

**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**

MODELACIÓN MATEMÁTICA Y SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE NEUMÁTICO DEL MINERAL LATERÍTICO

**Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en
Ciencias Técnicas**

AUTOR: M. Sc. Ing. ENRIQUE TORRES TAMAYO

MOA – 2003

**REPÚBLICA DE CUBA
MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO
“Dr. ANTONIO NÚÑEZ JIMÉNEZ”
FACULTAD DE METALURGIA Y ELECTROMECAÁNICA
DEPARTAMENTO DE MECÁNICA**

MODELACIÓN MATEMÁTICA Y SIMULACIÓN DEL TRANSPORTE NEUMÁTICO DEL MINERAL LATERÍTICO

**Tesis presentada en opción al grado científico de Doctor en
Ciencias Técnicas**

AUTOR: M. Sc. Ing. Enrique Torres Tamayo

**TUTORES: Dr. C. RAFAEL PÉREZ BARRETO
Departamento de Ingeniería Eléctrica
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Instituto Superior Minero Metalúrgico**

**DR. C. RENÉ LESME JAÉN
Centro de Estudio de Eficiencia Energética
Facultad de Ingeniería Mecánica
Universidad de Oriente**

**DR. C. RAÚL IZQUIERDO PUPO
Departamento de Ingeniería Mecánica
Facultad de Metalurgia y Electromecánica
Instituto Superior Minero Metalúrgico**

MOA – 2003

Dedicatoria

A mis padres y a mi esposa,
por el inmenso amor que les profesó,
por todo tiempo que no pude dedicarles.

A toda mi familia.

A mis amigos.

A todos los que me quieren.

Agradecimientos

A la Revolución, por contribuir con mi formación y la realización de mis sueños.

A mis tutores: Dr. René Lésme Jaén; Dr. Raúl Izquierdo Pupo y Dr. Rafael Pérez Barreto, por la sabia y oportuna orientación.

A mis compañeros de los Departamentos de Mecánica y Metalurgia, por el constante apoyo y solidaridad.

A la licenciada Tania O. Tomasén por el tiempo dedicado a la corrección de la memoria y el aporte espiritual brindado.

Al Ing. Jorge Rodríguez Lores, Jefe de la planta de preparación del Mineral de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

A la dirección de la Facultad de Metalurgia y Electromecánica y del ISMMM, al Centro de Proyectos del Níquel, al Centro de Estudio de Eficiencia Energética de la Universidad de Oriente y a los directivos de las empresas Comandante Ernesto Che Guevara y Las Camariocas, por el financiamiento aportado para los Proyectos de Investigación.

Al Dr. Martin Rhodes, Jefe del Departamento de Ingeniería Química de la Universidad de Monash, Melbourne, Australia, por la ayuda y sugerencias en la culminación del trabajo.

A: Dr Benoit Oesterlé y Dr. Thierry Destoop del centro NEU TRANSF`AIR Rue du Collége, Marcq en Baroeul, Francia, por su revisión y oportunos señalamientos en el examen de la tesis.

Al Dr. Peter Wypych, director del Centro de Tecnología de la Partícula de la Universidad de Wollongong, Australia, por la revisión del diseño y resultados experimentales, así como las sugerencias hechas para mejorar la calidad de la investigación.

A mis amigos.

A aquellos que desinteresadamente colaboraron de una forma u otra en la realización exitosa de este trabajo.

A todos, MUCHAS GRACIAS

TABLA DE CONTENIDOS

	Pág.
SÍNTESIS	
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO - METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN	
1.1. Introducción	6
1.2. Trabajos precedentes	6
1.3. Estado actual del transporte neumático en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara	13
1.4. Propiedades físicas y aerodinámicas del mineral laterítico	14
1.5. Conclusiones del capítulo 1	28
CAPITULO 2. MODELACIÓN TEÓRICA EN EL TRANSPORTE NEUMÁTICO DEL MINERAL LATERÍTICO POR TUBERÍAS HORIZONTALES Y VERTICALES.	
2.1. Introducción	29
2.2. Pérdidas de presión para el aire limpio en el transporte neumático por tuberías horizontales y verticales	30
2.3. Ecuaciones tradicionales para el cálculo de las pérdidas de presión en tuberías horizontales y verticales en la zona dispersa	31
2.4. Modelo teórico para el cálculo de las pérdidas de presión en el transporte neumático del mineral laterítico por tuberías horizontales y verticales en la zona dispersa	34
2.4.1. Modelo teórico en fase densa	34
2.4.2. Modelo teórico en fase fluida	44
2.5. Ecuaciones para el cálculo de las pérdidas en codos durante el transporte neumático del mineral laterítico	47
2.5.1. Pérdidas en la zona curva del codo	49
2.5.2. Pérdidas en la zona de dispersión	49
2.6. Procedimiento para la solución del modelo matemático	50
2.7. Conclusiones del capítulo 2	52

CAPÍTULO 3. RESULTADOS EXPERIMENTALES Y OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO TEÓRICO EN EL TRANSPORTE NEUMÁTICO DEL MINERAL LATERÍTICO.

3.1. Introducción	53
3.2. Instalación experimental	53
3.3. Diseño experimental	55
3.4. Técnica experimental	58
3.5. Identificación del modelo matemático	59
3.5.1. Algoritmo de identificación del modelo	59
3. 6. Resultados experimentales y valores de los parámetros del modelo	60
3.7. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas para tuberías horizontales y verticales	64
3.8. Conclusiones del capítulo 3	73

CAPÍTULO 4. SIMULACIÓN EN EL TRANSPORTE NEUMÁTICO DEL MINERAL LATERÍTICO EN LA EMPRESA COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA.

4.1. Introducción	74
4.2. Simulación en el transporte neumático del mineral laterítico en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.	74
4.2.1. Simulación de las pérdidas de presión en función de la velocidad del gas en tuberías horizontales y verticales	75
4.2.2. Simulación de las características de transporte en tuberías horizontales y verticales	77
4.2.3. Simulación de las pérdidas en codos	80
4.2.4. Simulación de las características de transporte de los sistemas generales	82
4.3. Valoración económica.	85
4.4. Conclusiones del capítulo 4	92

CONCLUSIONES	93
-------------------------------	-----------

RECOMENDACIONES	94
----------------------------------	-----------

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	95
---	-----------

ANEXOS

INTRODUCCIÓN

La industria cubana del níquel juega un papel importante dentro de la economía nacional, es por ello que el incremento de la eficiencia de los diferentes equipos e instalaciones que la componen incide considerablemente en la reducción del consumo de portadores energéticos. Actualmente se encuentra enfrascada en dos grandes procesos: el de modernización de sus plantas, con el objetivo de disminuir los costos en la producción de cada tonelada de níquel, y el perfeccionamiento empresarial para hacerla más competitiva en el mercado internacional. Este último como proceso integral no puede soslayar el impulso tecnológico a partir de una aplicación consecuente de la ciencia y la técnica (Mesa Redonda, Enero 30 del 2001).

Existen dos fábricas en funcionamiento para la obtención de concentrado de níquel más cobalto con tecnología carbonato amoniacal y una tercera industria en fase de proyecto para obtener ferroníquel. Dentro de una fábrica metalúrgica concurren complejos sistemas que muestran diferentes comportamientos con dinámicas muy variadas, algunos de estos agregados ubicados en las plantas de preparación del mineral y hornos de reducción son los sistemas de transporte neumático.

El transporte neumático por sus múltiples ventajas constituye uno de los medios más avanzados de transporte de sólidos; el mismo se encuentra ampliamente aplicado en el ámbito mundial. En Cuba su uso hasta el momento se reduce a la industria del níquel y en menor medida al transporte de harina, cemento, entre otros; pero a partir de los pronunciamientos del IV Congreso del Partido Comunista de Cuba, donde se enfatiza en la necesidad de llevar a cabo una gran campaña de ahorro de energía y combustible, se hace necesario, de acuerdo con el nivel que ha alcanzado la industria del níquel y su posterior desarrollo: modernizar los medios de transporte neumático del mineral laterítico que contribuye a incrementar la productividad del trabajo, mejorar las condiciones higiénico – sanitarias de los trabajadores del níquel, reducir los gastos anuales y aportar otros beneficios a la sociedad.

En las empresas del níquel con tecnología carbonato amoniacal, aunque el transporte neumático presenta índices ecológicos superiores a otros transportadores

mecánicos su empleo se ha visto limitado por el excesivo gasto de energía que alcanza los 18,82 MJ/T. Las causas que originan esta dificultad son: la incorrecta selección de la velocidad del gas transportador, la existencia de los alimentadores sinfín y la infinita variedad de características físicas y aerodinámicas de los materiales a transportar, que conducen a la inexactitud de los proyectos de las instalaciones neumáticas derivadas de la ausencia de investigaciones científicas y trabajos experimentales en esta ciencia.

La modelación del transporte de flujos bifásicos gas - sólido en el transporte neumático del mineral laterítico y el cálculo de su pérdida de presión es una tarea novedosa; debido a las diferentes características físicas y aerodinámicas de los materiales que implican distintos tipos de flujos, cada uno requiere su propio modelo con el objetivo de proporcionar un método de cálculo específico. El transporte en fase fluida se recomienda para distancias superiores a un kilómetro y en longitudes menores a las anteriores se debe emplear, siempre que sea posible, el transporte en fase densa debido a su menor consumo energético. Todos los sistemas de transporte neumático de las empresas del níquel poseen distancias menores a los 600 metros.

La situación actual del transporte neumático en las plantas de preparación del mineral y hornos de reducción en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, se caracteriza por las siguientes deficiencias:

- La concentración a la que se produce el transporte neumático del mineral laterítico es baja (alrededor de 12,8 kg/kg).
- Las limitaciones de los métodos existentes para la proyección, selección y cálculo de los parámetros racionales de transporte neumático del mineral laterítico.

A partir de estas deficiencias se declara como **situación problemática actual:**

El elevado consumo energético en el transporte neumático del mineral laterítico en las plantas de preparación del mineral y hornos de reducción de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

El **problema científico** a investigar lo constituye:

El insuficiente conocimiento acerca del efecto de la velocidad del aire y la concentración de la mezcla sobre el consumo energético del transporte neumático del mineral laterítico en fases fluida y densa.

Como **objeto de la investigación** se establece:

El proceso de transporte neumático del mineral laterítico.

En la temática estudiada se presenta un problema interesante no abordado en la literatura hasta el momento que son los sistemas bifásicos sólido - gas en fases fluida y densa para este tipo de material. Se han desarrollado en el país investigaciones sobre el transporte neumático del bagazo en tuberías verticales, horizontales y codos (Pacheco 1984; Lesme 1996) para concentraciones encontradas en la llamada fase fluida, con lo que no se completa el sistema de conocimientos teóricos y empíricos para seleccionar los parámetros racionales del transporte del mineral laterítico y proyectar futuras instalaciones.

El conocimiento del proceso, el desarrollo de modelos matemáticos que representen los fenómenos físicos de los sistemas, la simulación en computadora de sus características y, en fin, el proyecto para la implementación de nuevas tecnologías es un tema de primordial importancia en el desarrollo actual del sector industrial.

Sobre la base del problema a resolver se establece la siguiente **hipótesis**:

El estudio de los fundamentos teóricos existentes, conjugado con métodos empíricos, permitirá obtener un modelo empírico – teórico, útil para predecir los valores satisfactorios de los parámetros de trabajo en los sistemas de transporte neumático del mineral laterítico en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Esta hipótesis científica exige la necesidad de conocer las principales propiedades físicas y aerodinámicas del material investigado: el mineral laterítico; así como a partir del modelo empírico - teórico simular las características de transporte y

seleccionar los parámetros racionales para un transporte eficiente en fase fluida o densa. Entonces se podrán proponer nuevas tecnologías que respondan en su diseño a las necesidades que demanda el proceso, donde se establece un orden de jerarquía desde el punto de vista energético.

A partir de la hipótesis planteada, se define como **objetivo del trabajo**:

Obtener un modelo empírico - teórico que describa el comportamiento del transporte neumático del mineral laterítico en fases fluida y densa en tuberías horizontales y verticales.

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

- ✓ Determinar las limitaciones de las teorías y las expresiones empíricas desarrolladas en el mundo para el cálculo de las pérdidas de presión de los sistemas de transporte neumático en tuberías horizontales y verticales, en la zona dispersa, al ser aplicadas al mineral laterítico.
- ✓ Determinar las propiedades físicas y aerodinámicas que mayor influencia tienen en el transporte neumático del mineral laterítico.
- ✓ Deducir el modelo teórico que describe la dependencia de la caída de presión en función de los parámetros de transporte y las propiedades físicas y aerodinámicas del material, a partir de los antecedentes teóricos y empíricos del transporte neumático de sólidos.
- ✓ Obtener de manera empírica los parámetros del modelo teórico (velocidad de flotación y velocidad del sólido).
- ✓ Simular las características de transporte neumático del mineral laterítico para diferentes regímenes de operación.
- ✓ Valorar económicamente la propuesta efectuada.

En correspondencia con la hipótesis y el objetivo propuesto, se plantea como **novedad científica**:

El establecimiento de un modelo empírico - teórico para el transporte neumático del mineral laterítico en fases fluida y densa que permite, mediante la simulación, predecir los parámetros racionales de trabajo de los sistemas industriales en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Los **métodos de investigación** empleados son los siguientes:

1. Método de investigación documental y bibliográfico para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
2. Método de la modelación físico - matemática del transporte neumático en fases fluida y densa, basado en los principios del movimiento de fluidos bifásicos gas - sólido a través de ecuaciones diferenciales.
3. Método de resolución de ecuaciones diferenciales aplicando Runge – Kutta cuarto orden mediante las técnicas computacionales existentes.
4. Método de investigación experimental para describir, caracterizar el objeto de estudio y sus principales regularidades.
5. Método de simulación computacional de los modelos obtenidos.

En el desarrollo de la investigación se toman como base los estudios efectuados por: Torres (1999), así como la información recopilada de trabajos de investigación y tesis de grados realizadas en la Planta de Preparación del Mineral y Hornos de reducción de la Empresa Comandante Ernesto Che Guevara y René Ramos Latour.

CAPITULO 1

CAPITULO 1

MARCO TEÓRICO - METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

1.1. Introducción

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

El **objetivo** del capítulo es:

Caracterizar el estado actual del proceso de transporte neumático del mineral laterítico en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

1.2. Trabajos Precedentes

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.

En el desarrollo de la investigación se consultaron diferentes trabajos y estudios, la revisión bibliográfica estuvo dirigida en dos líneas fundamentales: una, la información relacionada con el enfoque teórico - metodológico y otra, los trabajos que sobre el tema del transporte neumático desde el punto de vista científico, técnico y práctico se han efectuado en los últimos años.

Respecto al primer elemento, 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.

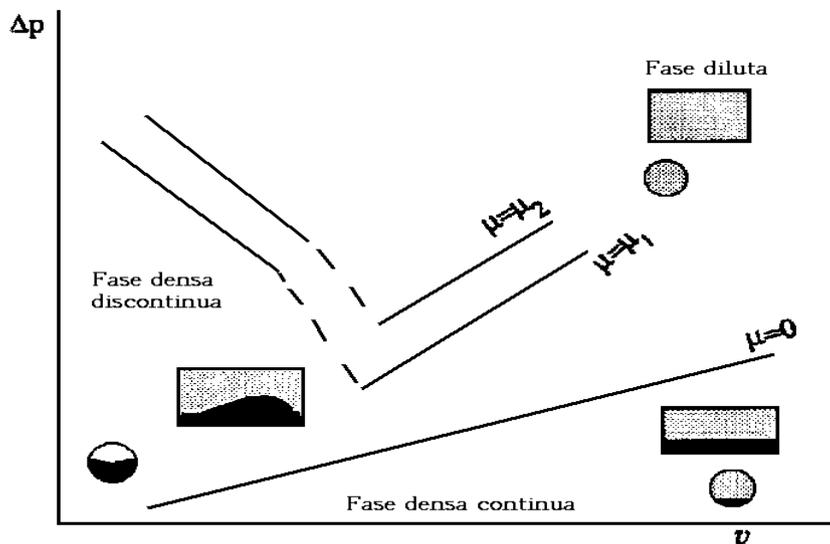


Figura 1.1. Distintas fases en el transporte neumático de materiales

Fuente: M. Rodas, 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.

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.

En el artículo se incluye el diseño exclusivo de los ajustadores de presión (Boosters) para un completo control del material a través de la tubería de transporte, para ello consideran cuatro conceptos fundamentales: fuerza bruta, fluidización, convencional y línea llena. Otra investigación interesante es la de Darren (2000) donde se ofrece una introducción a los componentes fundamentales de los sistemas de transporte neumáticos en fases fluida y densa, se describen los beneficios y las limitaciones de varios componentes según el concepto de diseño del sistema; aunque el artículo no incorpora los detalles mínimos sobre cómo diseñar un sistema, ayuda a tomar decisiones generales sobre las opciones de un diseño adecuado.

La modelación matemática es una herramienta indispensable en el diseño y operación de las plantas de procesos, ofrece un método numérico para la solución de grandes sistemas de ecuaciones derivadas de la modelación de toda una planta o parte de la producción. Los últimos avances en el campo de la simulación, en programas como el MATLAB, permiten obtener con gran exactitud estas soluciones a una gran velocidad, se pueden seleccionar para ello varios métodos numéricos.

De igual forma para componer las ecuaciones de un objeto en la industria metalúrgica, los que representan complejos sistemas dinámicos, es necesario desprestigiar una serie de factores secundarios y sí tener en cuenta los principales: de entrada, salida y perturbaciones que influyen en la dinámica del mismo; a la vez, la sencillez del modelo conformado debe contener las principales peculiaridades del proceso investigado (Guzmán, 2001).

Es importante destacar lo hecho sobre modelación y simulación de los sistemas de transporte neumático en Japón, donde a partir de 1970 se establece como una disciplina en el campo de la ciencia, la ingeniería y la tecnología (Tsuji, 2000). Varios científicos de ese país se incorporan en esta área especializándose algunos en mediciones ópticas y otros en dinámica de los fluidos.

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.

La modelación matemática del comportamiento de las mezclas bifásicas a través de codos ha sido ampliamente abordada en la literatura. En Cuba es relevante la tesis doctoral de Lesme (1996) donde expone una investigación teórico - experimental de las pérdidas en codos para el transporte neumático del bagazo y su metodología de cálculo. Para ello parte del movimiento de las partículas de bagazo a lo largo de la zona curva del codo y la zona de dispersión. Obtiene los valores teóricos de las pérdidas de presión de la corriente bifásica en ambas zonas, la variación de sus principales parámetros hidrodinámicos, la longitud de la zona de dispersión, los coeficientes teóricos de pérdidas y luego su validación en una instalación experimental. Se destaca además en este campo Bradley (1990) donde implementa ensayos para diferentes relaciones de radio de curvatura y geometría del codo. Estas se limitan a determinados elementos de los sistemas de transporte neumático, su alcance es específico para los materiales estudiados sin tener en cuenta la fase densa donde se logran los menores consumos de energía.

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.

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

La consulta bibliográfica hasta el momento no da respuesta a la problemática escogida. En su mayoría aborda elementos aislados de los sistemas de transporte neumático, no plantea el conjunto de conocimientos necesarios para proyectar, seleccionar y evaluar los sistemas de transporte neumático del mineral laterítico cubano. Esto impone la necesidad de ejecutar una investigación que contribuya a la mayor eficiencia de los sistemas actuales de transporte neumático en las industrias del níquel con tecnología carbonato amoniacal.

1.3. Estado actual del transporte neumático en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara

Los tres sistemas fundamentales de transporte neumático de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara se describen a continuación (anexo 6):

- ✓ Transporte neumático desde la salida de los secaderos hasta las tolvas de producto final de los molinos, formado por dos grupos con alimentadores de tornillo sinfín modelo TA-36, cada una cuenta con dos líneas de transporte de diámetro 250 mm y tres válvulas desviadoras del mismo diámetro. La capacidad de un alimentador de este tipo es de $120 \cdot 10^3$ kg/h.
- ✓ Transporte neumático desde las tolvas de producto final de los molinos hasta los silos, formado por dos grupos de alimentación con tres alimentadores de tornillos sinfín modelo TA-36; esta instalación tiene seis líneas de transporte con tuberías de diámetro 250 mm y doce válvulas desviadoras del mismo diámetro.
- ✓ Transporte neumático desde los silos hasta las tolvas de los hornos de reducción, formado por tres grupos de alimentación con tres alimentadores de tornillos sinfín modelo TA-36; el sistema tiene 9 líneas de transporte de diámetro 250 mm.

En el primer sistema el mineral una vez seco se separa en dos partes: una de ellas, la de mayor granulometría, al no poder ser arrastrada por la corriente de gases existente dentro del secadero debido a su peso cae por gravedad en un transportador de banda que descarga en las tolvas de alimentación a los molinos de

bolas; la otra parte del mineral, de menor granulometría, es arrastrada por los gases y recolectada, casi en su totalidad, por los electrofiltros que descargan en transportadores de paletas y estos en las cuatro tolvas abastecedoras de los sistemas de transporte neumático. Esta instalación es la encargada de conducir el mineral desde la sección de secaderos hasta la sección de molienda.

En el segundo sistema el mineral que por su peso y granulometría no pudo ser arrastrado por la corriente de gases, se transporta hasta los molinos de bolas con el objetivo de disminuir el tamaño de sus partículas hasta el valor recomendable para el proceso de reducción (0,074 mm como diámetro promedio). Una vez que el mineral sale de los molinos, se deposita en dos tolvas a las que llega además el proveniente de los electrofiltros de los secaderos y el que retorna de la planta de hornos. Para que llegue el material contenido en estas tolvas hasta los silos encargados de abastecer los hornos de reducción se aplican sistemas de transporte neumático. El tercer sistema tiene características similares al anterior.

