0.018353	0.000184	0.99982
Pe (mmHg)	DTgccn(kg/m3)	Drgc (kg/m3)	v(m <sup>2</sup> /s)	Drgss(kg/m3)	μ(kg*s/m <sup>2</sup> )	Tgss (°C)	Drg(kg/m3)
16.477	1.23659	0.506	3.67E-05	0.662	2.428E-05	380	0.506

Gases	Dgccn(kg/m <sup>3</sup> )	Q(m <sup>3</sup> /h)	%CEG	X'CEG	DTgccn(kg/m <sup>3</sup> )	Tgcn (k)
CO2	1.963	113.100	20.233	0.20233	0.39717	273
SO2	2.926	6.300	1.127	0.01127	0.03298	273
N2	1.25	320.587	57.350	0.57350	0.71688	273
O2	1.429	24.756	4.429	0.04429	0.06329	273
H2	0.0899	0.300	0.054	0.00054	0.00005	273
CO	0.00484	82.066	14.681	0.14681	0.00071	273
H2O	1.25	11.410	2.041	0.02041	0.02551	273
Total		559	99.91500		1.23659	273

Diámetro Nominal y Cantidad de Accesorios en la Línea # 1 de la Planta de Horno de Reducción										
Tramos	Dnom.	Codos90	Codos30	Codos45	Red.	Exp.	Vál.	T.Ramal	Coef. E	Coef. S
T1	1.020	1	0	0	1	0	0	0	1	1
T2	0.920	3	0	1	0	2	1	0	2	2
T3	1.620	0	0	1	1	0	1	0	1	0
T4	2.200	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T5	2.220	0	0	0	0	0	0	0	0	0
T6	1.220	2	1	0	0	1	1	0	1	1
T7	1.620	1	0	1	0	1	0	0	0	0
T8	2.420	0	0	0	0	1	0	1	0	1
Total		7	1	3	2	5	3	1	5	5

Cálculo de los coeficientes de pérdidas (K) para cada accesorio en la Línea # 1 de la Planta de Horno de Reducción										
Tramos	Dnom.	Codos90	Codos30	Codos45	Red.	Exp.	Vál.	T.Ramal	Coef. E	Coef. S
T1	1.020	0.370	0.000	0.000	0.1102	0.000	0.000	0.000	0.780	1.000
T2	0.920	0.270	0.000	0.590	0.000	0.0802	0.250	0.000	0.780	1.000
T3	1.620	0.000	0.000	0.450	0.0866	0.000	0.250	0.000	0.780	0.000
T4	2.200	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
T5	2.220	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000	0.000
T6	1.220	0.340	0.215	0.000	0.000	0.1182	0.250	0.000	0.780	1.000
T7	1.620	0.350	0.000	0.340	0.000	0.1553	0.000	0.000	0.000	0.000
T8	2.420	0.000	0.000	0.000	0.000	0.0002	0.000	0.280	0.000	1.000
<b>Total</b>		1.330	0.215	1.380	0.1968	0.3539	0.750	0.280	3.120	4.000

Longitudes Equivalentes (m) en la Línea # 1					Velocidad, Reynolds y Coeficiente de fricción				
Tramos	Tramo Rect.	Long.Acc.	Long.Total	Long T Ref.	V(m/s)	Re	e (m)	d/e	Coef.fricc
T1	5.200	139.721	144.921	86.511	10.21	283766	0.0002	5100	0.01650
T2	40.800	170.787	211.587	211.587	12.55	314605	0.0002	4600	0.01600
T3	9.700	190.819	200.519	11.845	4.05	178774	0.0002	8100	0.01330
T4	19.300	0.000	19.300	0.247	2.19	131281	0.0002	11000	0.01300
T5	6.100	0.000	6.100	0.075	2.15	130054	0.0002	11100	0.01400
T6	26.800	227.442	254.242	61.999	7.13	237019	0.0002	6100	0.01450
T7	40.400	101.436	141.836	8.378	4.05	178774	0.0002	8100	0.01350
T8	55.500	238.314	293.814	2.333	1.81	119351	0.0002	12100	0.01300
<b>Total</b>			72.711	310.263	5.52	196703	0.0002	8275	0.01423

Tramos	Diámetro	Q actual	V Actual
T1	1.020	30023	10.206
T2	0.920	30023	12.545
T3	1.620	120092	16.184
T4	2.200	240183	17.551
T5	2.220	120092	8.618
T6	1.220	60046	14.268
T7	1.620	120092	16.184
T8	2.420	240183	14.505
Ciclones	0.800	5003.8	2.765
Elect.	0.000		
<b>Promedio</b>		107304	13.758