Las instalaciones cuentan con un total de 19 alimentadores de tornillo sinfín de $120 \cdot 10^3$ kg/h modelo TA-36 de fabricación Alemana basada en el diseño FULLER KINYON, de ellas, quince deben permanecer en operación y las restantes son reservas. La aceleración y el transporte de polvo se realiza con aire comprimido a una presión promedio de $3 \cdot 10^5$ Pascales producido por tres compresores de 15 900 m³/h cada uno y otro de 25 000 m³/h, de este último se utiliza alrededor de 20 000 m³/h para el transporte neumático; el resto se emplea para la fluidización en tolvas, silos, limpieza y otros servicios en la empresa. La producción de aire se efectúa de forma centralizada, distribuida a las instalaciones mediante la red de tuberías.

1.4. Propiedades físicas y aerodinámicas del mineral laterítico

Un paso importante en la modelación matemática, evaluación, cálculo y diseño de los sistemas de transporte neumático es determinar las propiedades físicas y aerodinámicas en las condiciones en que se transporta el material.

Varios investigadores han tratado la influencia de las propiedades de los materiales en la modelación, selección y diseño de los sistemas. Pacheco (1984), determina las propiedades físicas y aerodinámicas del bagazo, harina de trigo y centeno. Efectos utilizados por Lesme (1996) para obtener una metodología de cálculo que permite la proyección de los sistemas de bagazo en los centrales azucareros del país.

Lampinen (1991); Taylor (1998) examinan la influencia de las propiedades de materiales tales como: madera, arroz, pelets de polietileno, entre otros, en las pérdidas de presión y el consumo de energía específica de los sistemas de transporte neumático.

Respecto al mineral laterítico existen pocos estudios orientados a determinar las propiedades de dichos materiales en el transporte neumático. Miranda (1996) compara y conjuga métodos al determinar el contenido de humedad inicial en las distintas menas de los yacimientos lateríticos, para esto aplica el método de reflexión neutrónica. Torres (1999) encuentra propiedades como:

- ✓ Contenido de humedad
- ✓ Forma de las partículas
- ✓ Composición granulométrica

Este estudio se completa en la investigación desarrollada por el propio autor (Torres, 2002) donde se determinan las propiedades siguientes:

- ✓ Densidad de las partículas
- ✓ Densidad aparente
- ✓ Velocidad de flotación

Contenido de humedad

El contenido de humedad del material en los sistemas de transporte neumático se determina por el método de diferencia de pesada. Para ello se emplea el laboratorio central de la empresa niquelífera Comandante Ernesto Che Guevara.

Los materiales para los experimentos son los siguientes:

- Mineral laterítico
- Balanza analítica de precisión hasta la cuarta cifra decimal.
- Desecadoras.
- Estufa.
- Pesafiltros con sus tapas.
- Crisoles con sus tapas.
- Beaker.
- Pipeta.
- Espátula.
- Termómetro de bulbo húmedo y bulbo seco.

El mecanismo del procedimiento de secado depende considerablemente de la forma de enlace de la humedad con el material, cuanto más sólido es dicho enlace, más difícil transcurre el secado. Durante este se altera el enlace de la humedad con el material. P.A. Rebinder (Papadakis, 1994) propuso la siguiente clasificación de las formas de enlace de la humedad con el material: química, físico – química y físico – mecánica. La humedad ligada químicamente es la que se une con mayor solidez al material en determinadas proporciones y puede eliminarse sólo si se calienta el material hasta altas temperaturas como resultado de una reacción química. Esta humedad no puede ser eliminada del material por secado.

Durante el secado se elimina, como regla, solo la humedad enlazada con el material en forma físico – química y mecánica. La más fácil de eliminar resulta la enlazada mecánicamente que a su vez se subdivide en humedad de los macrocapilares y microcapilares (capilares con el radio medio, aproximadamente mayor y menor de 10^{-5} cm, respectivamente). Los macrocapilares se llenan de humedad durante el contacto directo de esta con el material, mientras que en los microcapilares esta penetra tanto por contacto directo como por la absorción de la misma desde el medio ambiente. La humedad de los macrocapilares se elimina con facilidad no solo por secado, sino con el empleo de métodos mecánicos. El contenido de humedad promedio del mineral laterítico según los experimentos se encuentra en la tabla 1.1

Composición granulométrica

Debido a la importancia que tiene el diámetro de las partículas en el transporte neumático del mineral laterítico se hace el análisis granulométrico con muestras tomadas a la salida de las tolvas de producto final de los molinos. Se selecciona un juego de tamices según la escala incompleta de Tayler con módulo $\sqrt{2}$, en esta selección se parte del diámetro máximo de las partículas, el tamizado se hace por vía húmeda (torres, 1999). Los valores del análisis granulométrico se muestran en la tabla 1.1.

Tabla 1.1. Valores del análisis granulométrico y contenido de humedad de las partículas.

Contenido de humedad: 4,5%			
Composición granulométrica			
Clase de tamaño (mm)	% en peso	Clase de tamaño (mm)	% en peso
+ 0,250	3,42	- 0,125 + 0,090	6,28
- 0,250 + 0,160	4,27	- 0,090 + 0,074	5,44
- 0,160 + 0,125	2,68	- 0,074	77,91

En la figura 1.2 se expone la característica de distribución de tamaño por cernido, donde se observa que el 78% de la muestra tiene granulometría por debajo de los 0,074 mm.

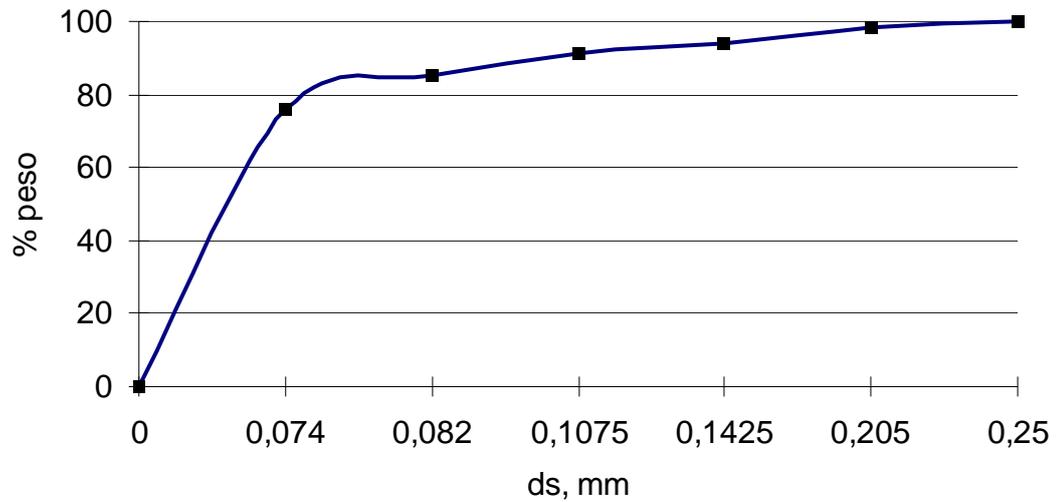


Figura 1.2. Característica de distribución de tamaño por cernido

Forma de las partículas

La morfología de los granos del mineral laterítico se estudia con ayuda de un microscopio binocular previa clasificación de las muestras como se observa en la tabla 1.1. Se examinan 100 granos de cada una de las clases, fueron fotografiados (figura 1.3).



Figura 1.3. Forma de las partículas de mineral laterítico

Se miden las dimensiones fundamentales de los granos: largo, ancho y espesor con el objetivo de determinar el diámetro equivalente y el factor de forma de las partículas.

$$deq = \sqrt[3]{(6/\pi) \cdot l \cdot a \cdot e} \quad (1.1)$$

Donde:

l – largo; mm

a – ancho; mm

e – espesor; mm

Se determina con los resultados obtenidos, el factor de forma de los granos por la siguiente expresión:

$$SF = \frac{e}{\sqrt{l \cdot a}} \quad (1.2)$$

El factor expresa el aplastamiento que presentan los granos de mineral laterítico producido durante el proceso de molienda. A pequeños valores del índice de aplastamiento las partículas presentan configuración aplanadas en forma de elipsoide en revolución, mientras que para valores cercanos a la unidad las partículas son de forma esférica, esta metodología fue usada por Giusti (1986) en el estudio de la morfología de granos de oro.

El factor de forma del material estudiado (tabla 1.2) alcanza valores relativamente altos, en general superiores a 0,8, por lo que pueden ser consideradas esferas. Si las partículas se unen durante el transporte presentan formas diferentes a las planteadas, es decir, formas amorfas que conducen a nuevas estructuras de flujos. Se observa que existe tendencia al incremento del factor de forma con la reducción del diámetro de las partículas; por lo que en los menores diámetros de las muestras no experimentados, este valor debe incrementarse.

Tabla 1.2. Factor de forma promedio para el mineral laterítico estudiado

Clase de tamaño (mm)	Dimensiones promedio (mm)			Factor de forma (promedio)
	Largo	Ancho	Espesor	
-0,315+0,250	0,313	0,295	0,258	0,849
-0,250+0,160	0,232	0,207	0,187	0,853
-0,160+0,125	0,152	0,136	0,127	0,883
-0,125+0,090	0,119	0,103	0,098	0,885
-0,090+0,074	0,087	0,082	0,076	0,899
- 0,074+0,063	0,072	0,0687	0,0645	0,917

Densidad de las partículas

Se define como la masa correspondiente a la unidad de volumen ocupado por una partícula simple. En ella no interviene la porosidad del material ni el diámetro de las partículas.

La densidad del mineral se determina con el empleo del método picnométrico por poseer todas las condiciones en el laboratorio de Física de las Rocas de la Facultad de Minas - Geología del Instituto Superior Minero Metalúrgico. Se hacen mediciones con dos líquidos picnométricos: benceno y gas oil. Un análisis más detallado sobre la técnica experimental empleada se puede encontrar en Torres (2002). Los resultados finales se muestran en la tabla 1.3.

Tabla 1.3. Resultados de la densidad real para cada una de las muestras analizadas

Muestra	Densidad real (kg/m ³)		Procesamiento estadístico
	Benceno	Gas oil	
			Media: 3 026,9
1	3 027,9	3 022,9	Error típico: 0,00170553
2	3 025,4	3 020,4	Mediana: 3 027
3	3 030,1	3 027,9	Moda: 3 027,9
4	3 032,9	3 017,9	Desviación estándar: 0,00539
5	3 035,4	3 027,9	Varianza: 2,9088x10 ⁻⁴

Los valores de la densidad de las partículas de los materiales que componen los distintos horizontes de los yacimientos muestran una tendencia bien definida a

aumentar hacia la parte superior del perfil en correspondencia con las características mineralógicas de estos materiales (Rojas, 1994). En los horizontes serpentínicos, donde predominan los silicatos de Mg, cuyas densidades están entre 2 500 a 3 300 kg/m³, es lógico que la densidad de estos materiales no supere los 3 300 kg/m³; en tanto en los lugares, donde son abundantes los minerales de hierro, (goethita y espinelas fundamentalmente), la densidad del material debe ser más elevada, próxima a 3 700 kg/m³.

Los resultados obtenidos en esta investigación muestran correspondencia adecuada con las conclusiones anteriores. En la medida que el material laterítico posee mayor cantidad de componente serpentínico, típico de las lateritas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, su densidad tiende a disminuir.

Densidad aparente

Se define como la masa total correspondiente a la unidad de volumen ocupado por el material. La densidad aparente varía con la distribución por tamaño de las partículas y con los cuerpos que la rodean. La porosidad del cuerpo sólido, la materia que llena sus poros o espacios vacíos intermedios influyen en el valor de la densidad aparente, para una simple partícula de un material no poroso la densidad real resulta igual a la densidad aparente.

Tabla 1.4. Comportamiento de la densidad aparente en función del diámetro de las partículas.

ds (mm)	0,283	0,205	0,143	0,108	0,082	0,069	0,055	Mezcla
ρ_{apa} (kg/m ³)	573,3	951,7	996,5	1 058,3	1 074,4	1 102,5	1 114,3	1 108,4

Los valores mostrados en la tabla 1.4 se obtienen para las muestras con un contenido de humedad promedio del 4,5%, que coincide con los obtenidos en el proceso industrial. La técnica experimental aparece en Torres (2002).

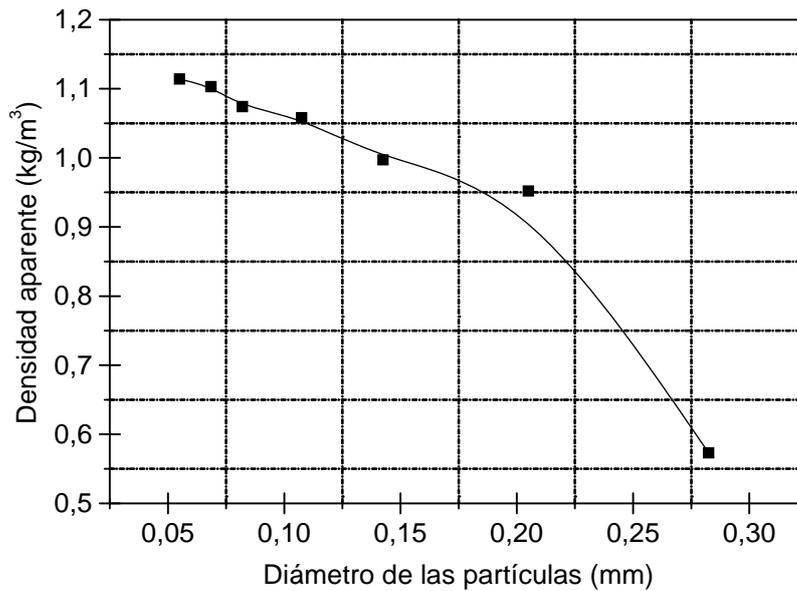


Figura 1.4. Comportamiento de la densidad aparente en función del diámetro de las partículas.

En la figura 1.4 se expone el comportamiento de la densidad aparente en función del diámetro de las partículas observándose un incremento de la misma con la reducción del diámetro de las partículas, esto se debe a la reducción de la porosidad del material. Esta tendencia ha sido observada por Pacheco (1984) en la caracterización del bagazo en los sistemas de transporte neumático. La ecuación de ajuste de la figura 1.2 se puede consultar en la literatura (Torres, 2002).

Velocidad de flotación

Una de las características aerodinámicas más importante de las partículas en las teorías modernas sobre el transporte neumático es la velocidad de flotación. De acuerdo con Pacheco (1984) para una partícula caracterizada por su diámetro (d_s) y su velocidad de flotación (V_f), existe una cierta velocidad del gas, por debajo de la cual el transporte neumático a presión atmosférica no es posible.

El problema del inicio de la obstrucción en el transporte neumático en fase fluida se presenta tan pronto como en cualquier punto de la sección transversal del conductor se identifique una velocidad del gas $\leq V_f$. En esta zona se produce el aumento de la concentración, el material desciende y empieza el colapso del proceso. Por la distribución que tienen las velocidades en el tubo, es evidente que la zona más

expuesta al inicio de este fenómeno es la del perímetro del tubo en el transporte vertical.

Taylor (2001) al experimentar la velocidad de flotación de las partículas, le presta gran interés al comportamiento próximo a las paredes del tubo. Pacheco (1984) cuando estudia la distribución de concentraciones de partículas en el tubo observa que al disminuir la velocidad del gas hasta cierto valor, la concentración en las paredes aumenta y que posteriores disminuciones de la velocidad del gas, provoca la obstrucción. Raheman y Jindal (1993) hacen pruebas con partículas de arroz y semillas de soya para velocidad del aire desde 8 hasta 20 m/s. Ellos observan la tendencia del traslado hacia la zona perimetral. Lo anterior se explica como consecuencia del carácter pulsante de la turbulencia que provocan fuerzas aerodinámicas sobre las partículas con componentes radiales que la obligan a emigrar hacia la pared. La solución al problema se traslada entonces a buscar una velocidad mínima del flujo de gas, tal que en el perfil de velocidades actúe sobre la partícula en las proximidades de la pared una velocidad igual o mayor a la velocidad de flotación.

Técnica experimental empleada

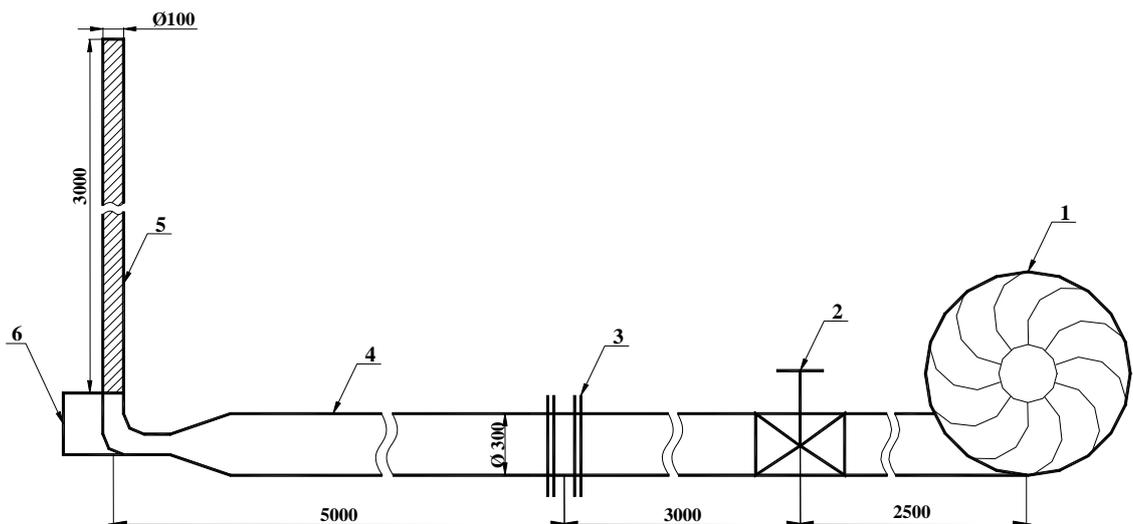


Fig.1.5. Instalación experimental para determinar la velocidad de flotación del mineral laterítico.

El parámetro se determina en una instalación experimental construida en áreas del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, sus detalles aparecen en la figura 1.5.

Las partes componentes de esta instalación son:

1. Fuente de aire (Ventilador centrífugo)
2. Válvula para la regulación del flujo de aire.
3. Cámara con platillo orificio para la conexión del flujómetro.
4. Tubería horizontal
5. Tubo transparente
6. Cámara con gaveta para la recolección del producto

Para determinar la velocidad de flotación se establece un flujo mínimo estacionario de aire en el conducto, este valor se controla a través del flujómetro conectado en la entrada y se regula por medio de la válvula de globo instalada. El incremento de la velocidad del aire es de 0,1 m/seg. Cada experimento comienza a una velocidad mínima de 1 m/seg, el tiempo de espera es de 1 minuto. En cada posición se hacen tres réplicas para las clases de tamaño.

El tamaño de las muestras es de 50 gramos. En la cámara con gaveta se recolectan las partículas no arrastradas en el flujo de gases. La velocidad de flotación coincide con el momento en que las partículas se mantienen flotando en el flujo de aire. El largo del tubo vertical ($L= 3$ m) equilibra la velocidad del gas en el conducto.

En la tabla 1.5 se observan los resultados de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas para un contenido de humedad del 4,5%. Presenta los valores promedios de cada uno de los experimentos. Muestra los valores del coeficiente de resistencia (λ) y el número de Reynolds de flotación (Re_F) tratados en el próximo tópico de este epígrafe.

De los datos experimentales de la tabla 1.5 se obtienen las curvas de velocidad de flotación, de ahí que se aplica el programa profesional Microcal Origin (1996). El ajuste de curva se efectúa a partir de una ecuación del tipo (1.3).

Tabla 1.5. Comportamiento de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas.

ds (mm)	0,250	0,205	0,143	0,108	0,077	0,054	0,044	Contenido de humedad
Vf ₂ (m/s)	5,21	4,74	4,23	3,83	3,25	2,92	2,64	4,5%
λ	0,295	0,281	0,258	0,241	0,222	0,204	0,194	4,5%
Re _F	81,97	61,152	38,068	26,032	15,749	9,923	7,31	4,5%

Otros autores emplean el modelo general para la correlación de diversos materiales (Pacheco, 1984) este toma la forma general siguiente:

$$V_f = k_1 \cdot ds^{k_2} \tag{1.3}$$

Donde k₁ y k₂ son constantes.

Los resultados se exponen en la ecuación 1.4 y la figura 1.6, con un coeficiente de correlación de 0,92, donde se observa el incremento de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas, el valor máximo que alcanza es de 5,21m/s para los diámetros de partículas de 0,250 mm

$$V_f = 8,81 \cdot ds^{0,38} \tag{1.4}$$

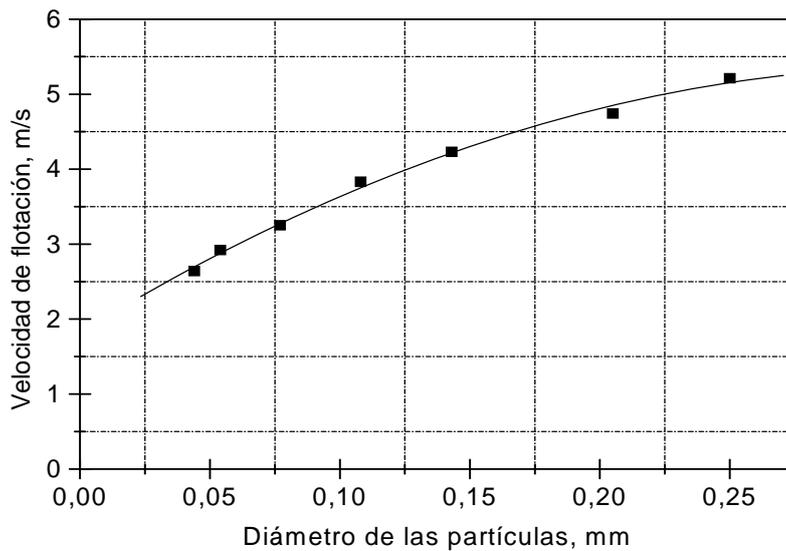


Fig. 1.6. Comportamiento de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas.

Coeficiente de resistencia del mineral laterítico

Existe una estrecha relación entre la velocidad de flotación y el coeficiente de resistencia en el transporte neumático del mineral laterítico, parámetro necesario para aplicar los criterios de semejanzas en la modelación y simulación de los sistemas.

Bajo el movimiento relativo entre una partícula y el aire a su alrededor, se ejerce una fuerza de resistencia sobre ella. En movimiento vertical hacia arriba de las partículas y el aire, la fuerza de resistencia que actúa supera la fuerza neta descendiente o la diferencia entre la fuerza gravitacional y la fuerza de sustentación. Expresada matemáticamente conduce a la siguiente ecuación:

$$V_F = \sqrt{\frac{4}{3} \cdot g \cdot \frac{d_s}{\lambda} \cdot \frac{(\rho_M - \rho_G)}{\rho_G}} \quad (1.5)$$

Donde:

d_s - Diámetro de las partículas; m

ρ_M - Densidad del material; kg/m³

ρ_G - Densidad del gas; kg/m³

λ - Coeficiente de resistencia del mineral laterítico.

V_F - Velocidad de flotación; m/s

Las partículas dentro de todo el margen de variación de su diámetro (0,025 mm–0,044 mm), tienen un número de Reynolds de flotación expresado a través de la siguiente expresión:

$$\text{Re}_F = \frac{V_F \cdot d_s}{\nu} \quad (1.6)$$

Donde:

ν - Coeficiente cinemático de viscosidad; m²/s

El comportamiento del coeficiente de resistencia en función del diámetro de las partículas y la velocidad de flotación se puede determinar con el empleo de la ecuación (1.5).

Los valores del coeficiente de resistencia λ , calculados por la ecuación (1.5), se presentan en la tabla 1.5. En la figura 1.7 se refleja la variación del mismo en función del diámetro de las partículas.

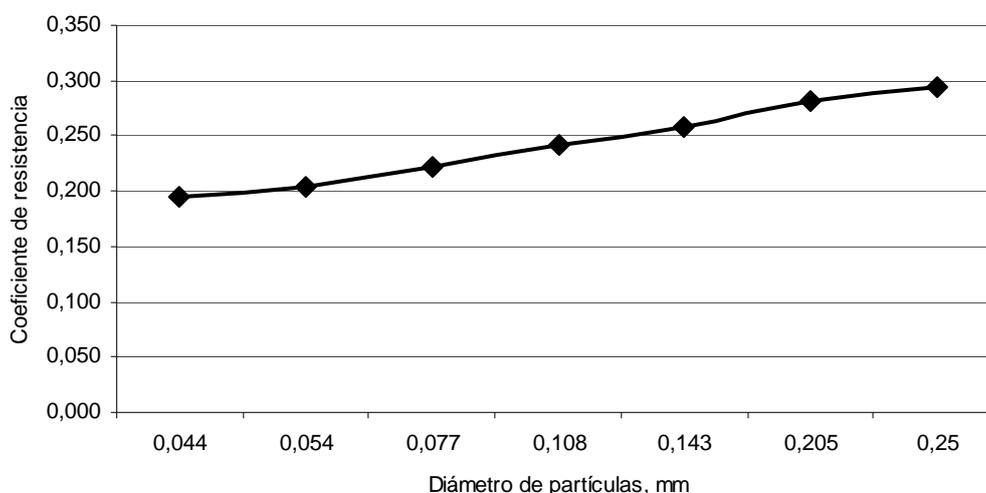


Fig.1.7. Comportamiento del coeficiente de resistencia del mineral laterítico en función del diámetro de las partículas.

Se observa que el coeficiente de resistencia del mineral laterítico se incrementa con el diámetro de las partículas y el número de Reynolds. Si se comparan estos resultados con los obtenidos para otros materiales (Pacheco, 1984), para el mineral laterítico estos valores son inferiores debido al diámetro de partículas ensayados que en este caso se halla en el orden de los micrones, independientemente del valor de densidad de partículas superior a otros materiales como: bagazo, soya, harina, entre otros. El valor máximo del coeficiente de resistencia se obtiene para un diámetro de partículas de 0,250mm, tiene un valor de 0,295.

1.5. Conclusiones del capítulo 1

- ✓ Las teorías científicas existentes sobre la predicción de las pérdidas de presión en el transporte neumático en fases fluida y densa, no resuelven el problema investigado para el mineral laterítico.
- ✓ No se conocen expresiones matemáticas que relacionen los efectos de la velocidad de transporte neumático del mineral laterítico y la velocidad de flotación con las pérdidas de presión.
- ✓ Se determinan las propiedades físicas y aerodinámicas que mayor influencia tienen en el transporte neumático del mineral laterítico como parte importante del proceso de modelación del sistema. Estas se obtienen a través de las técnicas experimentales adecuadas para cada caso.

CAPITULO 2

CAPITULO 2

MODELACIÓN TEÓRICA EN EL TRANSPORTE NEUMÁTICO DEL MINERAL LATERÍTICO POR TUBERÍAS HORIZONTALES Y VERTICALES

2.1. Introducción

Una vez determinado el alcance de la investigación, fundamentada la no existencia de expresiones matemáticas que permitan predecir el comportamiento de las pérdidas de presión en el transporte neumático del mineral laterítico, se fundamenta el modelo teórico con el empleo de las ecuaciones que describen el balance de momento, masa y energía.

Según Mason y Marjanovic (1998) el modelo no es más que una abstracción matemática del proceso real, donde la ecuación o conjunto de ecuaciones que componen el mismo es la mejor aproximación del proceso.

Los modelos matemáticos se clasifican en (Viera et al, 1988):

- i) Según la teoría o técnica básica utilizada en la elaboración del modelo.
- ii) Según la naturaleza de las ecuaciones que se utilizan.
- iii) Según su estructura matemática.

De acuerdo con la teoría o técnica básica utilizada en la elaboración del modelo se clasifican en:

1. Modelos de fenómenos de transporte.
2. Modelos de balance de población.
3. Modelos empíricos.

El modelo desarrollado en la próxima sección es del tipo 1, en el que se incluyen los basados en principios físicos – químicos que aplican las ecuaciones fenomenológicas de cambio, es decir, las ecuaciones que describen la conservación de la masa, la energía y el momento.

En este capítulo se plantea como **objetivo**:

Modelar de forma teórica el transporte neumático del mineral laterítico por tuberías horizontales y verticales en fases fluida y densa.

2.2. Pérdidas de presión para el aire limpio en el transporte neumático por tuberías horizontales y verticales

Al establecer la modelación teórica del transporte neumático del mineral laterítico es necesario definir las ecuaciones de pérdidas de presión en un flujo de aire limpio con el uso de la ecuación de Darcy.

$$\frac{dp}{dl} = \frac{1}{D} \cdot \lambda_G \cdot \frac{\rho_G}{2} \cdot V_g^2 \quad (2.1)$$

Donde:

D – Diámetro de la tubería; m

λ_G - Coeficiente de fricción del gas

ρ_G - Densidad del aire; kg/m³

V_g - Velocidad del aire; m/s

$\frac{dp}{dl}$ - Pérdidas de presión por unidad de longitud; Pa/m

Aunque el coeficiente de fricción del gas λ_G se encuentra próximo a 0,02, un cálculo más exacto se logra con el empleo de la ecuación de Blasius para tuberías lisas (Pacheco, 1984). Esta ecuación se utiliza para números de Reynolds entre $2320 < R_e < 10^5$.

$$\lambda_G = 0,3164 \cdot R_e^{-\left(\frac{1}{4}\right)} \quad (2.2)$$

En un flujo completamente turbulento (Lampinen, 1991) es válida la siguiente ecuación:

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_G}} = 2,0 \cdot \log_{10}(R_e \cdot \sqrt{\lambda_G}) - 0,8 \quad (2.3)$$

El número de Reynolds se determina por:

$$\text{Re} = \frac{V_g \cdot D}{\nu} \quad (2.4)$$

Donde:

ν - Coeficiente cinemático de viscosidad del aire; m^2 / s

2.3. Ecuaciones tradicionales para el cálculo de las pérdidas de presión en tuberías horizontales y verticales en la zona dispersa

En este epígrafe se exponen las ecuaciones tradicionales para el cálculo del gradiente de presión con el empleo del coeficiente de pérdidas de las partículas y sus limitaciones al ser aplicadas al transporte neumático del mineral laterítico

Para el cálculo de las pérdidas de presión en el transporte neumático de sólidos la siguiente versión modificada de la ecuación (2.1), siempre se puede encontrar en la literatura (Lampinen, 1991; Wypych y Arnold, 1989).

$$\frac{dp}{dl} = \frac{1}{D} \cdot (\lambda_G + \mu \cdot \lambda_S) \cdot \frac{\rho_G}{2} \cdot V_g^2 \quad (2.5)$$

Donde:

μ - Concentración de la mezcla; kg/kg

λ_S - Coeficiente de pérdida de presión de las partículas sólidas.

La ecuación (2.5) contiene solo a la concentración como un número característico del mecanismo de similitud de la mezcla. El resto de factores importantes como: tamaño de las partículas, densidad del sólido, entre otros, están contenidos en el coeficiente de pérdida de presión de las partículas sólidas; el que se determina separadamente para cada material. Para el cálculo del coeficiente de pérdidas de presión de las partículas sólidas en la literatura se relacionan varias ecuaciones

donde se busca la dependencia de λ_s con valores obtenidos directamente de la investigación, o se aplica la teoría de semejanza. Pacheco (1984) resume las principales publicaciones y la forma del modelo obtenidas en la antigua URSS; donde se expone la amplitud de variación del coeficiente de pérdidas diferentes para tuberías horizontales y verticales.

Al estimar el coeficiente de pérdidas de presión en el transporte neumático Stegmaier (Lampinen, 1991) agrupa y correlaciona diversas ecuaciones en el transporte horizontal de sólidos granulares finos los que contienen algunos números característicos de similitud. La misma idea la usa Weber (1991), quien encuentra una correlación del coeficiente de pérdida de presión en el transporte neumático vertical basado en datos experimentales. A fin de expresar algunos de esos modelos, se introducen dos números adimensionales: el número de Froude relacionado al gas y al sólido respectivamente.

$$Fr = \frac{V_g^2}{D \cdot g} \quad (2.6)$$

y

$$Fr_s = \frac{V_f^2}{d_s \cdot g} \quad (2.7)$$

Donde:

Fr - Número de Froude relacionado al gas

Fr_s - Número de Froude relacionado al sólido

g – Aceleración de la gravedad; m/s^2

d_s – Diámetro de las partículas; m

El modelo matemático desarrollado por Stegmaier para el transporte horizontal es:

$$\lambda_s = 2,1 \cdot \mu^{-0,3} \cdot Fr^{-1} \cdot Fr_s^{0,25} \cdot \left(\frac{D}{d_s} \right)^{0,1} \quad (2.8)$$

La ecuación (2.8) tiene un coeficiente de correlación inferior a 0,7, que no se acepta en el mineral laterítico.

El coeficiente de pérdida de presión en el transporte neumático vertical (Weber, 1991) se calcula por la siguiente expresión:

$$\lambda_s = \frac{V_g/V_s}{1200} + \frac{2 \cdot V_g/V_s}{Fr} \quad (2.9)$$

Donde:

V_s - Velocidad de las partículas sólidas; m/s

El coeficiente de correlación de la ecuación obtenida por Weber es mejor que el modelo de Stegmaier. Otros autores (Wypych y Arnold, 1989; Pan y Wypych, 1997), proponen obtener un coeficiente de fricción que incluya el gas y las partículas sólidas.

$$\frac{dP}{dx} = \lambda_{GS} \cdot \frac{\rho_G}{2 \cdot D} \cdot V_g^2 \quad (2.10)$$

Donde:

λ_{GS} - Coeficiente de fricción de la mezcla bifásica gas - sólido

En el cálculo del coeficiente de fricción de la mezcla bifásica se establecen varias ecuaciones, una de las más usada es:

$$\lambda_{GS} = 3,07 \cdot \mu^{1,249} \cdot Fr^{-(0,786)} \quad (2.11)$$

La amplitud de variación del coeficiente de pérdidas de presión es diferente en tuberías horizontales y verticales, depende de varios factores, lo que crea serias dificultades al obtener ecuaciones generales en el transporte neumático.

Las ecuaciones anteriores estudian determinados aspectos singulares del transporte neumático, pero sus aportes no han sido relevantes en el examen del mineral laterítico en la industria del níquel.

2.4. Modelo teórico para el cálculo de las pérdidas de presión en el transporte neumático del mineral laterítico por tuberías horizontales y verticales en la zona dispersa

2.4.1. Modelo teórico en fase densa

El desarrollo del modelo teórico para el transporte neumático del mineral laterítico en fases fluida y densa en tuberías horizontales y verticales se elabora a partir del uso simultaneo de las ecuaciones de balance de masa, de momento y de energía. Para ello se considera un tubo inclinado hacia arriba con un ángulo δ desde la horizontal como se muestra en la figura 2.1.

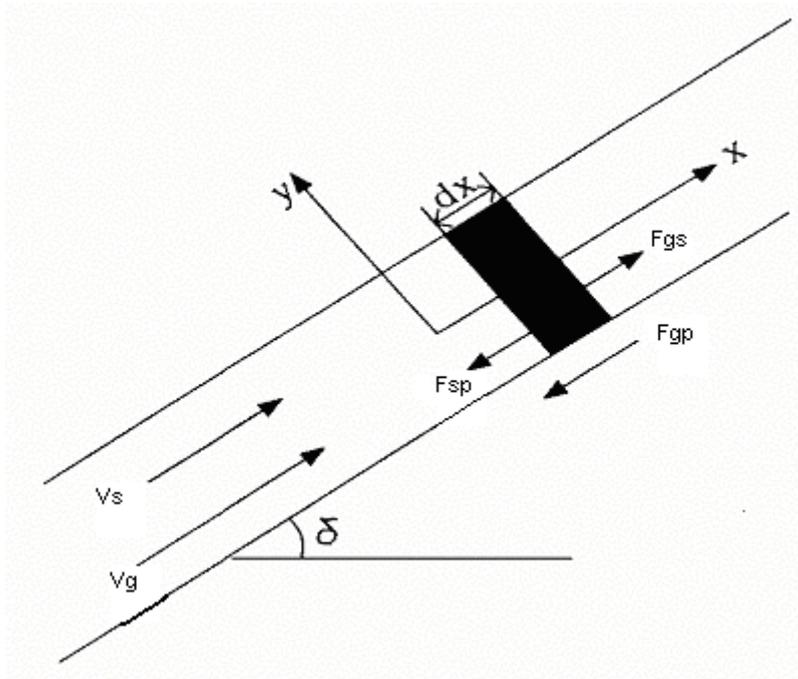


Figura 2.1 Fuerzas de fricción que afectan el movimiento de la mezcla aire - mineral durante el transporte neumático.

El elemento de mezcla mostrado en la Figura 2.1 contiene el flujo de aire y partículas de mineral laterítico. Las densidades parciales de esos dos elementos son ρ_g y ρ_s , respectivamente y la porosidad es ε . Si la presión del aire es P , entonces la fuerza por unidad de área de la mezcla total que afecta el flujo de aire es $(\varepsilon \cdot P)$ y la fuerza por unidad de área que afecta el flujo de mineral es $(1 - \varepsilon) \cdot P$.

El balance de momentos en forma general puede expresarse de la siguiente manera:

Incremento de momentos	=	La sumatoria de las fuerzas específicas
---------------------------	---	--

Por lo tanto,

Incremento en momento del aire	+	Incremento en momento del mineral	=	Fuerza de presión	-	
- Fuerza gravitacional	-	Fuerza de fricción aire/pared	-	Fuerza de fricción mineral/ pared	±	Fuerza de interacción aire/mineral

(2.12)

La ecuación de balance de momento para las partículas de mineral laterítico en la dirección del eje "x" con el empleo de la ecuación (2.12) es:

$$\rho_s \frac{dV_s}{dt} = -\frac{d}{dx}[(1-\varepsilon) \cdot P] - \rho_s \cdot g \cdot \text{sen} \delta - F_{sp} + F_{gs} \quad (2.13)$$

Donde:

ρ_s -densidad del mineral laterítico; kg/m³

F_{sp} contiene la fuerza de interacción entre las diferentes partículas y la fuerza de fricción causada por la interacción de las partículas de mineral laterítico con las paredes de la tubería. La fuerza de resistencia F_{gs} es de interacción entre el aire y el mineral laterítico, el opuesto de la fuerza $-F_{gs}$ es la que afecta el flujo de aire.

La ecuación de balance de momento para el flujo de aire en la dirección del eje "x" es:

$$\rho_g \frac{dV_g}{dt} = -\frac{d}{dx}(\varepsilon \cdot P) - \rho_g \cdot g \cdot \text{sen} \delta - F_{gp} - F_{gs} \quad (2.14)$$

Donde F_{gp} es la fuerza de fricción causada por las paredes y F_{gs} es la misma fuerza de resistencia de la ecuación (2.13).

Las partículas de mineral vibran a lo largo del eje "y"; perpendicular al eje "x", cambia el perfil de la velocidad interna del aire, por lo que la fuerza de fricción no es la misma que en un tubo vacío. Se Puede dividir la fuerza de fricción F_{gp} en dos partes:

$$F_{gp} = \frac{\lambda_G}{D} \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot V_g^2 + F_V \quad (2.15)$$

Donde:

F_V - Fuerza específica debido a la vibración del mineral laterítico; N/m^3

La primera parte es la fricción del aire con las paredes sin la presencia de las partículas sólidas (ver ecuaciones 2.2 y 2.3). La fuerza específica F_V incrementa a partir del hecho que nunca la velocidad ni la distribución de presión son uniformes a lo largo del eje "y" y este crea un modelo complicado de flujo de fluido, que implica una fuerza de fricción adicional en la dirección del eje "x".

Debido a la velocidad no uniforme y la distribución de presión a lo largo del eje "y" las partículas permanecen separadas y flotando en la corriente de gas. En un transporte vertical la fuerza F_V es obviamente cero, por lo que las partículas no tienden a caer y colectarse en el fondo del tubo. La fuerza F_V no puede ser incluida en la fuerza de resistencia F_{gs} , debido a que esta contribuye a que las partículas se desplacen hacia arriba en la dirección del eje X, mientras que F_V no afecta las partículas pero si al propio gas.

Para modelar la fuerza F_V de modo que esta implique el efecto de flotación y la caída de las partículas hacia el fondo del tubo se aplica el método de potencia vibracional, una adecuada revisión de este tópico ha sido representado por Mason et al (1998).

La potencia por unidad de volumen (W/m^3) que se necesita para mantener las partículas flotando en la dirección del eje Y es:

$$P = \rho_s \cdot g \cdot \cos \delta \cdot V_f \cdot \cos \delta \quad (2.16)$$

La relación entre la potencia vibracional y la fuerza F_V se expresa por:

$$P = F_V \cdot V_g \quad (2.17)$$

Donde:

P – Potencia vibracional específica; W/m^3

A partir de las ecuaciones (2.16) y (2.17) se obtiene:

$$F_V = \rho_s \cdot g \cdot \frac{V_f}{V_g} \cdot \cos^2 \delta \quad (2.18)$$

La suma de las ecuaciones (2.13) y (2.14) proporciona:

$$\rho_g \frac{dV_g}{dt} + \rho_s \frac{dV_s}{dt} = -\frac{dp}{dx} - \frac{\lambda_G}{D} \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot V_g^2 - \rho_g \cdot g \cdot \sin \delta - \rho_s \cdot g \cdot \sin \delta - F_V - F_{sp} \quad (2.19)$$

Para la fuerza F_V se tiene la ecuación (2.18), pero se desconoce F_{sp} .

El coeficiente de fricción total en la superficie de la tubería está compuesto por una fricción mecánica por el contacto entre las capas de partículas y la pared de la tubería, y una fricción viscosa ejercida por el contacto del fluido con las paredes del tubo (Matousek, 2002).

Diversas investigaciones han demostrado que la rugosidad de la pared tiene un efecto considerable en el proceso de colisiones de las partículas con la pared (Sommerfeld, 2002), en procesos industriales donde se emplean tuberías de acero en el transporte neumático, estas tienen rugosidad que se encuentra entre 20 y 50 μm . La distribución del ángulo rugoso puede ser representado por una función de

distribución normal, la desviación estándar de esta distribución es influenciada por la estructura de la superficie rugosa y por el diámetro de las partículas.

En la modelación de la fuerza de fricción sólido – pared se tiene en cuenta el movimiento de la mezcla bifásica no como un flujo homogéneo (esta vía de modelación es adecuada para el movimiento de las partículas separadamente) sino como una nueva clase de estructura.

$$F_{sp} = \frac{\lambda_z^*}{D} \cdot \frac{1}{2} \cdot \rho_s \cdot V_s^2 \quad (2.20)$$

El coeficiente de fricción λ_z^* puede ser clasificado de dos formas: coeficiente de fricción estática y dinámica. Este último provocado por el contacto de las partículas sólidas con las paredes al deslizarse por la tubería. Se debe encontrar experimentalmente para cada tipo de material y superficie rugosa, para ello se determina el ángulo y velocidad de deslizamiento sobre la superficie.