Punto de trabajo del ventilador					Cálculo del diámetro de la partícula en el interior del Horno						
Producción	Q (m³/h)	Rend vent (%)	H (mmH₂O)	Na (Kw)	L Hor (m)	D Hor(m)	A (m²)	V (m/s)	D par(m)	D par(mm)	D par(µm)
<b>Actual</b>	37500	0.675	200.760	30.374	23.5	6.8	36.317	0.230	0.000110	0.110	110

Cálculo del tiro de la Chimenea									
Producción	Qch(m³/h)	Vgch(m/s)	Re (ch)	Coef. fric	Leqch (m)	LTch(m)	ΔHch(mmH₂O)	TR(mmH₂O)	
<b>Actual</b>	720552	10.194	1388791	0.0125	9.084	129.084	1.131	74.628	

Daire (kg/m <sup>3</sup> )	Acgrav. (m/s <sup>2</sup> )	Hchim (m)	Dchim (m)	dchim (m)	Tiro (mmH <sub>2</sub> O)	Ach (m <sup>2</sup> )	e (m)	Deqch/e
1.293	9.81	120	13	5	75.759	19.635	0.006	833

Curva Característica del Ventilador y Cálculo de las pérdidas en Cada Tramo							
C(Q) <sup>2</sup>	BQ	A	H	MS	C	B	A
0	0	1	215	-2.1 <sup>+14</sup>	-1.6 <sup>-08</sup>	-0.00039	215
9000000000	30000	1	189.21				
100000000000	100000	1	20.196				

Producción Actual				
Q(t/año)	Q(t/días)	Q(t/horas)	Q(t/Hor.)	24,63%Q(t/Hor)
3311192.400	9071.760	377.990	18.900	4.65

Capacidad del Transportador chiquito de paletas hundidas (KPC-300)							
L(m)	T(s)	Vtr (m/s)	ac (m)	bc (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	ap (m)	
1	8	0.13	0.320	0.410	0.1312	0.290	
bp (m)	Ap (m <sup>2</sup> )	coefc. Llen	C <sub>3</sub>	Q(tn/h)	Qparr	Condición	Qarr(t/h)
0.060	0.0174	1	1	13.311	4.655	es suficiente	18.900

Capacidad del Transportador grande de paletas hundidas (KPC-320)							
L(m)	T(s)	Vtr (m/s)	ac (m)	bc (m)	Ac (m <sup>2</sup> )	ap (m)	
4	24.5	0.16	0.320	0.410	0.1312	0.290	
bp (m)	Ap (m <sup>2</sup> )	coefc. Llen	C <sub>3</sub>	Q(t/h)	Qparr	Condición	Qarr(t/h)
0.060	0.0174	1	1	17.038	4.655	es suficiente	18.900

**Cálculo de altura de la Red**

Q (m3/h)	H <sub>1vent.</sub>	4Q	H <sub>4vent.</sub>	8Q	H <sub>8vent.</sub>	2Q
0	215.0	0	215.0	0	215.0	0.0
2500	213.9	10000	213.9	20000	213.9	5000.0
5000	212.6	20000	212.6	40000	212.6	10000.0
7500	211.2	30000	211.2	60000	211.2	15000.0
10000	209.5	40000	209.5	80000	209.5	20000.0
12500	207.7	50000	207.7	100000	207.7	25000.0
15000	205.6	60000	205.6	120000	205.6	30000.0
17500	203.4	70000	203.4	140000	203.4	35000.0
20000	200.9	80000	200.9	160000	200.9	40000.0
22500	198.3	90000	198.3	180000	198.3	45000.0
25000	195.5	100000	195.5	200000	195.5	50000.0
27500	192.4	110000	192.4	220000	192.4	55000.0
30023	189.2	120092	189.2	240183	189.2	60045.8
32500	185.8	130000	185.8	260000	185.8	65000.0
35000	182.2	140000	182.2	280000	182.2	70000.0
37500	178.4	150000	178.4	300000	178.4	75000.0
40000	174.4	160000	174.4	320000	174.4	80000.0
42500	170.2	170000	170.2	340000	170.2	85000.0
45000	165.8	180000	165.8	360000	165.8	90000.0
47500	161.2	190000	161.2	380000	161.2	95000.0
50000	156.5	200000	156.5	400000	156.5	100000.0
52500	151.5	210000	151.5	420000	151.5	105000.0
55000	146.3	220000	146.3	440000	146.3	110000.0
57500	141.0	230000	141.0	460000	141.0	115000.0
60000	135.4	240000	135.4	480000	135.4	120000.0
62500	129.7	250000	129.7	500000	129.7	125000.0
65000	123.7	260000	123.7	520000	123.7	130000.0
67500	117.6	270000	117.6	540000	117.6	135000.0
70000	111.3	280000	111.3	560000	111.3	140000.0
72500	104.8	290000	104.8	580000	104.8	145000.0
75000	98.0	300000	98.0	600000	98.0	150000.0
77500	91.1	310000	91.1	620000	91.1	155000.0
80000	84.0	320000	84.0	640000	84.0	160000.0
82500	76.7	330000	76.7	660000	76.7	165000.0
85000	69.2	340000	69.2	680000	69.2	170000.0
87500	61.6	350000	61.6	700000	61.6	175000.0
90000	53.7	360000	53.7	720000	53.7	180000.0
92500	45.6	370000	45.6	740000	45.6	185000.0
95000	37.3	380000	37.3	760000	37.3	190000.0
97500	28.9	390000	28.9	780000	28.9	195000.0
100000	20.2	400000	20.2	800000	20.2	200000.0