Según los experimentos efectuados con mineral laterítico y superficies similares a las utilizadas en las instalaciones industriales de las empresas del níquel, en el centro de investigaciones de materiales de la firma inglesa Clyde Materials Handling (2002) en una instalación experimental, el valor promedio de este coeficiente es $\lambda_z^* = 0,325$, por lo que la ecuación (2.20) para el mineral laterítico obtiene la forma siguiente:

$$F_{sp} = \frac{0,1625}{D} \cdot \rho_s \cdot V_s^2 \quad (2.21)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.18) y (2.21) en el balance de fuerzas general de la ecuación (2.19) se obtiene como resultado:

$$\begin{aligned} \rho_g \frac{dV_g}{dt} + \rho_s \frac{dV_s}{dt} = & -\frac{dp}{dx} - \frac{\lambda_G}{D} \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot V_g^2 - \rho_g \cdot g \cdot \text{sen} \delta - \rho_s \cdot g \cdot \text{sen} \delta - \\ & - \rho_s \cdot g \cdot \frac{V_f}{V_g} \cdot \cos^2 \delta - \frac{0,1625}{D} \cdot \rho_s \cdot V_s^2 \end{aligned} \quad (2.22)$$

Si se desarrolla el lado izquierdo de la ecuación (2.22), las derivadas totales también

llamadas derivadas materiales, son:

$$\frac{dV_g}{dt} = \frac{\partial V_g}{\partial t} + V_g \frac{\partial V_g}{\partial x} \quad (2.23)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = \frac{\partial V_s}{\partial t} + V_s \frac{\partial V_s}{\partial x} \quad (2.24)$$

En un flujo estacionario la derivada parcial con respecto al tiempo desaparece, es decir.

$V_g = V_g(X)$ y $V_s = V_s(X)$, entonces:

$$\frac{dV_g}{dt} = V_g \frac{dV_g}{dx} \quad (2.25)$$

$$\frac{dV_s}{dt} = V_s \frac{dV_s}{dx} \quad (2.26)$$

Por otro lado, en estado estacionario el balance de masa para el gas en un tubo con un área de la sección transversal constante es simplemente:

$$\rho_g \cdot V_g = \text{const} = m_g'' \quad (2.27)$$

Donde:

m_g'' - Flujo másico de gas por unidad de área; $\frac{kg}{s \cdot m^2}$

y el balance de masa para el flujo material es:

$$\rho_s \cdot V_s = \text{const} = \mu \cdot \rho_g \cdot V_g = \mu \cdot m_g'' \quad (2.28)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.23 – 2.26) en (2.22) se obtiene:

$$\begin{aligned}
-\frac{dp}{dx} = & \rho_g \cdot V_g \left[\frac{dV_g}{dx} + \mu \frac{dV_s}{dx} \right] + \frac{\lambda_G}{D} \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot V_g^2 + \rho_g \cdot g \cdot \text{sen} \delta \left[1 + \mu \frac{V_g}{V_s} \right] + \\
& + \mu \cdot \rho_g \cdot \frac{V_g}{V_s} \left[g \cdot \frac{V_f}{V_g} \cdot \cos^2 \delta + \frac{0,1625}{D} \cdot V_s^2 \right]
\end{aligned} \tag{2.29}$$

La relación que existe entre la densidad parcial y real del gas es que la última está afectada por la porosidad de la mezcla, por lo que se puede plantear que $\rho_g = \varepsilon \cdot \rho_G$.

El balance de masa para el flujo de gas es $\rho_G \cdot V_g = cte$. De esta afirmación se obtiene la siguiente ecuación:

$$\rho_G \cdot \frac{dV_g}{dx} = -V_g \cdot \frac{d\rho_G}{dx} = -V_g \cdot \frac{d}{dx} \left(\frac{P \cdot M}{R \cdot T} \right) = -\frac{\rho_G}{P} \cdot V \cdot \frac{dP}{dx} \tag{2.30}$$

Donde:

P – Presión del gas; Pa

M – Masa molar del gas; Moles

T – Temperatura del gas; K

h – Entalpía del gas; kJ/kg

En la ecuación (2.30) se ha empleado la ley de los gases ideales y temperatura constante de modo que $\frac{dP}{dx} < 0$ y $\frac{dV_g}{dx} > 0$ en la longitud de la tubería.

El primer término del lado derecho de la ecuación (2.29) se obtiene mediante las fuerzas inerciales debido a que con las pérdidas de presión la densidad del gas disminuye en la dirección del flujo y la velocidad V_g se incrementa. Este es tratado como adiabático, el que a partir de un balance de energía se obtiene.

$$h + \frac{1}{2} \cdot V_g^2 = Const \tag{2.31}$$

Por otro lado el proceso de transporte neumático se puede considerar isotérmico $h = h(T)$, (la entalpía no depende de la presión), y ya que las velocidades son por lo general inferiores a los 30 m/s, se deduce de la ecuación (2.28) que.

$T \cong Const$

Por ejemplo si a lo largo del flujo la velocidad del aire cambia desde cero hasta 60 m/s, esta disminuye solo la temperatura por:

$$\Delta T = -\left(\frac{V_g^2/2}{C_p}\right) = -\left(\frac{60^2/2}{1000}\right) = -1.8 \text{ } ^\circ\text{C}$$

Donde:

C_p - Capacidad calorífica del gas; $\frac{J}{kg \cdot K}$

De modo que la aproximación de la constante de temperatura es bastante exacta. De aquí que es tratado como un proceso isotérmico.

La velocidad del material, V_s , también se incrementa como una función de "x", por lo que se puede plantear:

$$\frac{V_g - V_s}{V_{gA} - V_{sA}} = \sqrt{\frac{\rho_{GA}}{\rho_G}} = \sqrt{\frac{P_A}{P}} \quad (2.32)$$

Donde:

V_{gA} - Velocidad del gas en el estado de referencia; m/s

V_{sA} - Velocidad del sólido en el estado de referencia; m/s

ρ_{GA} - Densidad real del gas en el estado de referencia; kg/m³

P_A - Presión del gas en el estado de referencia; Pa

Para el cálculo de la velocidad de flotación en cualquier punto de la tubería se aplica la siguiente expresión:

$$V_f = f(\rho_G) = V_{fA} \cdot \sqrt{\frac{\rho_{GA}}{\rho_G}} = V_{fA} \cdot \sqrt{\frac{P_A}{P}} \quad (2.33)$$

El estado de referencia es considerado a presión atmosférica. Si se combinan las ecuaciones (2.30) y (2.32) se obtiene:

$$\frac{d}{dx}(V_g - V_s) = (V_{gA} - V_{sA}) \cdot \sqrt{P_A} \cdot (-1/2) \cdot P^{-\frac{3}{2}} \frac{dP}{dx}$$

De esta se obtiene:

$$\frac{dV_s}{dx} = (-1/2) \cdot \frac{(V_g + V_s)}{P} \frac{dP}{dx} \quad (2.34)$$

En la ecuación (2.29) se trabaja con la densidad parcial del gas (ρ_g) y del sólido (ρ_s) respectivamente, para un mejor desarrollo de la ecuación es necesario introducir el concepto de porosidad o fracción de vacío de la mezcla bifásica que se define por la siguiente expresión:

$$\varepsilon = \frac{\rho_g}{\rho_G} \quad (2.35)$$

De forma similar para el sólido se puede plantear la siguiente expresión:

$$(1 - \varepsilon) = \frac{\rho_s}{\rho_S} \quad (2.36)$$

La ecuación de continuidad para las partículas y el aire respectivamente son:

Para las partículas:

$$M_s = A \cdot V_s \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s \quad (2.37)$$

Para el aire:

$$M_g = A \cdot V_g \cdot \varepsilon \cdot \rho_G \quad (2.38)$$

Donde:

A – Área de la sección transversal del conducto; m².

La concentración de sólido transportado se obtiene al dividir las ecuaciones (2.37) y (2.38). Esta expresión puede ser empleada para determinar la porosidad de la mezcla bifásica.

$$\mu = \frac{M_s}{M_g} = \frac{V_s \cdot (1 - \varepsilon) \cdot \rho_s}{V_g \cdot \varepsilon \cdot \rho_G} \quad (2.39)$$

Sustituyendo las ecuaciones (2.30 – 2.39) en la ecuación (2.29) se obtiene:

$$\left[-1 + \frac{\varepsilon \cdot \rho_G \cdot V_g^2}{P} + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot \rho_G \cdot \mu \cdot \frac{V_g \cdot (V_g + V_s)}{P} \right] \frac{dP}{dx} = \frac{\lambda_G \cdot \varepsilon \cdot \rho_G \cdot V_g^2}{2D} + \varepsilon \cdot \rho_G \cdot g \cdot \text{sen} \delta \cdot \left(1 + \mu \cdot \frac{V_g}{V_s} \right) + \mu \cdot \varepsilon \cdot \rho_G \cdot \frac{V_g}{V_s} \cdot \left(g \cdot \frac{V_f}{V_g} \cdot \cos^2 \delta + \frac{0,1625}{D} \cdot V_s^2 \right) \quad (2.40)$$

En tuberías horizontales el $\text{sen} \delta = 0$ y $\cos \delta = 1$, la ecuación (2.40) se reduce a la siguiente expresión:

$$\left[-1 + \frac{\varepsilon \cdot \rho_G \cdot V_g^2}{P} + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot \rho_G \cdot \mu \cdot \frac{V_g \cdot (V_g + V_s)}{P} \right] \frac{dP}{dx} = \frac{\lambda_G \cdot \varepsilon \cdot \rho_G \cdot V_g^2}{2D} + \mu \cdot \varepsilon \cdot \rho_G \cdot \frac{V_g}{V_s} \cdot \left(g \cdot \frac{V_f}{V_g} + \frac{0,1625}{D} \cdot V_s^2 \right) \quad (2.41)$$

En tuberías verticales $\text{sen} \delta = 1$ y $\cos \delta = 0$ y se obtiene la siguiente expresión:

$$\left[-1 + \frac{\varepsilon \cdot \rho_G \cdot V_g^2}{P} + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot \rho_G \cdot \mu \cdot \frac{V_g \cdot (V_g + V_s)}{P} \right] \frac{dP}{dx} = \frac{\lambda_G \cdot \varepsilon \cdot \rho_G \cdot V_g^2}{2 \cdot D} + \varepsilon \cdot \rho_G \cdot g \cdot \left(1 + \mu \cdot \frac{V_g}{V_s} \right) + \mu \cdot \varepsilon \cdot \rho_G \cdot \frac{V_g}{V_s} \cdot \frac{0,1625}{D} \cdot V_s^2 \quad (2.42)$$

La expresión (2.40) constituye la ecuación final del modelo teórico para el cálculo de las pérdidas de presión en el transporte neumático del mineral laterítico en tuberías en fase densa. En ella se necesita identificar dos parámetros: la velocidad del sólido y la velocidad de flotación de las partículas. Uno y otro constituyen una función de la longitud de la tubería según se observa en las ecuaciones (2.32) y (2.33). La simplificación de esta expresión en tramos horizontales y verticales se plantea en las ecuaciones (2.41) y (2.42). En ambas λ_G se determina mediante la aplicación de las expresiones (2.2) y (2.4).

El modelo obtenido para el transporte en fase densa se utiliza con bastante exactitud en la fase fluida; las diferencias fundamentales se encuentran en la forma de interacción sólido – sólido, sólido – pared y en la consideración en fase fluida de la porosidad cercana a la unidad (Neidigh, 2002; Rodas, 2001; Massoudi, 1999). En el epígrafe que continúa se establecen estas diferencias las que solo son empleadas para la fase examinada.

2.4.2. Modelo teórico en fase fluida

Para la modelación del transporte en fase fluida a partir de la ecuación (2.19) se obtiene:

$$\rho_g \frac{dV_g}{dt} + \rho_s \frac{dV_s}{dt} = -\frac{dp}{dx} - \frac{\lambda_G}{D} \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot V_g^2 - \rho_g \cdot g \cdot \text{sen} \delta - \rho_s \cdot g \cdot \text{sen} \delta - F_v - F_{sp} \quad (2.43)$$

En la ecuación (2.43) la fuerza F_v se calcula por la expresión (2.18). La fuerza de fricción F_{sp} puede ser expresada con ayuda del coeficiente de fricción:

$$F_{sp} = \mu_f \cdot \rho_s \cdot g \cdot \cos \delta \quad (2.44)$$

El coeficiente de fricción μ_f es una función complicada en las condiciones de flujo (es decir de las velocidades V_g y V_s) y del ángulo (δ) de inclinación de la tubería (Lampinen, 1991). En un flujo horizontal ($\delta=0$) se obtiene de la ecuación (2.44):

$$F_{sp} = \left(\frac{V_g - V_S}{V_f} \right)^2 \cdot \rho_s \cdot g \quad (2.45)$$

La ecuación (2.45) proporciona la fuerza F_{sp} para el ángulo $\delta = 0$. Para obtener la fuerza en la línea vertical, se necesita reemplazar V_S ($\delta = 0$) por la correspondiente velocidad $V_S = V_S(\delta)$.

Si se sustituyen las ecuaciones (2.18) y (2.45) en el balance de fuerzas general de la ecuación (2.43) se obtiene:

$$\begin{aligned} \rho_g \frac{dV_g}{dt} + \rho_s \frac{dV_S}{dt} = & -\frac{dp}{dx} - \frac{\lambda_G}{D} \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot V_g^2 - \rho_g \cdot g \cdot \text{sen} \delta - \rho_s \cdot g \cdot \text{sen} \delta - \\ & - \rho_s \cdot g \cdot \frac{V_f}{V_g} \cdot \cos^2 \delta - \left(\frac{V_g - V_S}{V_f} \right)^2 \cdot \rho_s \cdot g \end{aligned} \quad (2.46)$$

A continuación se desarrolla el lado izquierdo de la ecuación (2.46), para ello se aplican las expresiones desde la (2.23) hasta la (2.28). Con el empleo de estas en la ecuación (2.46) se obtiene:

$$\begin{aligned} -\frac{dp}{dx} = & \rho_g \cdot V_g \cdot \left[\frac{dV_g}{dx} + \mu \cdot \frac{dV_S}{dx} \right] + \frac{\lambda_G}{D} \cdot \frac{\rho_g}{2} \cdot V^2 + \rho_g \cdot g \cdot \text{sen} \delta \cdot \left[1 + \mu \cdot \frac{V_g}{V_S} \right] + \\ & + \mu \cdot \rho_g \cdot g \cdot \left[\frac{V_f}{V_S} \cdot \cos^2 \delta + \frac{V_g}{V_S} \cdot \left(\frac{V_g - V_S}{V_f} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.47)$$

La diferencia de velocidad entre el gas y el material en la línea vertical es:

$$V_g - V_{SV} = f(\rho_G, \delta = \frac{\pi}{2}) = (V_g - V_{SV})_A \cdot \sqrt{\frac{\rho_{GA}}{\rho_G}} \quad (2.48)$$

Donde:

V_{SV} - Velocidad de las partículas sólidas en la línea vertical; m/s

De forma similar en la línea horizontal se puede escribir:

$$V_g - V_{SH} = f(\rho_G, \delta = 0) = (V_g - V_{SH})_A \cdot \sqrt{\frac{\rho_{GA}}{\rho_G}} \quad (2.49)$$

Donde:

V_{SH} - Velocidad de las partículas sólidas en la línea horizontal; m/s.

La influencia del ángulo de inclinación en el transporte neumático puede ser estimado por la siguiente ecuación:

$$V_g - V_S = f(\rho_G, \delta) = \sqrt{\frac{\rho_{GA}}{\rho_G} \cdot \left[(V_g - V_{SH})_A^2 \cdot \cos^2 \delta + (V_g - V_{SV})_A^2 \cdot \sin^2 \delta \right]} \quad (2.50)$$

En el flujo en fase fluida la porosidad de la mezcla $\varepsilon \cong 1$, la densidad parcial $\rho_g = \varepsilon \cdot \rho_G$ puede ser reemplazada por la densidad real (ρ_G)

Si se sustituye (2.30) y (2.34) en (2.47) y se reemplaza ρ_g por ρ_G , se obtiene:

$$\begin{aligned} - \left[1 - \frac{\rho_G \cdot V_g^2}{P} - \frac{1}{2} \cdot \rho_G \cdot \mu \cdot \frac{V_g (V_g + V_M)}{P} \right] \frac{dP}{dx} = \frac{\lambda_G}{D} \cdot \frac{\rho_G}{2} \cdot V_g^2 + \\ + \rho_G \cdot g \cdot \sin \delta \cdot \left[1 + \mu \cdot \frac{V_g}{V_M} \right] + \mu \cdot \rho_G \cdot g \cdot \left[\frac{V_f}{V_M} \cdot \cos^2 \delta + \frac{V_g}{V_M} \cdot \left(\frac{V_g - V_M}{V_f} \right)^2 \right] \end{aligned} \quad (2.51)$$

En la ecuación (2.51) para la línea horizontal el $\sin \delta = 0$ y $\cos \delta = 1$ por tanto se obtiene:

$$\begin{aligned} \frac{dp}{dx} = - \left(\frac{1}{1 - \frac{\rho_G \cdot V_g^2}{P} - \frac{1}{2} \cdot \rho_G \cdot \mu \cdot \frac{V_g \cdot (V_g + V_S)}{P}} \right) \cdot \\ \cdot \left(\frac{\lambda_G}{D} \cdot \frac{\rho_G}{2} \cdot V_g^2 + \mu \cdot \rho_G \cdot g \cdot \left(\frac{V_f}{V_S} + \frac{V_g}{V_S} \cdot \left(\frac{V_g - V_S}{V_f} \right)^2 \right) \right) \end{aligned} \quad (2.52)$$

Para la línea vertical donde $\delta = 90^\circ$, $\sin \delta = 1$ y $\cos \delta = 0$ se obtiene:

$$\frac{dp}{dx} = - \left[\frac{1}{1 - \frac{\rho_G \cdot V_g^2}{P} - \frac{1}{2} \cdot \rho_G \cdot \mu \cdot \frac{V_g (V_g + V_S)}{P}} \right] \cdot \left(\frac{\lambda_G}{D} \cdot \frac{\rho_G}{2} \cdot V_g^2 + \rho_G \cdot g \cdot \left(1 + \mu \cdot \frac{V_g}{V_M} \right) + \mu \cdot \rho_G \cdot g \cdot \left(\frac{V_g}{V_S} \cdot \left(\frac{V_g - V_S}{V_f} \right)^2 \right) \right) \quad (2.53)$$

La ecuación (2.51) puede ser seleccionada para calcular la caída de presión de un flujo bifásico gas – sólido en fase fluida. Para tuberías horizontales se escoge la ecuación 2.52 y para verticales la 2.53.

Con ayuda de estas ecuaciones las pérdidas de presión en un sistema de transporte neumático en fase fluida son calculadas. Lo que se necesita conocer son: la velocidad de las partículas sólidas y la velocidad de flotación.

2.5. Ecuaciones para el cálculo de las pérdidas en codos durante el transporte neumático del mineral laterítico

Para la construcción de las características de transporte neumático del mineral laterítico es necesario, además de conocer las pérdidas en tramos rectos, determinar las pérdidas en codos. En general la literatura consultada divide las pérdidas de presión para el aire limpio en:

- ✓ Pérdidas por longitud
- ✓ Pérdidas por curvatura
- ✓ Pérdidas por efecto del flujo circulatorio

Estas pérdidas se obtienen por la expresión:

$$\Delta P = \xi \cdot \rho_G \cdot \frac{V_g^2}{2} \quad (2.54)$$

Donde:

ξ - Coeficiente experimental de resistencia en codos, expresado generalmente en longitud equivalente o por curvatura del codo, dependiente de su radio relativo (R/D), del ángulo de curvatura del codo (θ) y de la forma de su sección transversal.

Con un ángulo de curvatura de 90° el coeficiente experimental (ξ) según Lesme (1996) se calcula por la siguiente expresión:

$$\xi = 0,051 + 0,19 \cdot \left(\frac{D}{R} \right) \quad (2.55)$$

Donde:

R – Radio de curvatura; m

La literatura actual sobre el tema para el transporte neumático de partículas (Bradley, 1990; Pan y Wypych, 1992; Lesme, 1996), asegura que surgen cambios bruscos de velocidad condicionada por la fricción de las partículas sobre la pared del conducto y la fuerza de inercia de la corriente, por lo que adicionalmente a los componentes que originan las pérdidas de presión en codos para fluidos monofásicos, hay que tener en cuenta:

- ✓ Las características físicas del material
- ✓ La concentración de la fase sólida en la corriente
- ✓ La posición geométrica del codo dentro del conductor

Se agrega a lo anterior el criterio que las mayores pérdidas ocurridas en un codo de una instalación neumática, no están localizadas en el codo propiamente dicho, sino en una zona llamada de dispersión; en este caso se admite que las pérdidas en codos se determina por la siguiente expresión:

$$\Delta P_{CT} = \Delta P_C + \Delta P_d \quad (2.56)$$

Donde:

ΔP_{CT} - Pérdidas totales en el codo; Pa

ΔP_C - Pérdidas en la zona curva; Pa

ΔP_d - Pérdidas en la zona de dispersión; Pa

Para el cálculo de ΔP_C y ΔP_d en el estudio del transporte neumático del mineral laterítico se utilizaron los resultados de Lesme (1996) en granos y polvos.

2.5.1. Pérdidas en la zona curva del codo

$$\Delta P_C = \Delta P + \Delta P_S \quad (2.57)$$

Donde:

ΔP - Pérdidas para el aire limpio; Pa

$$\Delta P_S = \xi_S \cdot \rho_s \cdot \frac{V_g^2}{2} \quad (2.58)$$

Donde:

ξ_S - Coeficiente de resistencia en la curvatura producto del movimiento del material

$$\xi_S = A \cdot \left(\frac{R}{D}\right)^{0,5} \cdot \text{Re}^{0,1} \cdot \text{Re}_F^{0,35} \cdot \left(\frac{D}{dx}\right)^{0,2} \cdot F_{rs}^{-0,65} \cdot F_r^{0,35} \cdot \mu^{-1,09} \quad (2.59)$$

Donde:

μ - Concentración de la mezcla; kg/kg

A – Coeficiente que depende de la posición del codo.