H <sub>2vent</sub>	H <sub>f tra. 1-2</sub>	H <sub>ci.</sub>	H <sub>r (1 vent)</sub>	H <sub>r (4vent)</sub>	H <sub>r (8vent)</sub>	H <sub>r(2vent)</sub>
215.0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
213.9	0.20	0.45	0.64	0.10	0.01	0.14
212.6	0.79	1.79	2.58	0.40	0.03	0.56
211.2	1.77	4.03	5.80	0.91	0.07	1.25
209.5	3.15	7.16	10.31	1.61	0.13	2.22
207.7	4.92	11.19	16.11	2.52	0.21	3.47
205.6	7.09	16.11	23.19	3.63	0.30	5.00
203.4	9.64	21.93	31.57	4.94	0.40	6.81
200.9	12.60	28.64	41.23	6.45	0.53	8.89
198.3	15.94	36.24	52.19	8.17	0.67	11.25
195.5	19.68	44.75	64.43	10.09	0.82	13.89
192.4	23.81	54.14	77.96	12.20	0.99	16.81
189.2	28.38	64.53	92.92	14.54	1.19	20.04
185.8	33.26	75.62	108.88	17.04	1.39	23.48
182.2	38.57	87.70	126.28	19.77	1.61	27.23
178.4	44.28	100.68	144.96	22.69	1.85	31.26
174.4	50.38	114.55	164.93	25.82	2.10	35.56
170.2	56.88	129.32	186.19	29.15	2.37	40.15
165.8	63.77	144.98	208.74	32.68	2.66	45.01
161.2	71.05	161.54	232.58	36.41	2.97	50.15
156.5	78.72	178.99	257.71	40.34	3.29	55.57
151.5	86.79	197.33	284.12	44.48	3.62	61.26
146.3	95.25	216.57	311.83	48.81	3.98	67.24
141.0	104.11	236.71	340.82	53.35	4.35	73.49
135.4	113.36	257.74	371.10	58.09	4.73	80.02
129.7	123.00	279.67	402.67	63.03	5.14	86.83
123.7	133.04	302.49	435.53	68.18	5.55	93.91
117.6	143.47	326.20	469.68	73.52	5.99	101.27
111.3	154.30	350.81	505.11	79.07	6.44	108.92
104.8	165.51	376.32	541.83	84.82	6.91	116.83
98.0	177.13	402.72	579.85	90.77	7.40	125.03
91.1	189.13	430.02	619.15	96.92	7.90	133.50
84.0	201.53	458.21	659.74	103.27	8.41	142.26
76.7	214.32	487.29	701.61	109.83	8.95	151.29
69.2	227.51	517.27	744.78	116.59	9.50	160.59
61.6	241.09	548.15	789.23	123.54	10.07	170.18
53.7	255.06	579.92	834.98	130.71	10.65	180.04
45.6	269.43	612.58	882.01	138.07	11.25	190.18
37.3	284.19	646.14	930.33	145.63	11.87	200.60
28.9	299.34	680.60	979.94	153.40	12.50	211.30
20.2	314.89	715.95	1030.84	161.36	13.15	222.28

**Anexo 4. Vista de las emisiones de gases y polvos en la empresa “Comandante Ernesto Che Guevara”.**