$A = 6,6 \times 10^{-2}$ - Codo vertical – horizontal

$A = 9,0 \times 10^{-2}$ - Codo horizontal – vertical

$A = 8,1 \times 10^{-2}$ - Codo horizontal

2.5.2. Pérdidas en la zona de dispersión

$$\Delta P_d = \beta_{OT} \cdot \rho_G \cdot \frac{V_g^2}{2} \quad (2.60)$$

Donde:

β_{OT} - Coeficiente de pérdidas por dispersión, depende de la posición geométrica y dimensiones del codo.

$$\beta_{OT} = 0,6 \cdot \Delta Y \cdot \Delta_{OT} \cdot \beta_{da} \quad \text{Para } \frac{R}{D} = 2 - 5$$

$$\beta_{OT} = 0,5 \cdot \Delta Y \cdot \Delta_{OT} \cdot \beta_{da} \quad \text{Para } \frac{R}{D} = 5 - 10$$

$$\beta_{OT} = 0,4 \cdot \Delta Y \cdot \Delta_{OT} \cdot \beta_{da} \quad \text{Para } \frac{R}{D} = 10 - 15$$

Donde:

Δ_{OT} - Coeficiente que tiene en cuenta la disminución de las pérdidas por curvatura con la reducción del ángulo.

ΔY - Coeficiente experimental de la longitud recta del codo

Los valores de ΔY y Δ_{OT} se obtienen en las figuras 1 y 2 de los anexos.

β_{da} - Coeficiente de pérdidas de presión por dispersión de las partículas sólidas

En el transporte vertical

$$\beta_{da}^v = 1,55 \cdot 10^2 \cdot \text{Re}_f^{-0,15} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_G} \right)^{-0,45} \cdot \left(\frac{D}{dx} \right)^{-0,1} \cdot \mu^{2,59} \quad (2.61)$$

En el transporte horizontal

$$\beta_{da}^h = 0,28 \cdot 10^2 \cdot \text{Re}^{0,4} \cdot \text{Re}_f^{-0,8} \cdot Fr^{0,3} \cdot \left(\frac{\rho_s}{\rho_G} \right)^{-0,9} \cdot \left(\frac{D}{dx} \right)^{-0,5} \cdot \mu^{3,81} \quad (2.62)$$

2.6. Procedimiento para la solución del modelo matemático

El modelo teórico del transporte neumático de mineral laterítico está expresado por cuatro ecuaciones diferenciales de primer orden (2.41, 2.42, 2.52, 2.53) y varias ecuaciones de enlace, tanto en fase densa como en la fluida. Para la solución de las mismas es necesario ajustar los parámetros característicos de cada material investigado a partir de los resultados experimentales, estos son:

- ✓ Velocidad de flotación
- ✓ Velocidad del mineral laterítico

En el capítulo 1 con la determinación de las propiedades físicas y aerodinámicas del mineral laterítico se establecen los valores de la velocidad de flotación en el estado de referencia (presión atmosférica) en las diferentes clases de tamaño del material, los que sirven de punto de partida para la observación de su comportamiento a lo largo de un conducto con la variación de la presión y la velocidad del gas.

Al establecer la velocidad del mineral laterítico con el empleo del modelo se utiliza el término **velocidad relativa** que se define como la diferencia entre la velocidad del gas y la velocidad del material ($V_g - V_s$), esta se obtiene mediante el ajuste del modelo a los resultados experimentales.

El método empleado para resolver las ecuaciones diferenciales del modelo teórico y determinar la velocidad relativa entre el gas y el material es Runge – Kutta cuarto orden. Las ecuaciones del modelo se expresan en la forma

$-\frac{dp}{dx} = f(V_{gX}; V_{sX}; V_{fX}; \rho_{GX})$ y la derivada es calculada en cada punto con el uso de

los valores previos conocidos de $V_g; V_s; V_f; P$.

Con la caída de presión existe un incremento de la velocidad del gas y la variación de otros parámetros tales como: densidad, velocidad de flotación y velocidad del material. Para considerar la variación de los parámetros a identificar en el modelo con la presión se emplean las siguientes ecuaciones:

$$V_{fX} = V_{fA} \cdot \sqrt{\frac{P_A}{P_X}} \quad (2.63)$$

$$V_{gX} - V_{sX} = (V_{gA} - V_{sA}) \cdot \sqrt{\frac{P_A}{P_X}} \quad (2.64)$$

Donde el subíndice (A) representa el estado de referencia a presión atmosférica y (x) se refiere al valor de los parámetros en cualquier punto del sistema.

2.7. Conclusiones del capítulo 2

- ✓ El modelo teórico en el transporte neumático del mineral laterítico en tuberías horizontales y verticales se expresa por cuatro ecuaciones diferenciales de primer orden (2.41, 2.42, 2.52, 2.53) y varias ecuaciones de enlace. Se obtienen con el empleo de las ecuaciones de balance de masa, de momentos y de energía, en un conducto inclinado con un ángulo δ con respecto a la horizontal.
- ✓ Las pérdidas en codos tanto en la zona curva como de dispersión se expresan por ecuaciones de trabajos precedentes en el transporte de granos y polvos (ecuaciones 2.54 – 2.62).

CAPITULO 3

CAPITULO 3

RESULTADOS EXPERIMENTALES Y OBTENCIÓN DE LOS PARÁMETROS DEL MODELO TEÓRICO EN EL TRANSPORTE NEUMÁTICO DEL MINERAL LATERÍTICO

3.1. Introducción

La modelación teórica desarrollada en el capítulo precedente exige la ejecución de experimentos para obtener los parámetros característicos del modelo en el mineral laterítico: velocidad de flotación y velocidad relativa entre el aire y el sólido.

El **objetivo** del capítulo es:

- ✓ Obtener los parámetros característicos del modelo teórico en el transporte neumático del mineral laterítico por tuberías horizontales y verticales en la zona dispersa mediante resultados experimentales.

3.2. Instalación experimental

La instalación experimental mostrada en la figura 5 de los anexos consta de los siguientes equipos y accesorios:

1. Compresores
2. Tanque almacenador
3. Sistema regulador de flujo
4. Cámara de alimentación
5. Tubería de transporte que incluye tramos horizontales, verticales y accesorios
6. Instrumentación y control de los parámetros

Compresores

Para impulsar el aire se usan dos compresores reciprocantes de dos etapas y doble efecto del tipo KLM 10 -100/32 conectados en paralelo; los que permiten disponer de la cantidad o flujo de aire necesario para la experimentación con una presión máxima regulada de 1MPa y caudal nominal de 200 m³/h cada uno. A partir del

caudal de aire de los compresores y el tanque de almacenaje se obtienen velocidades que pueden alcanzar los 20 m/s, con ello se garantiza la similitud cinemática a los sistemas de transporte neumático de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Tanque almacenador

La descarga de los compresores está conectada a un tanque almacenador de 3,3 m³ de volumen con el objetivo de evitar el flujo pulsante en la tubería de transporte, disminuir al mínimo las oscilaciones de presión y los posibles errores en las mediciones por este concepto.

Sistema regulador de flujo

La regulación del flujo a la cámara de alimentación y tubería de transporte se lleva a cabo mediante una válvula a la entrada del sistema. La cantidad de aire suministrado se registra a través de un transmisor diferencial SITRANS P de la firma SIEMENS conectado a un platillo orificio calculado y calibrado, el que permite ajustar la velocidad del gas en la tubería de transporte.

Cámara de bombeo

El aire proveniente del tanque almacenador después de pasar por el sistema regulador de flujo se introduce en la cámara de alimentación en dos niveles: uno superior llamado aire de dosificación y otro inferior denominado aire de transporte. Está dotada de la instrumentación necesaria para ajustar los parámetros en la línea de transporte y una válvula de entrada para la carga del material. Tiene un volumen de 0,9 m³, la carga inicial para la ejecución de los experimentos se escoge de acuerdo con el volumen del recipiente y la densidad aparente del material.

Tubería de transporte

El mineral laterítico fluidizado en la cámara de alimentación es arrastrado por un flujo de aire a través de una tubería de 100mm de diámetro interior. El sistema presenta tramos horizontales, verticales y accesorios que garantizan la similitud geométrica con las instalaciones industriales. En cada uno de los puntos de medición se colocaron transmisores de presión puntual con una señal de salida de 4 – 20 mA. Para medir la caída de presión las señales de corriente se enviaron a un registrador

multipunto PIEZOGRAPH 2 con 32 canales de entradas. El equipo está dotado de un conjunto de funciones y valores que permite ajustar de forma segura y simple todos los parámetros de servicio. Este informa mediante lista de selección las funciones de cada entrada, lo que propician obtener los valores de la presión diferencial entre los diferentes puntos seleccionados.

3.3. Diseño experimental

Selección de las variables

De acuerdo con la literatura consultada (Guerra, 1987; Lampinen, 1991; Pacheco, 1984) y el modelo teórico desarrollado las pérdidas en tuberías horizontales y verticales en el transporte del mineral laterítico dependen de los siguientes factores:

- ✓ Diámetro de las partículas transportadas
- ✓ Velocidad de la corriente
- ✓ Presión en la línea de transporte
- ✓ Concentración de la mezcla
- ✓ Posición geométrica de la línea de transporte

Diámetro de las partículas

Considerando los diámetros de partículas del mineral laterítico obtenidos a partir del análisis granulométrico de las muestras tomadas en las tolvas de descarga del proceso de molienda en la planta de preparación del mineral de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, se fijan cuatro fracciones de partículas obtenidas después de un proceso de tamizado; su diámetro promedio se calcula por la siguiente expresión:

$$d_s = \frac{d_{t1} + d_{t2}}{2} \quad (3.1)$$

Donde:

d_{t1} - Diámetro del primer tamiz por donde pasan las partículas; mm

d_{t2} - Diámetro del segundo tamiz por donde no pasan las partículas; mm

Se escoge un cuarto valor de la variable con el material mezclado como se obtiene en la industria después del proceso de molienda. Se tienen de esta forma los siguientes valores del diámetro de partículas: $d_x > 0,250\text{mm}$; $d_x = 0,1875\text{mm}$; $d_x < 0,1075\text{mm}$; $d_x =$ mezcla de mineral.

Velocidad de la corriente

La selección correcta de la velocidad del gas es de vital importancia en los sistemas de transporte neumático; esta depende del tipo de transporte en fase fluida o densa, en ambos casos se toma como referencia la velocidad de flotación de las partículas en un flujo de aire vertical.

Al establecer los niveles de la misma se tienen en cuenta los efectos obtenidos por Torres (2002), donde se analiza el comportamiento de la velocidad de flotación en el transporte del mineral laterítico en un flujo de aire, los resultados fundamentales pueden observarse en la tabla 1.5 y figura 1.5 del capítulo 1.

De esta variable se escogen 5 niveles, los que cambian para cada diámetro de partículas examinadas como se muestra en la tabla 3.1. Con ello se garantiza la similitud cinemática con los sistemas industriales

Presión del gas

En los sistemas de transporte neumático es necesario controlar la presión del gas transportador debido al incremento de las pérdidas de presión con la variación de otros parámetros tales como: la concentración y la velocidad del gas transportador. Esta tiene gran influencia en la demanda de potencia del alimentador de aire y de energía específica del sistema. La variación de la presión se debe fundamentalmente a la fluctuación del flujo de aire en el sistema; si la demanda aumenta por encima de la capacidad de los compresores, la presión tiende a disminuir y viceversa. Para garantizar que se mantenga constante en la entrada se emplean los sistemas de regulación. En los diferentes experimentos se aplica la regulación mediante descarga del aire en exceso a la atmósfera y la regulación por paradas temporales.

Para establecer los valores de esta variable se tiene en cuenta su estrecha relación con la velocidad del gas. Se fijan cinco niveles en la cámara de alimentación

expresado en presión manométrica que son: 300 kPa; 250 kPa; 200 kPa; 150 kPa; 100 kPa.

Concentración de la mezcla

La concentración de la mezcla expresa la cantidad de material transportado por unidad de volumen de aire y se determina de forma indirecta. En cada experimento se establece la concentración de la mezcla mediante la cantidad de material transportado por unidad de tiempo y la velocidad del gas transportador. En esta variable no se fijan niveles iniciales, sus resultados se obtienen a partir de la variación de los restantes factores involucrados en el proceso (velocidad de la corriente, diámetro de partículas, presión del gas y posición geométrica de las tuberías).

Posición geométrica de la línea de transporte

Se escogen dos niveles en esta variable: las posiciones horizontales y verticales que coinciden con las longitudes rectas de los sistemas de transporte neumático de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

Número de corridas experimentales

Para establecer el número de corridas experimentales se aplica un diseño multifactorial, el que de acuerdo con los niveles prefijados de cada una de las variables suma un número de 200; pero con el objetivo de comprobar la validez de los mismos y disminuir los errores de observación, en todos los niveles se efectúan 3 réplicas, lo que concluye con un total de 600 corridas experimentales. Se realizan además corridas con valores intermedios de las variables. En la tabla 3.1 se muestra un resumen del diseño experimental efectuado.

Tabla 3.1. Matriz del diseño experimental seleccionado

Diámetro de partículas (mm)	Tubería Horizontal			Tubería vertical		
	Cantidad de experimentos	Niveles de presión manométrica (kPa)	Niveles de velocidad (m/s)	Cantidad de experimentos	Niveles de presión manométrica (KPa)	Niveles de velocidad (m/s)
> 0,250	75	300 250 200 150 100	6,72 8,14 9,55 10,62 12,74	75	300 250 200 150 100	6,72 8,14 9,55 10,62 12,74
0,1875	75	300 250 200 150 100	5,66 7,08 8,49 9,91 11,32	75	300 250 200 150 100	5,66 7,08 8,49 9,91 11,32
<0,1075	75	300 250 200 150 100	4,95 6,37 7,78 9,20 10,62	75	300 250 200 150 100	4,95 6,37 7,78 9,20 10,62
Mezcla	75	300 250 200 150 100	6,72 8,14 9,55 10,62 12,74	75	300 250 200 150 100	6,72 8,14 9,55 10,62 12,74

3.4. Técnica experimental

El material proveniente de los yacimientos se somete a un proceso de secado, molienda y tamizado hasta obtener las fracciones de partículas seleccionadas (ds) con una humedad promedio del 4,5 %.

Para poner a punto la instalación se calibran los instrumentos de medición y se hacen experimentos con aire limpio, se comparan los resultados experimentales con los obtenidos a partir de la ecuación de Darcy.

Mediante el sistema de regulación de flujo y el diseño experimental para fijar cada uno de los niveles se le suministra aire de fluidización a la cámara de alimentación con la válvula cerrada y luego de forma estable a la tubería de transporte. Se establece el régimen de flujo deseado y se efectúan las mediciones de pérdidas de presión en los puntos seleccionados en los tramos horizontales y verticales.

La cantidad de material transportado se determina por medio de pesadas con una balanza cuyo error en la escala es de 0,005 kg. El tiempo de duración de cada experimento se registra con un cronómetro y su precisión es de 0,1 segundo.

Conocida la cantidad de material transportado y el flujo de aire por unidad de tiempo, se determina la concentración de la mezcla. Este procedimiento se repite hasta abarcar todas las combinaciones de acuerdo con los niveles de las variables seleccionadas. El movimiento de la mezcla bifásica se observa a través de un tubo transparente colocado en ambas líneas.

3.5. Identificación del modelo matemático

La identificación del modelo matemático juega un papel fundamental porque en ella se establece su adecuación al objeto estudiado; de ahí que se aplica un algoritmo de identificación mediante la contraposición de los resultados experimentales con los del modelo.

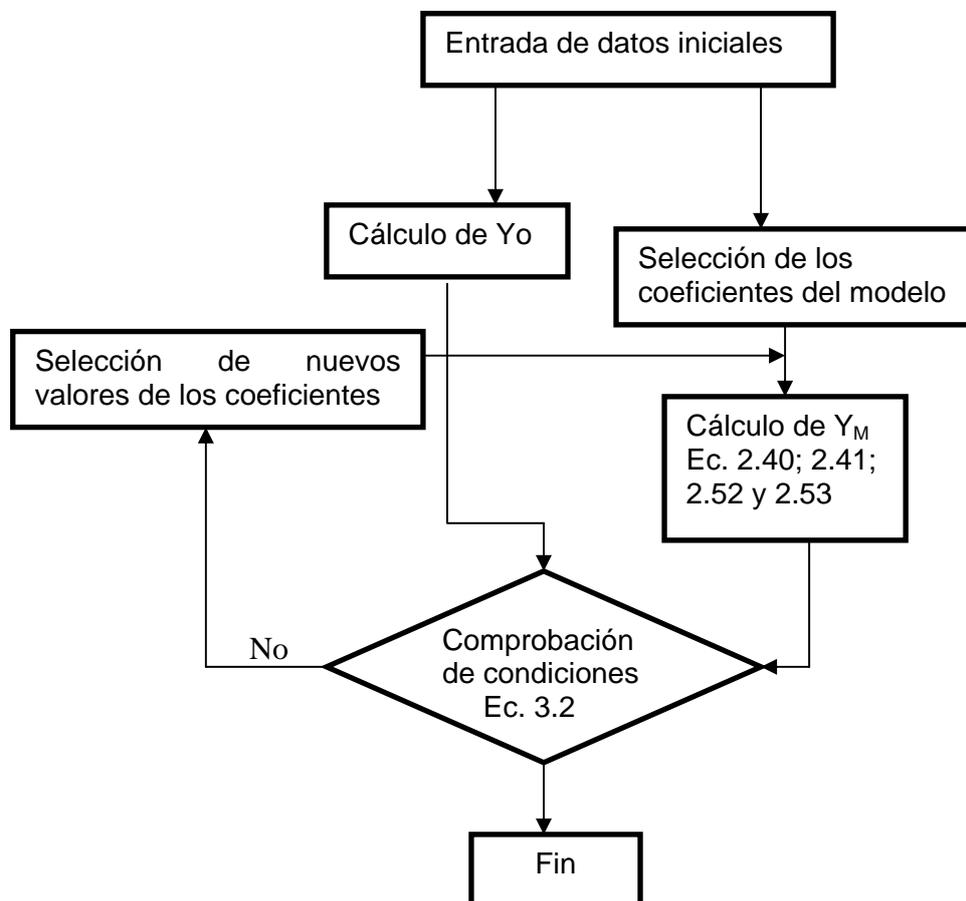
3.5.1. Algoritmo de identificación del modelo

La tarea de identificación del modelo matemático consiste en la determinación de los parámetros característicos del mineral laterítico [velocidad de flotación (V_F) y velocidad relativa entre el gas y el sólido ($V_g - V_s$)] para los que se garantiza la adecuación del modelo que describe el proceso. De ahí que sea necesario comparar los valores de las características Y_O del proceso tecnológico real $\left[\left(\frac{dp}{dx} \right)_{\text{exp}} \right]$ que se encuentran en las tablas (1 – 8) de los anexos, con las magnitudes Y_M a la salida del objeto $\left[\left(\frac{dp}{dx} \right)_{\text{teórico}} \right]$ por las ecuaciones (2.40; 2.41; 2.52; 2.53). Es mejor aquel juego de parámetros para el que se minimiza la medida m de las cercanías de las magnitudes Y_O y Y_M .

$$m[Y_O - Y_M] \rightarrow \min \quad (3.2)$$

En la identificación del modelo es necesario variar los parámetros en dependencia de la medida de diferencia de los componentes de las características Y_O y Y_M , para ello se utiliza el procedimiento iterativo a partir del estado de referencia y el método de Runge – Kutta cuarto orden que toma en cuenta el comportamiento de la derivada en cuatro puntos de cada intervalo. Este método como parte del proceso iterativo se utiliza para resolver el modelo teórico y encontrar los valores de los parámetros característicos en el mineral laterítico (velocidad de flotación y velocidad relativa entre el gas y el sólido).

El algoritmo de identificación de acuerdo con los planteamientos anteriores toma la forma siguiente:



3. 6. Resultados experimentales y valores de los parámetros del modelo

En las tablas (1 – 8) de los anexos se muestran los resultados experimentales obtenidos a partir del diseño en tuberías horizontales y verticales. En las mismas se

exponen los valores promedios de $(dp/dx)_{\text{exp}}$ y de μ para las tres réplicas de los niveles de las variables.

El procesamiento estadístico se efectúa mediante los errores admisibles de los valores de las variables. Los parámetros de cálculo del análisis estadístico son:

Media aritmética:

$$\bar{X} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n X_i \quad (3.3)$$

Donde:

x_i - elementos de la serie.

n - número de pruebas.

Desviación media:

$$\Delta\bar{X} = \frac{\sum |X_i - \bar{X}|}{n} \quad (3.4)$$

La varianza muestral :

$$S_x^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (X_i - \bar{X})^2}{n-1} \quad (3.5)$$

La raíz cuadrada de la varianza muestral se denomina error estándar S_x . El error estándar de la media aritmética es:

$$\delta = \frac{t_d \cdot S_x}{\sqrt{n}} \quad (3.6)$$

El procesamiento estadístico se ejecuta con el empleo del criterio de Student para una probabilidad $t_{0,95}$ mediante la comparación del t observado con t_d de la tabla:

$$t = \frac{|X_i - \bar{X}|}{S_x} \quad (3.7)$$

En todos los casos se confirma que $t < t_d$ por lo que la dispersión entre los resultados obtenidos no es significativa, encontrándose el error estándar de la media aritmética por debajo del 5%.

La confirmación de la validez de los valores experimentales con el modelo teórico se desarrolla a través del error relativo, o sea, la diferencia entre el módulo del valor experimental “ X_{exp} ” de la caída de presión y el valor teórico “ X_{teo} ” obtenido por el modelo para las mismas condiciones del experimento.

El error relativo puntual se calcula por la siguiente expresión:

$$E_p = \left| \frac{X_{exp} - X_{teo}}{X_{exp}} \right| \cdot 100 \quad (3.6)$$

El error relativo promedio se expresa por:

$$E = \sum_{i=1}^n \left| \frac{X_{exp} - X_{teo}}{X_{exp}} \right| \cdot \frac{100}{n} \quad (3.7)$$

Del cálculo de los errores relativos puntuales para cada uno de los diámetros de partículas se obtienen los siguientes resultados:

Tabla 3.3. Errores relativos puntuales para cada diámetro de partículas.

Tubería horizontal			Tubería vertical		
dx (mm)	Oscilación (%)	Error puntual (%)	dx (mm)	Oscilación (%)	Error puntual (%)
dx > 0,250	(0 – 5)	16	dx > 0,250	(0 – 5)	8
	(5 – 10)	60		(5 – 10)	88
	(10 – 15)	24		(10 – 15)	4
dx = 0,1875	(0 – 5)	8	dx = 0,1875	(0 – 5)	0
	(5 – 10)	72		(5 – 10)	84
	(10 – 15)	20		(10 – 15)	16
dx < 0,1075	(0 – 5)	0	dx < 0,1075	(0 – 5)	0
	(5 – 10)	60		(5 – 10)	56
	(10 – 15)	40		(10 – 15)	44
dx = mezcla	(0 – 5)	0	dx = mezcla	(0 – 5)	0
	(5 – 10)	64		(5 – 10)	100
	(10 – 15)	36		(10 – 15)	0

En la tabla 3.3 se muestra un resumen de los errores relativos puntuales para cada diámetro de partículas. Se observa que los errores puntuales estuvieron siempre por debajo del 15%, donde predomina el intervalo entre el (5 –10)%.

En la literatura (Lesme,1996) se hace un examen de los errores y sus posibles fuentes, se especifica que en cálculos de ingeniería una desviación del (20 – 25)% es satisfactoria, pues en cada error influyen los siguientes factores:

- ✓ Características de los instrumentos de medición, que en algunos casos pueden ser industriales con menor precisión.
- ✓ Perturbaciones que puedan ocurrir en las variables prefijadas durante las mediciones.
- ✓ Los valores experimentales son promedios de las réplicas.
- ✓ Posibles errores de apreciación cometidos en las mediciones, por pequeñas oscilaciones que ocurren en los líquidos manométricos durante los experimentos.

Tabla 3.4. Valores de velocidad relativa y velocidad de flotación para los diferentes diámetros de partículas.

dx (mm)	Tubería horizontal			Tubería vertical		
	$V_{gA} - V_{SA}$ (m/s)	V_{fA} (m/s)	E (%)	$V_{gA} - V_{SA}$ (m/s)	V_{fA} (m/s)	E (%)
0,250	4,27	5,21	7,84	2,32	5,21	7,10
0,1875	3,6	4,74	8,02	1,97	4,74	8,53
0,1075	3,39	3,83	9,31	1,51	3,83	10,07
Mezcla	5,18	5,21	9,54	2,74	5,21	7,04

En la tabla 3.4 se exponen los valores de velocidad de flotación y velocidad relativa para cada uno de los diámetros de partículas con el fin de minimizar los errores relativos.

El error relativo promedio, en todos los casos, se encuentra por debajo del 10,1% y de acuerdo con los errores relativos puntuales el 87% de ellos estuvo por debajo del

10%. Esto confirma la validez de los resultados obtenidos a partir de la modelación teórica de los sistemas de transporte neumático, desarrollada en el capítulo 2.

En las figuras 3 y 4 de los anexos se expone el comportamiento de las curvas experimentales y las obtenidas a partir del ajuste del modelo para el material polidisperso en tuberías horizontales y verticales en la zona dispersa. De forma similar se hace para los restantes diámetros de partículas ensayados.

3.7. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas para tuberías horizontales y verticales

Con el empleo de los parámetros del modelo, característicos para el mineral laterítico (tabla 3.4), se estudia el comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas para los diferentes diámetros de las partículas manipulados en los experimentos.

En las figuras 3.1 – 3.3 se exponen los valores de dependencia de las pérdidas de presión para diferentes flujos másico de sólido. En todos los casos se usa un diámetro de tubería de 100mm, el modelo del capítulo 2 y los valores de velocidad relativa y de flotación de la tabla 3.4.

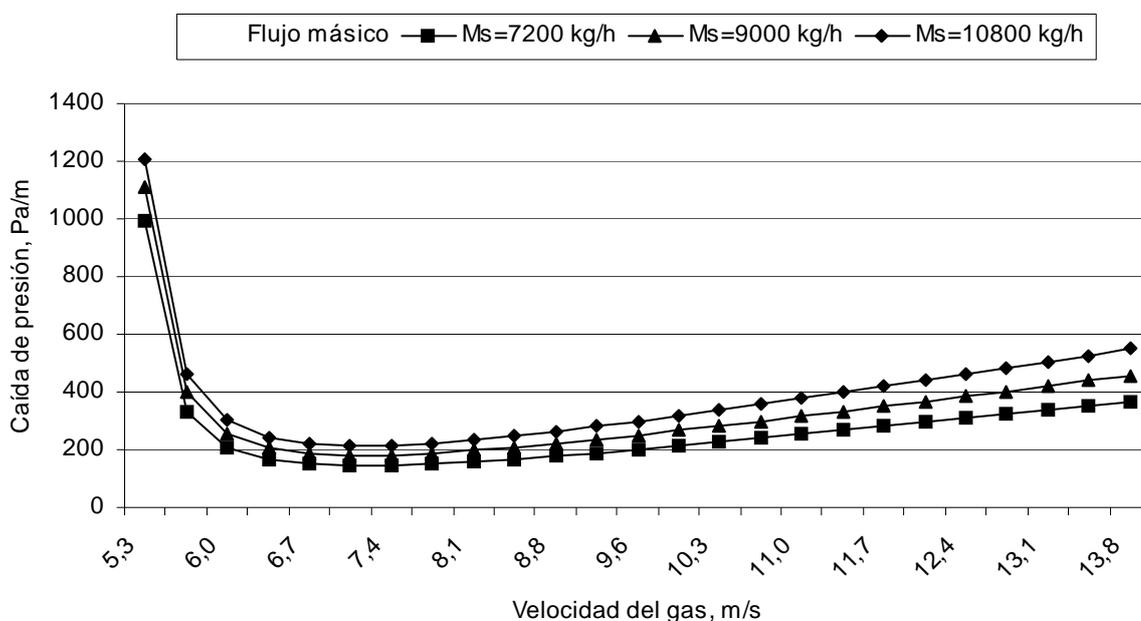


Figura 3.1 Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en tuberías horizontales y $d_x = 0,1075$ mm.

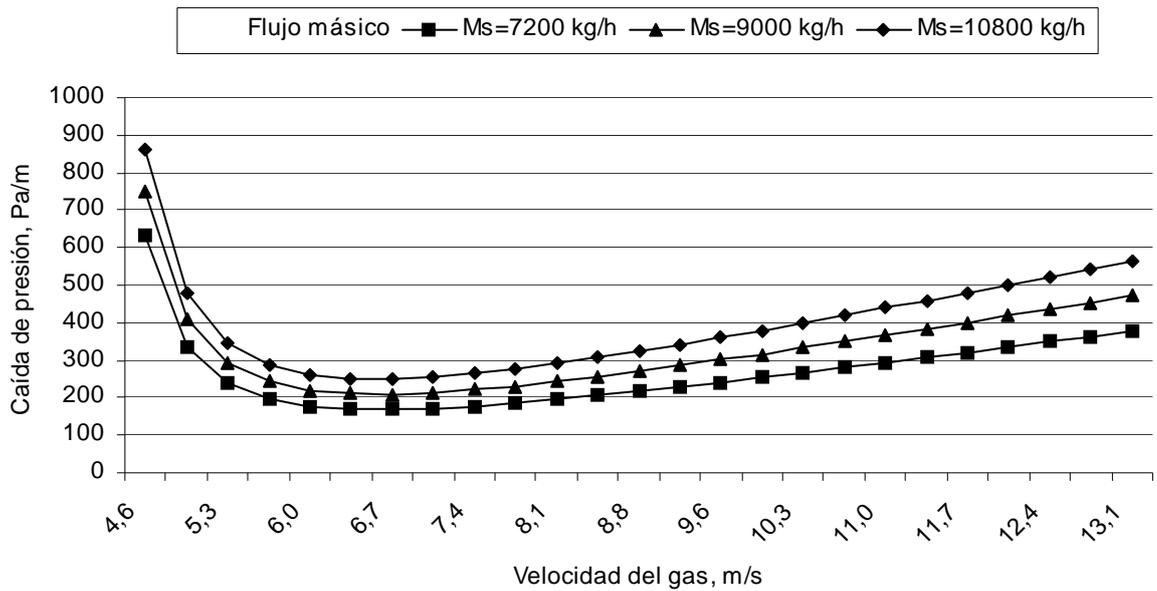


Figura 3.2. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en tuberías horizontales y $dx = 0,1875$ mm.

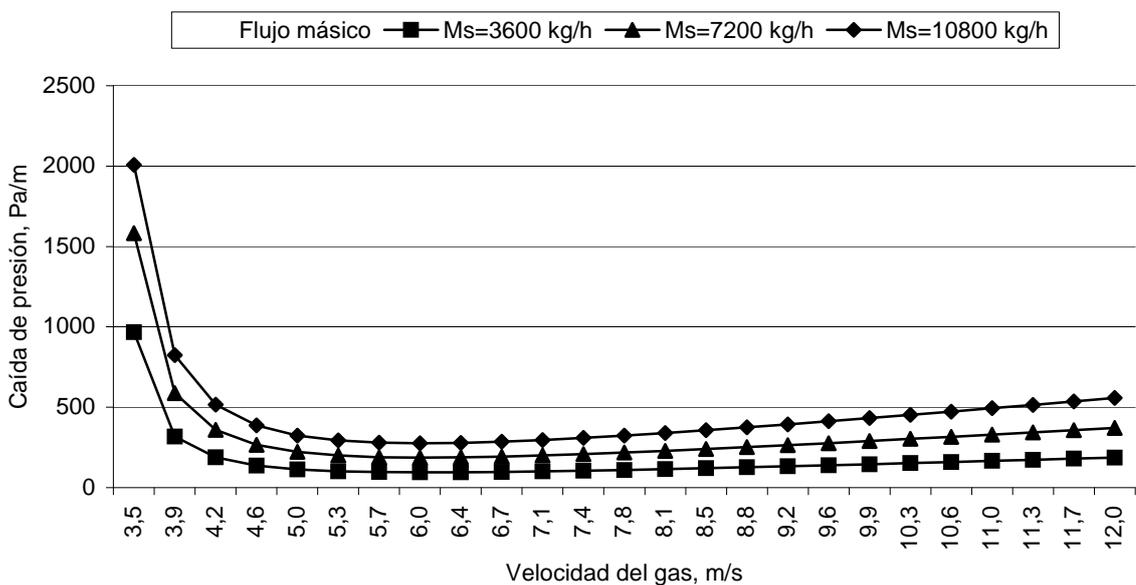


Figura 3.3. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en tuberías horizontales y $dx = 0,250$ mm.

En la figura 3.4 se examina el comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas para el material mezclado, donde se incluyen las diferentes clases de tamaño presente en las muestras.

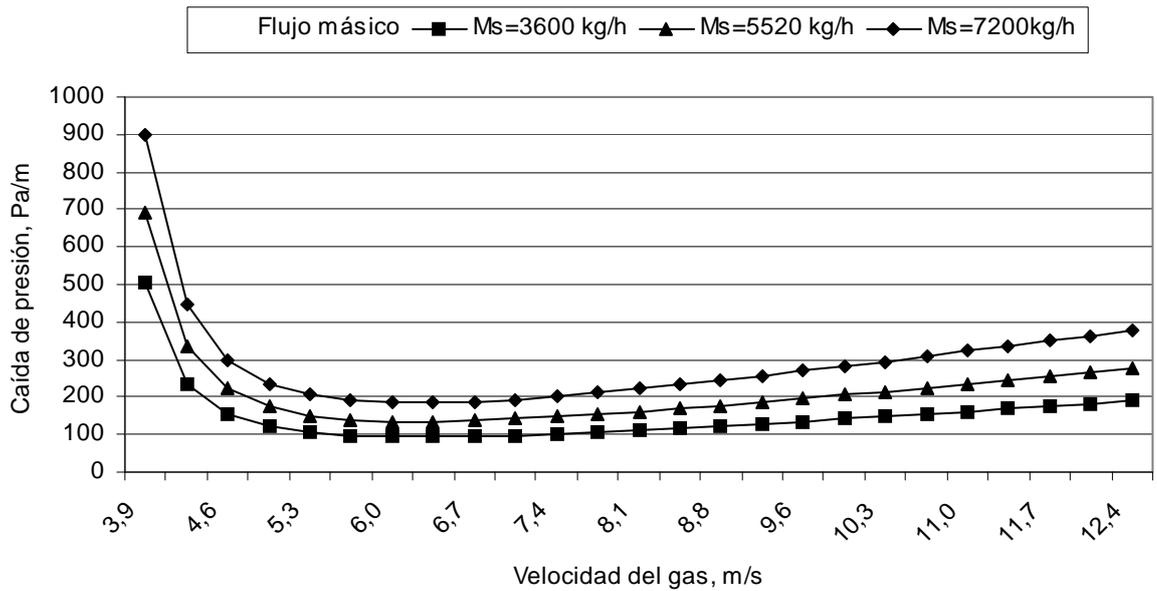


Figura 3.4. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en tuberías horizontales y $dx =$ mezcla de material.

En la figura 3.5 se observa el comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas para los diferentes diámetros de las partículas.

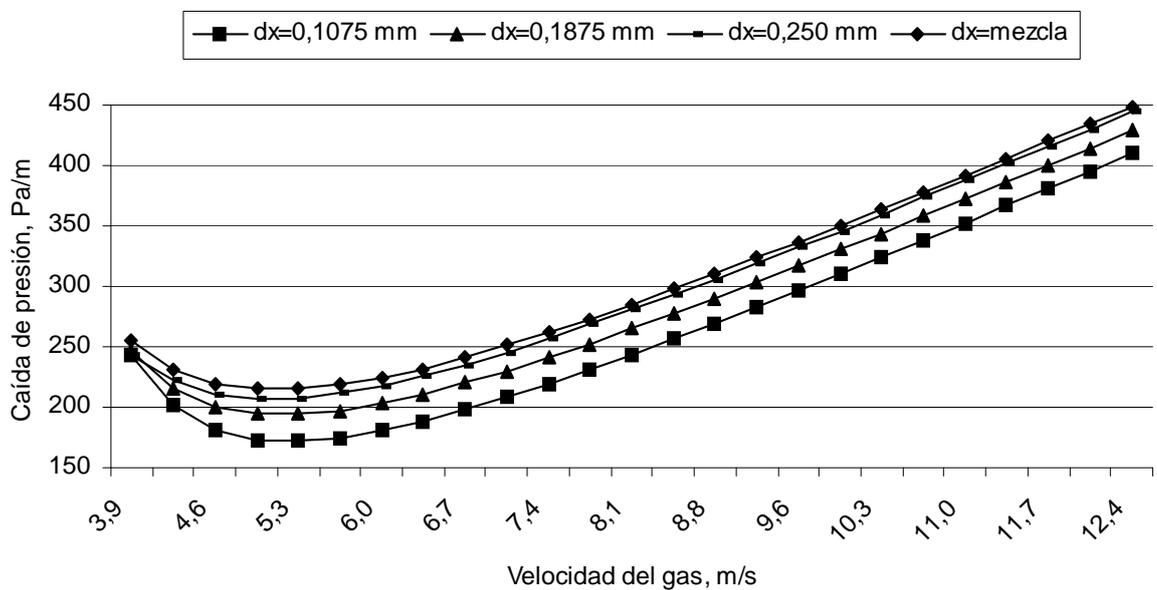


Figura 3.5. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en tuberías horizontales y $M_s = 7200$ kg/h.

Las cinco figuras anteriores examinan la influencia de la velocidad del gas en las pérdidas de presión durante el transporte neumático del mineral laterítico. Los resultados exponen que independientemente del diámetro de las partículas con el incremento del flujo de gas se produce una reducción de la caída de presión hasta alcanzar un valor determinado a partir del que comienza nuevamente a crecer.

En la zona de mínima caída de presión, la reducción de la velocidad provoca un rápido incremento de la concentración de sólido y se alcanza un punto donde el gas no puede arrastrar todo el material, depositándose en el fondo de la tubería. El fenómeno es conocido como “transporte a saltos” y es identificado por grandes fluctuaciones de presión.

La velocidad de transporte a saltos es definida como la más baja velocidad en la que el transporte en fase fluida puede ser operado con una alimentación de sólido determinada. Con el incremento de la alimentación de sólido la velocidad de choque es mayor; esta marca el límite entre las fases fluida y densa en el transporte horizontal. Nótese que la velocidad de transporte a saltos se puede obtener si se reduce la velocidad del gas para un flujo de sólido constante o por incremento del flujo de sólido para una velocidad del gas constante.

Una vez conocidos estos resultados, además de establecer la velocidad de tránsito entre las fases densa y fluida se pueden construir las características de transporte neumático en las condiciones industriales, determinar los parámetros racionales, definir el consumo específico de energía y simular el comportamiento en cualquier otra condición de trabajo del sistema. Ese procedimiento se muestra en el capítulo 4.

El comportamiento del transporte neumático del mineral laterítico en tuberías horizontales muestra diferencias considerables en relación con el transporte en la línea vertical, estas se observaron a través de tuberías transparentes conectados en ambas líneas y a partir del análisis en el comportamiento de los diferentes parámetros de los sistemas.

Los resultados del transporte obtenidos para los diámetros de partículas variables en tuberías verticales se exponen en las figuras 3.6 – 3.8.

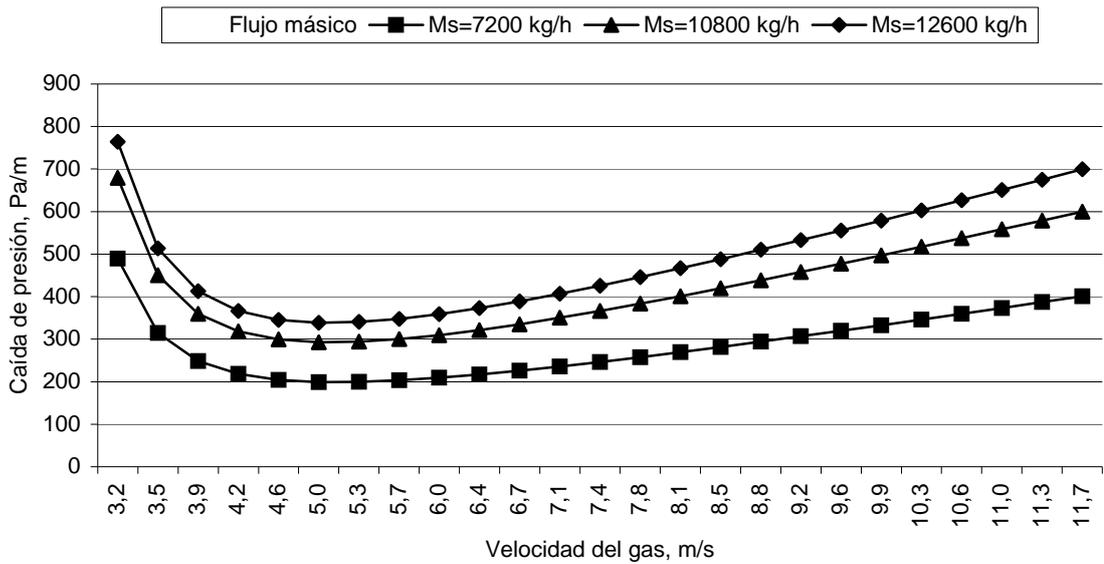


Figura 3.6. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en tuberías verticales y $d_x = 0,1075$ mm

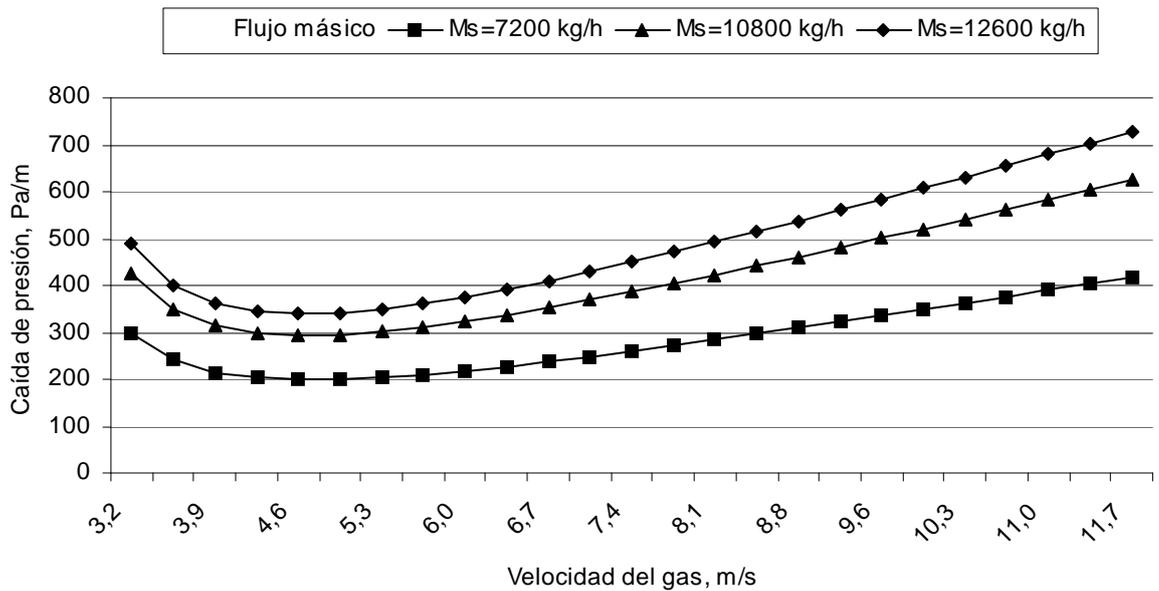


Figura 3.7. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en tuberías verticales y $d_x = 0,1875$ mm

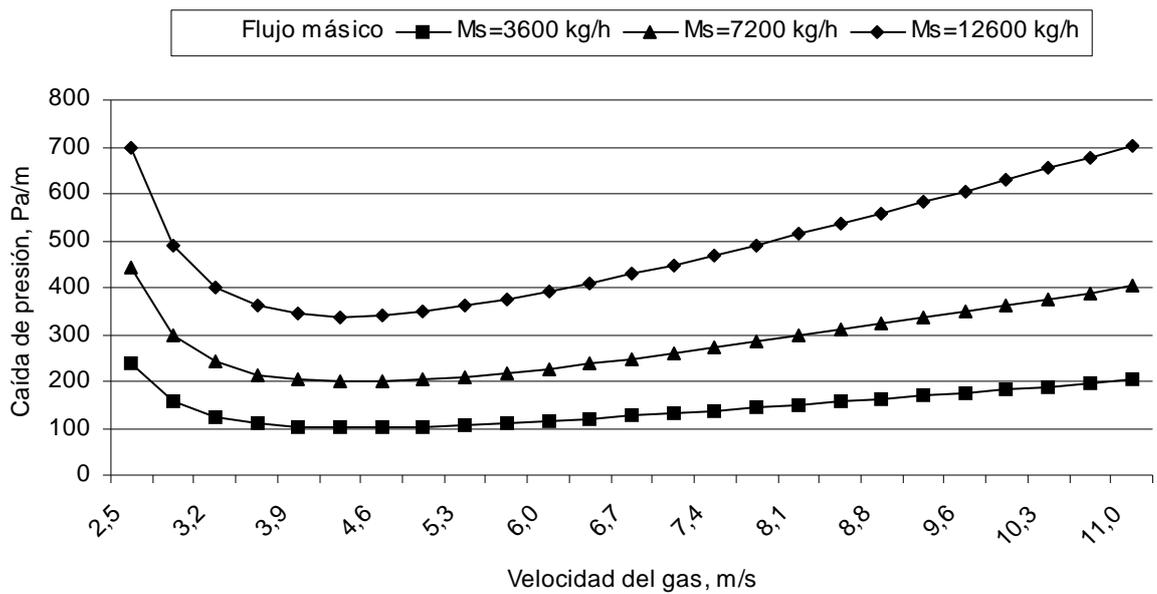


Figura 3.8. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en tuberías verticales y $dx = 0,250$ mm.

En la figura 3.9 se expone la dependencia de las pérdidas de presión en función de la velocidad del gas para la mezcla de material.

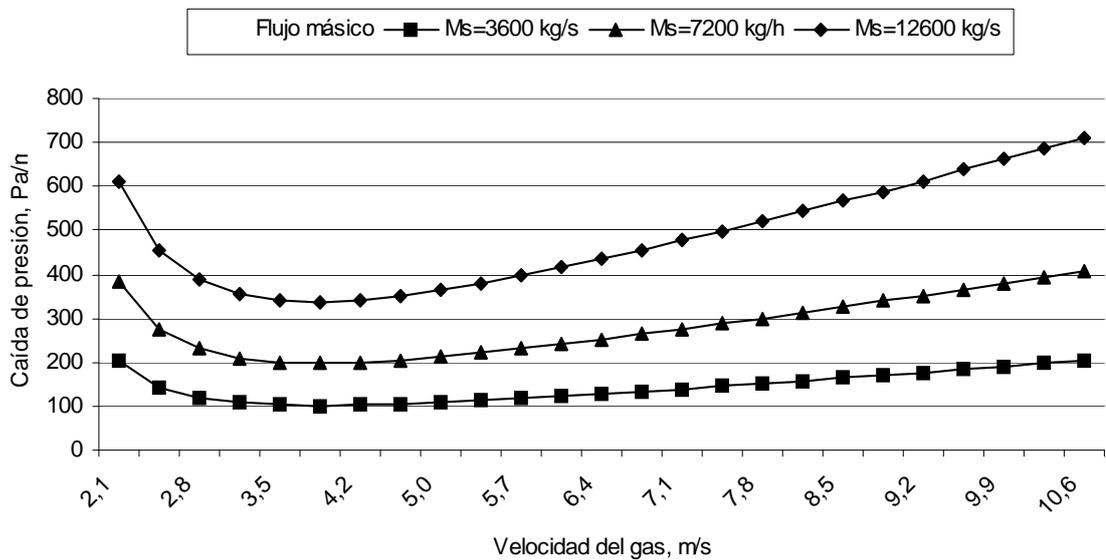


Figura 3.9. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en tuberías verticales y $dx =$ mezcla de mineral.

El comportamiento de la caída de presión en tuberías verticales en función de la velocidad del gas para los diferentes diámetros de las partículas se observa en la figura 3.10.

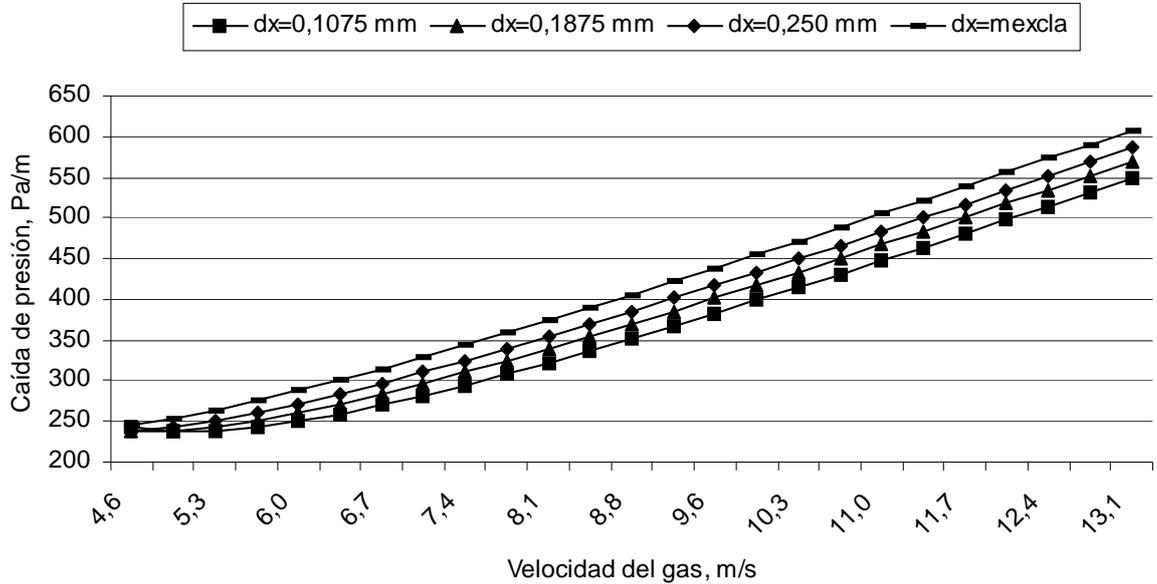


Figura 3.10. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en tuberías verticales y Ms = 8640 kg/h.

En las figuras anteriores (3.6 – 3.10) se observa, al igual que en el transporte horizontal, una zona de caída de presión mínima donde se localiza el tránsito entre la fase densa y fluida. Este fenómeno se conoce como “choque” y la velocidad donde ocurre el mismo se le llama “velocidad de choque”.

De acuerdo con los resultados obtenidos para un diámetro de tubería de 100mm y un flujo de sólido constante, la velocidad de choque es siempre menor que la de transporte a saltos en tuberías horizontales; además en los sistemas de transporte neumático la velocidad de paso entre una fase y otra debe ser seleccionada a partir de la de transporte a saltos.

Las pérdidas de presión en el transporte vertical es mayor que en el horizontal, este comportamiento en el mineral laterítico se expone en las figuras 3.11 y 3.12.

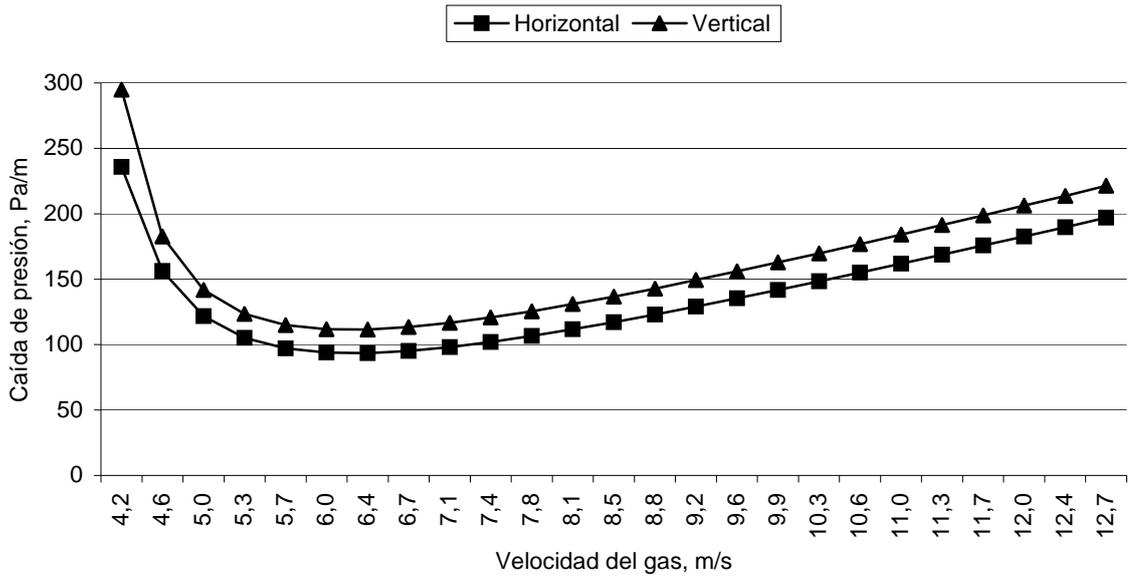


Figura 3.11. Comparación de la caída de presión en función de la velocidad del gas en tuberías horizontales y verticales $M_s = 3600$ kg/h.

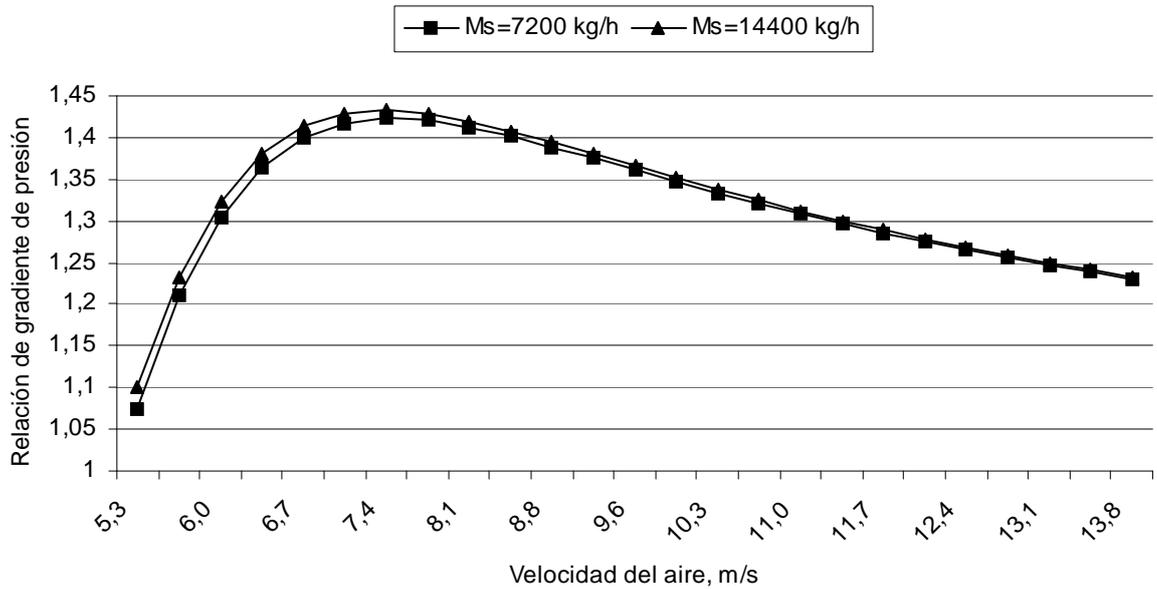


Figura 3.12. Comportamiento de $(dp/dx)_{vertical} / (dp/dx)_{horizontal}$ en función de la velocidad del gas.

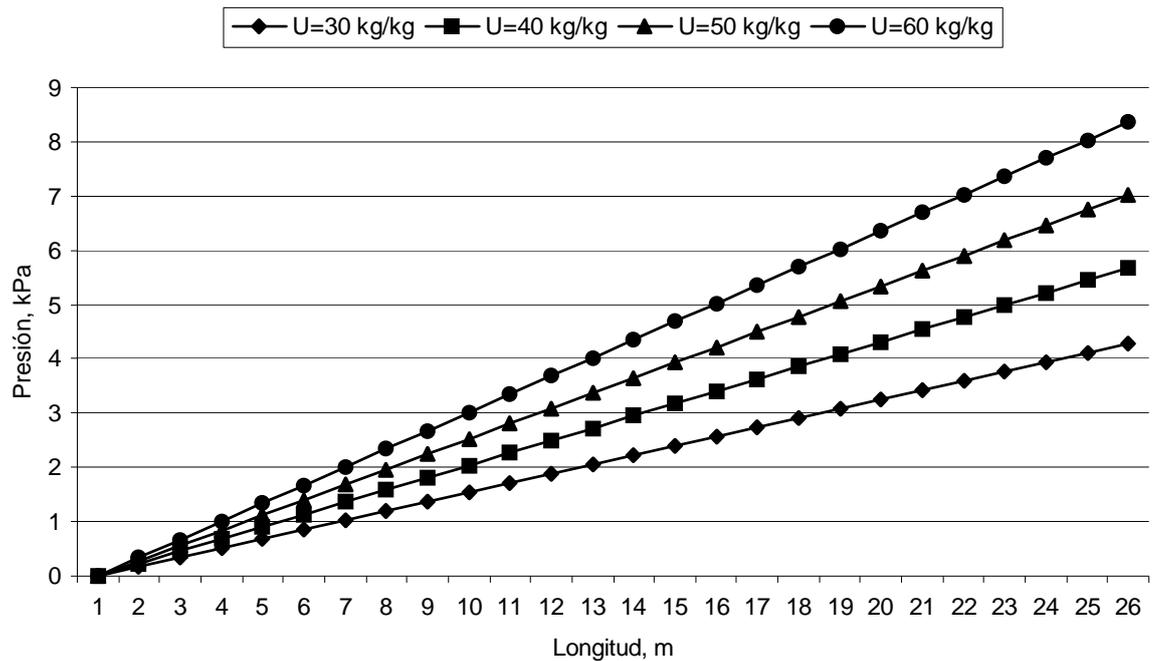


Figura 3.13. Comportamiento de la caída de presión en función de la longitud de la tubería en la línea horizontal.

En la figura 3.12 se observa que el cociente de presión entre ambas líneas se encuentra entre 1.1 y 1.45 en función de la velocidad del gas en que trabaje el sistema, esto permite seleccionar el comportamiento del transporte en una línea si se conocen con anterioridad las características de transporte en la otra. Los mayores valores del cociente se encuentran en la zona de tránsito entre la fase densa y fluida; se observa además un incremento del mismo con el aumento del flujo másico de material transportado.

En las figuras 3.13 y 3.14 se examina el comportamiento de la caída de presión en función de la longitud de la tubería para diferentes valores de concentración. En ellas se observa un incremento de las pérdidas con el incremento de la concentración de la mezcla, aunque para el análisis de los parámetros de eficiencia es necesario considerar el concepto de energía específica y el comportamiento de las características de transporte que ofrecen mayor información sobre el proceso investigado. Este análisis se efectúa en el próximo capítulo.

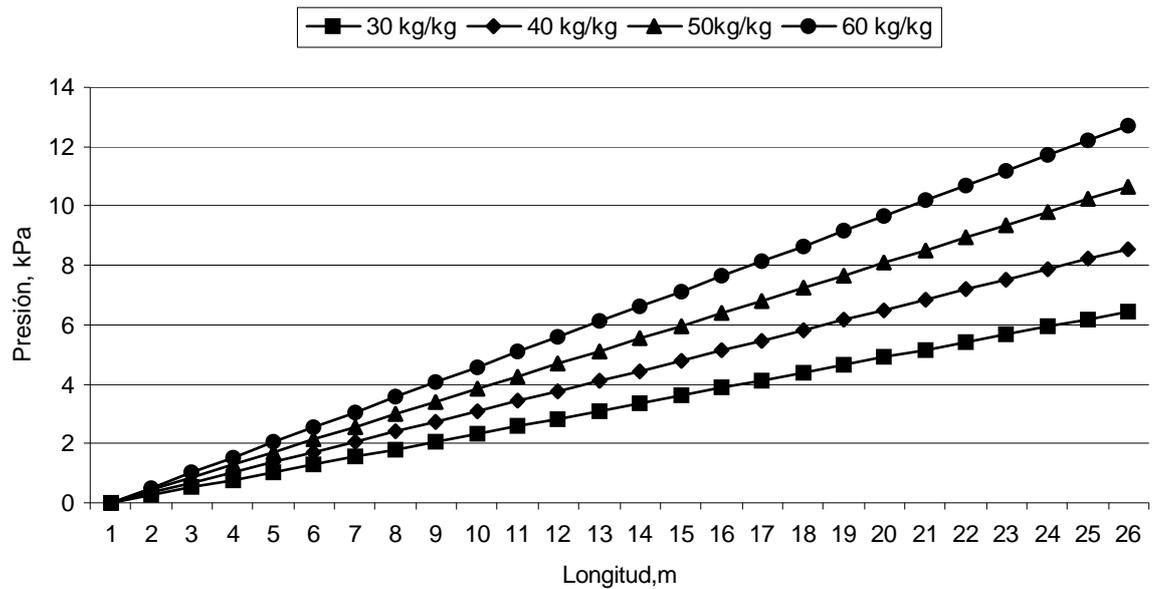


Figura 3.14. Comportamiento de la caída de presión en función de la longitud de la tubería en la línea vertical.

3.8. Conclusiones del Capítulo 3

- ✓ En tuberías horizontales el valor de velocidad de flotación se encuentra entre 3,83 m/s y 5,21 m/s, la velocidad relativa entre el gas y el sólido en el estado de referencia a presión atmosférica oscila entre 3,39 y 5,18 m/s en función del diámetro de las partículas. El error relativo promedio en la estimación de los parámetros está por debajo del 9,54%.
- ✓ El valor de velocidad de flotación en tuberías verticales coincide con el transporte horizontal, la velocidad relativa entre el gas y el sólido en el estado de referencia a presión atmosférica oscila entre 1,51 m/s y 2,74 m/s en función del diámetro de las partículas. El error relativo promedio en la estimación de los parámetros está por debajo del 10,07%.
- ✓ El transporte neumático del mineral laterítico se realiza en fase densa discontinua en zonas inferiores a los 6,12 m/s en el transporte horizontal y 5,21 m/s en el vertical. La zona de transporte en fase densa continua se extiende hasta los 18 m/s en ambos casos.

CAPITULO 4

CAPITULO 4

SIMULACIÓN DEI TRANSPORTE NEUMÁTICO DEL MINERAL LATERÍTICO EN LA EMPRESA COMANDANTE ERNESTO CHE GUEVARA.

4.1. Introducción

En este capítulo, con los valores de los parámetros del modelo, característicos para el mineral laterítico (velocidad de flotación y velocidad relativa entre el gas y el sólido de la tabla 3.4), las ecuaciones 2.41, 2.42 y las expresiones de enlace, se simula el transporte neumático de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Se compara el comportamiento de los parámetros actuales y los obtenidos a través de la simulación. Se construyen las características de transporte y se establece la zona de trabajo racional a partir de consideraciones esenciales sobre el consumo de energía.

El **objetivo** del capítulo es:

- ✓ Simular el transporte neumático del mineral laterítico en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara

4.2. Simulación del transporte neumático del mineral lateríco en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

En la empresa Comandante Ernesto Che Guevara existen tres grupos fundamentales de sistemas de transporte neumático que son:

1. Transporte neumático desde la salida de los secaderos hasta las tolvas de producto final de los molinos (cuatro sistemas independientes).
2. Transporte neumático desde las tolvas de producto final de los molinos hasta los silos (seis sistemas independientes).
3. Transporte neumático desde los silos hasta las tolvas de los hornos de reducción (nueve sistemas independientes).

Los detalles en la configuración de las líneas usadas en el proyecto se exponen en la tabla 4.1 y el anexo 6.

Tabla 4.1. Características de los sistemas de transporte neumático de la Empresa Ernesto Che Guevara.

Sistema	Diámetro (mm)	Longitud (m)		# de codos	Cantidad de material (T/h)
		Horizontal	Vertical		
1	250	356	16	4	280
2	250	87	30	6	440
3	250	232	42	5	440

4.2.1. Simulación de las pérdidas de presión en función de la velocidad del gas para tuberías horizontales y verticales.

En el capítulo 3 se analiza el comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas para diferentes condiciones del sistema, este razonamiento se efectúa para pequeñas cantidades de material transportado en la instalación experimental (menores de 15 T/h). Si se consideran los flujos necesarios a transportar en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara mostrados en la tabla 4.1, en este epígrafe se simula el comportamiento para diferentes diámetros de tuberías y configuraciones horizontales y verticales. Ello se hace con el empleo de los modelos expresados por las ecuaciones 2.41, 2.42, tabla 3.4 y las ecuaciones de enlace (ver figuras 4.1 y 4.2).

En las gráficas 4.1 y 4.2 se observa la existencia de valores de velocidad del gas para los que las pérdidas de presión son mínimas, esta zona coincide con el tránsito entre la fase densa y la fase fluida. A partir de estos valores las pérdidas de presión aumentan con el incremento de la velocidad del gas y se produce una rápida reducción de la concentración de la mezcla. En tuberías horizontales el valor promedio de la velocidad de transporte a saltos es 6,12 m/s y para tuberías verticales la velocidad de choque es 5,21 m/s, por lo que se observa que en un sistema combinado es necesario escoger la velocidad mínima a partir del límite establecido de la velocidad de transporte a saltos en tuberías horizontales.

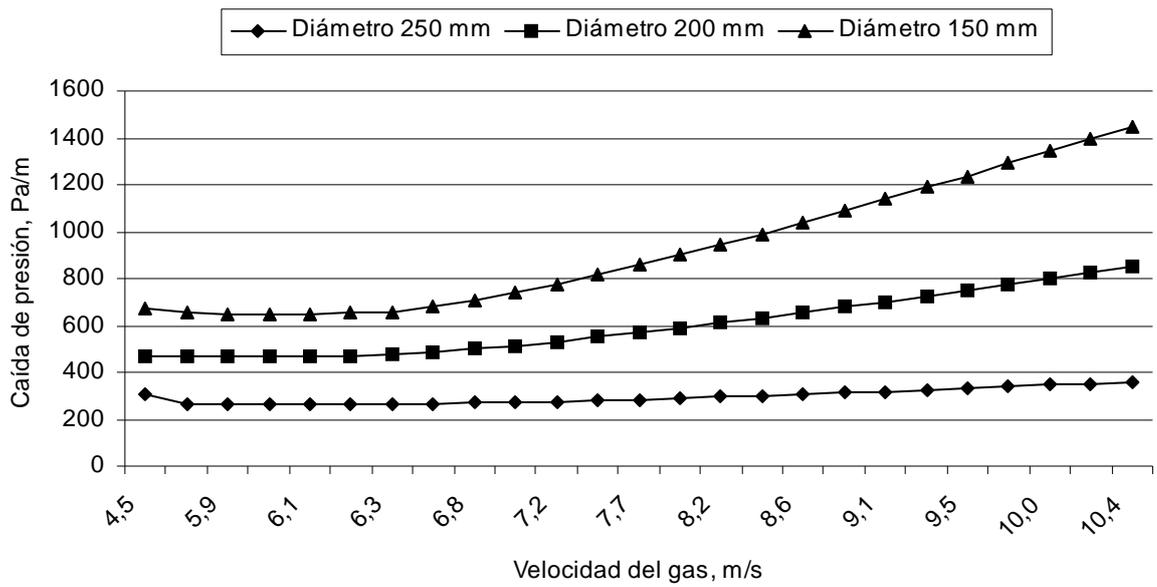


Figura 4.1. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas para tuberías horizontales y Ms=100 T/h.

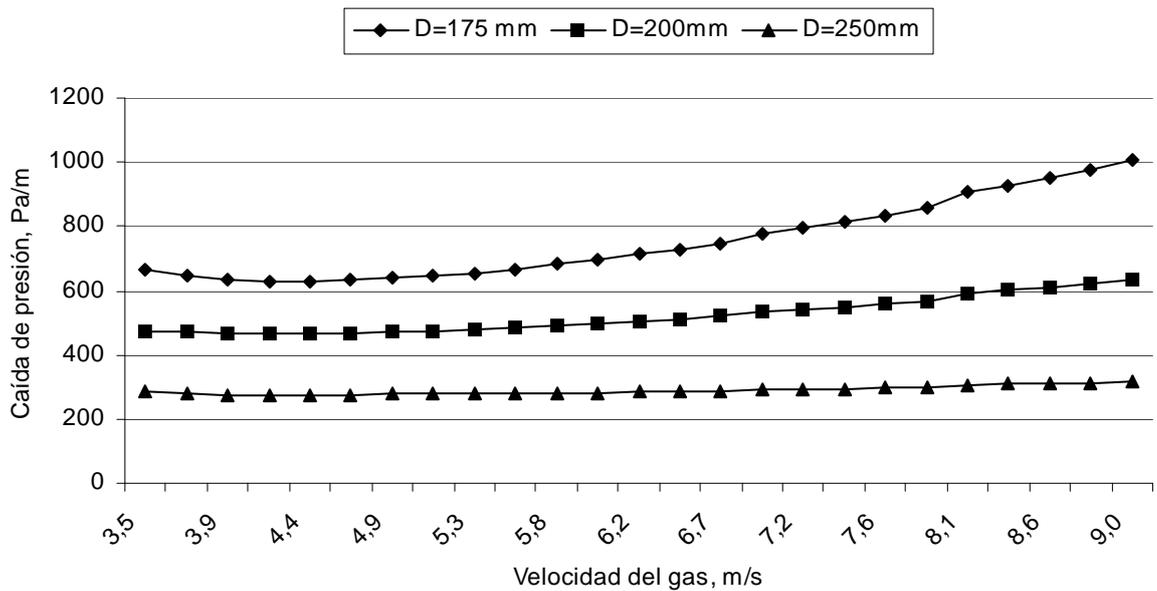


Figura 4.2. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas para tuberías verticales y Ms=100 T/h.

4.2.2. Simulación de las características de transporte en tuberías horizontales y verticales.

Para observar la interrelación entre los parámetros que intervienen en el transporte neumático del mineral laterítico y obtener la información necesaria sobre el comportamiento de las variables, es necesario simular las características de transporte, para ello se utiliza el modelo matemático en tuberías horizontales y verticales, así como las ecuaciones de las pérdidas en accesorios obtenidas en el capítulo 2.

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 y los restantes el punto de operación del alimentador de aire (usualmente el componente más caro del sistema). Con el uso de los tres se define el rango de posibles condiciones de operación logradas por un material a granel en un sistema particular, este comportamiento es conocido como la característica de transporte de materiales.

En las características de transporte se expone el comportamiento del flujo másico de sólido en función del flujo másico de gas y la caída de presión necesaria para transportar el material a diferentes concentraciones. Ellas se simulan para tuberías horizontales, verticales y codos.

En tuberías horizontales este comportamiento se observa en las figuras 4.3 y 4.4. En ellas está presente una zona de trabajo racional de los sistemas de transporte neumático desplazada hacia la izquierda de las figuras donde se alcanzan los mayores valores de concentración y las menores pérdidas de presión.

Con el aumento de la concentración de la mezcla crece el flujo másico de sólido transportado, pero ello va acompañado del incremento de la caída de presión en el sistema, por lo que para la selección de los parámetros racionales además de

trabajar con las gráficas de las características de transporte es necesario considerar el consumo específico de energía.

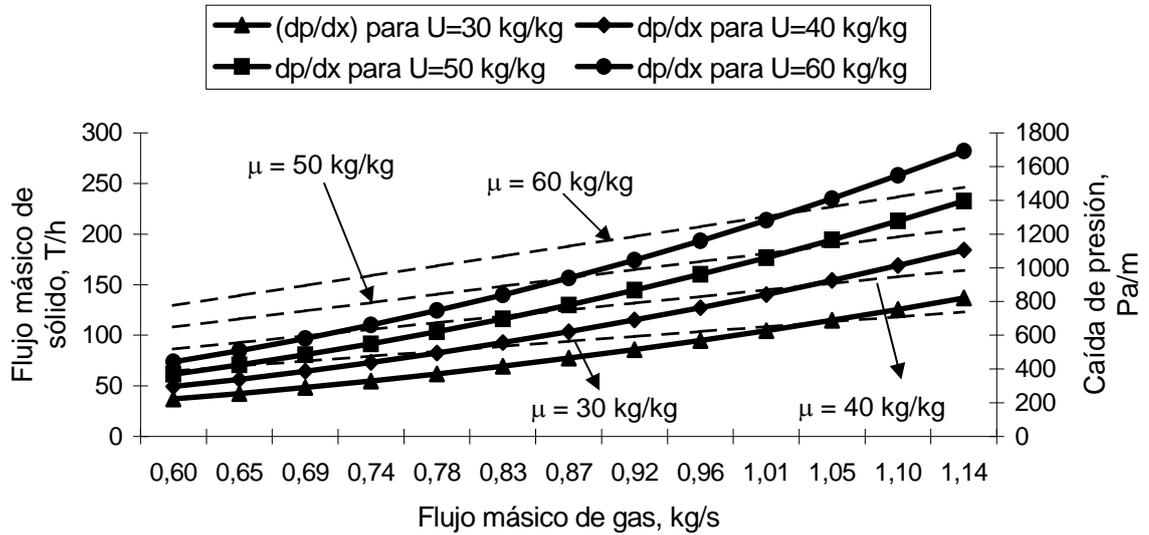


Figura 4.3. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en tuberías horizontales y D = 250 mm.

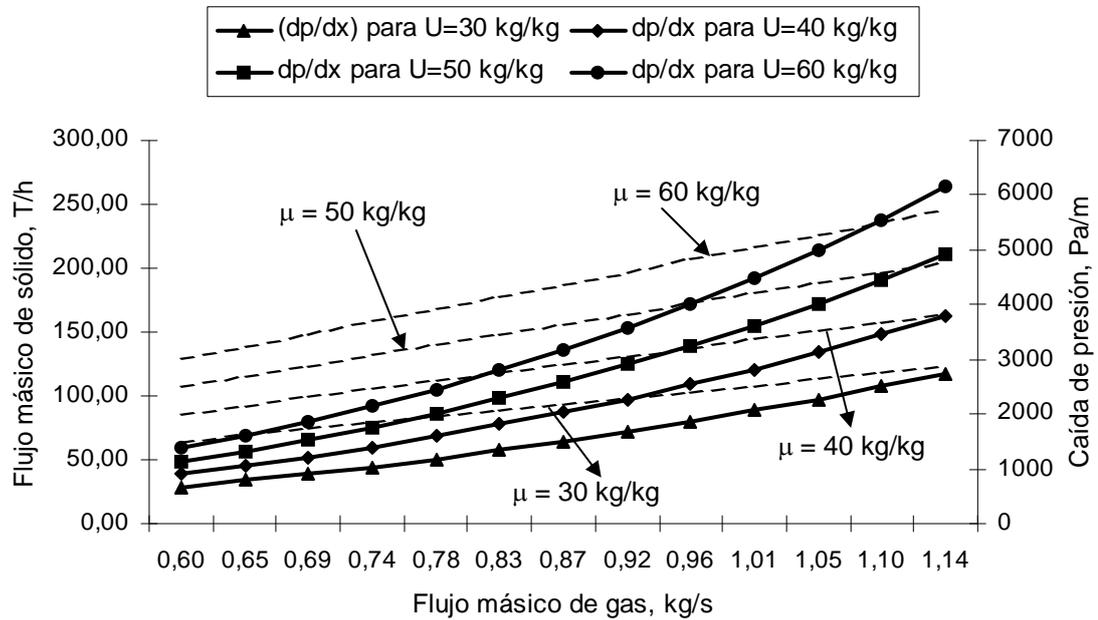


Figura 4.4. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en tuberías horizontales y D = 200 mm.

De forma similar, la simulación de las características de transporte para tuberías verticales y diferentes diámetros de la tubería se exponen en las figuras 4.5 y 4.6.

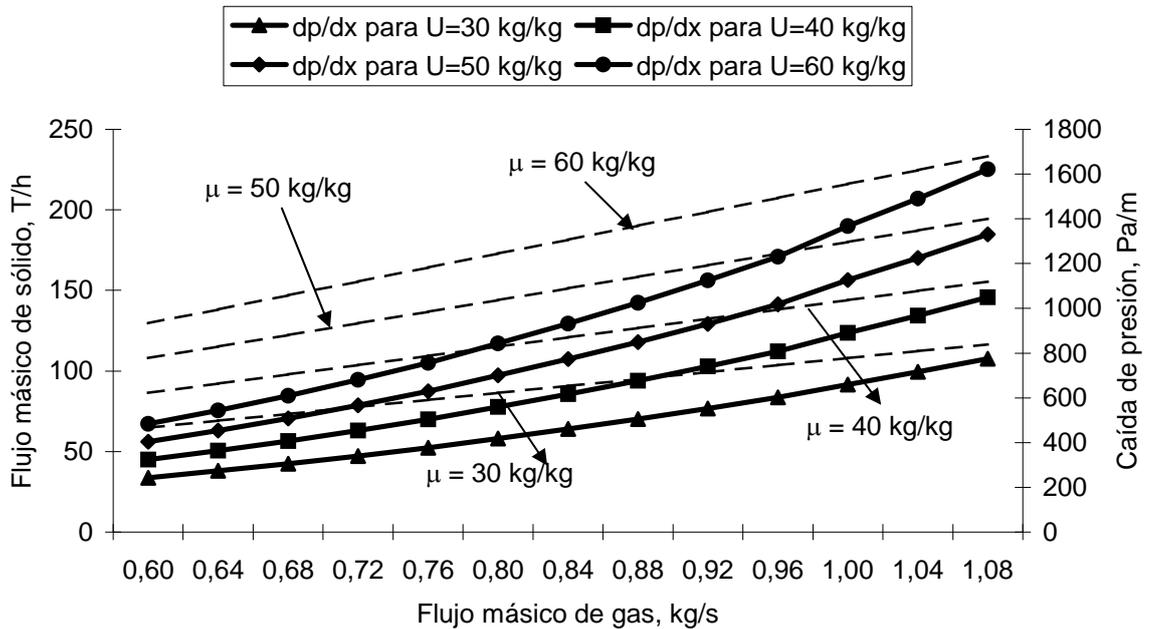


Figura 4.5. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en tuberías verticales y D = 250 mm.

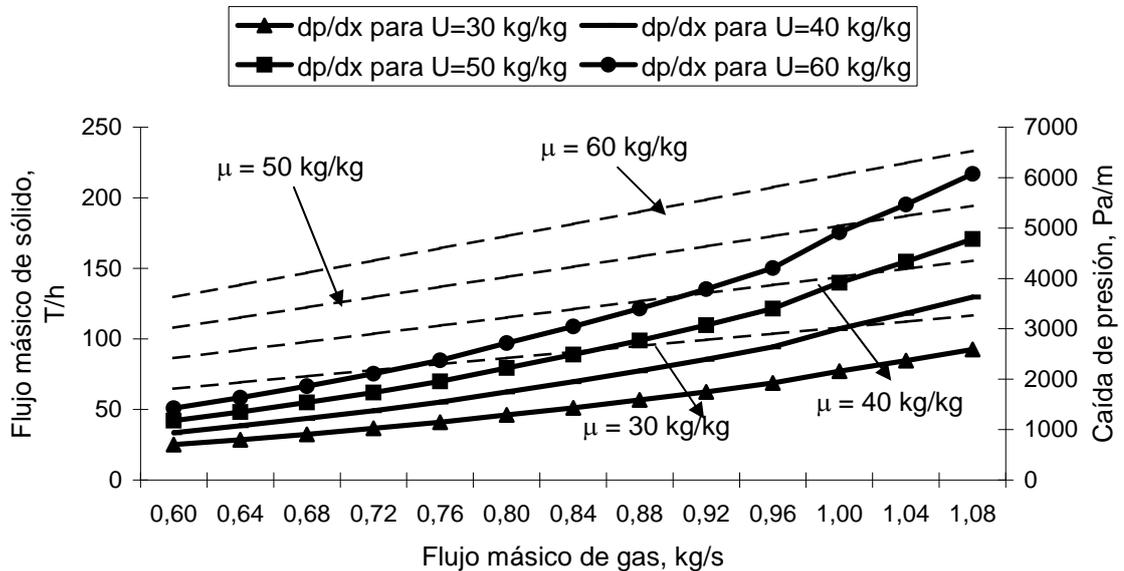


Figura 4.6. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en tuberías verticales y D = 200 mm.

Las características de transporte en tuberías horizontales y verticales se simulan para un amplio rango de flujo másico de sólido, desde (65 –230) T/h. Los resultados

de las figuras 4.3 – 4.6 revelan que independientemente de la orientación de la tubería con el incremento del flujo másico de gas, se incrementa el gradiente de presión necesario para transportar el material. Esto sucede hasta la zona de tránsito entre la fase densa y fluida donde ocurre lo contrario. Las menores caídas de presión ocurren para un diámetro de 250mm.

Estos resultados no son suficientes para definir los parámetros de transporte neumático, aunque permiten obtener criterios preliminares que se complementan con el análisis de las pérdidas en accesorios, la valoración del consumo de energía específica de los sistemas y el ajuste del modelo en una unidad productiva.

4.2.3. Simulación de las pérdidas en codos

Para el análisis de las pérdidas en codos en los sistemas de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara se emplean las ecuaciones (2.54 – 2.62), la simulación del comportamiento de estas pérdidas en tres posiciones diferentes: horizontal - horizontal (H – H), horizontal – vertical (H – V) y vertical – horizontal (V – H) se observan en las figuras 4.7 – 4.9.

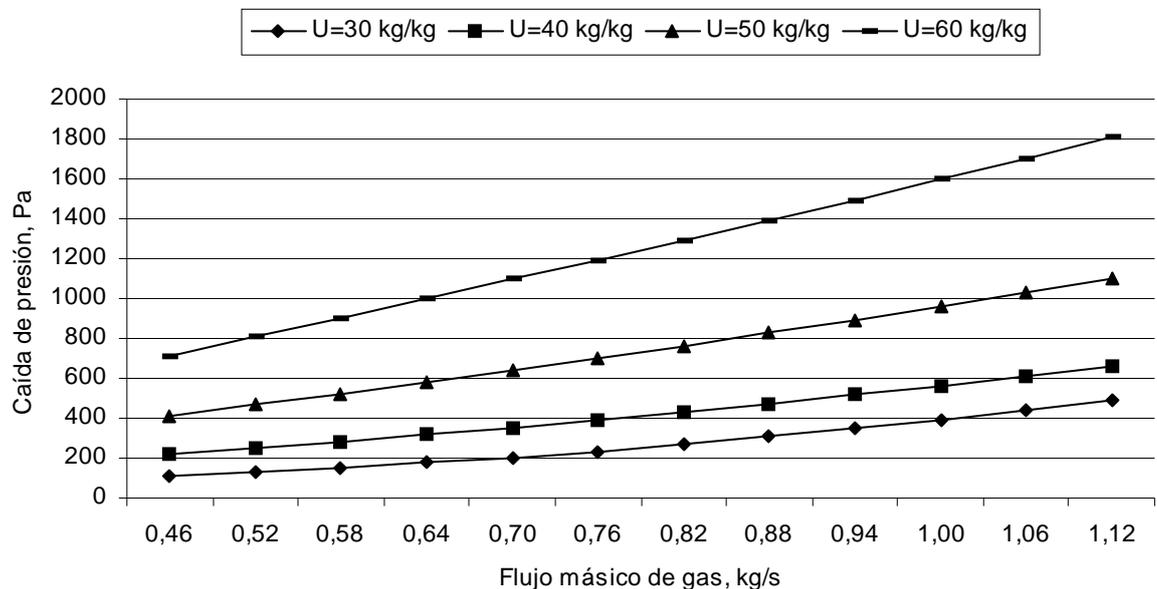


Figura 4.7. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en codo horizontal – horizontal.

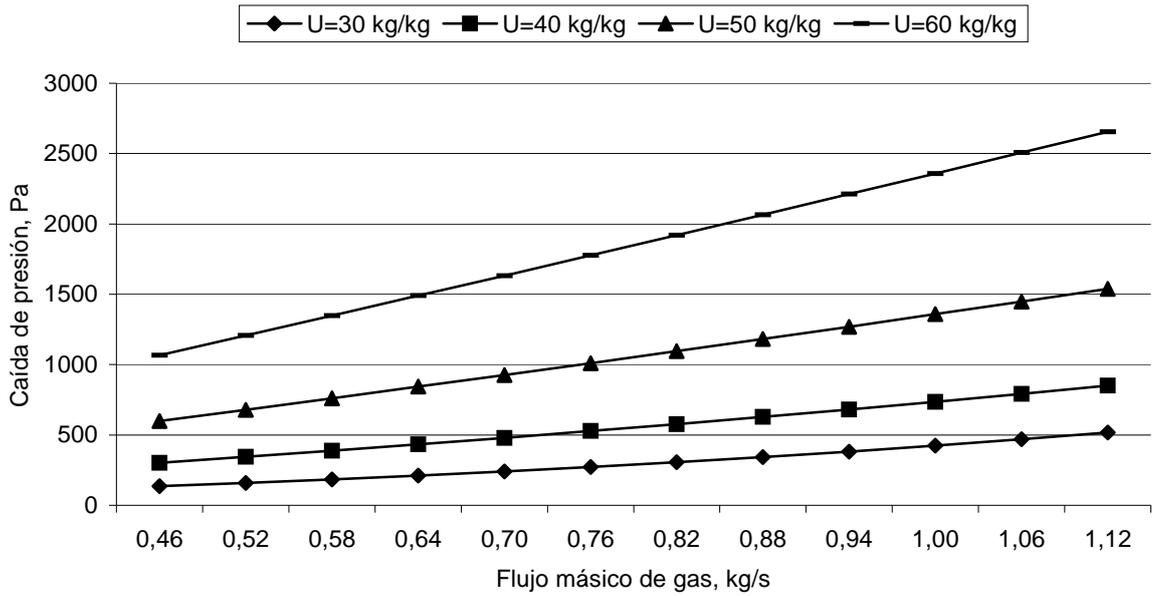


Figura 4.8. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en codo vertical – horizontal

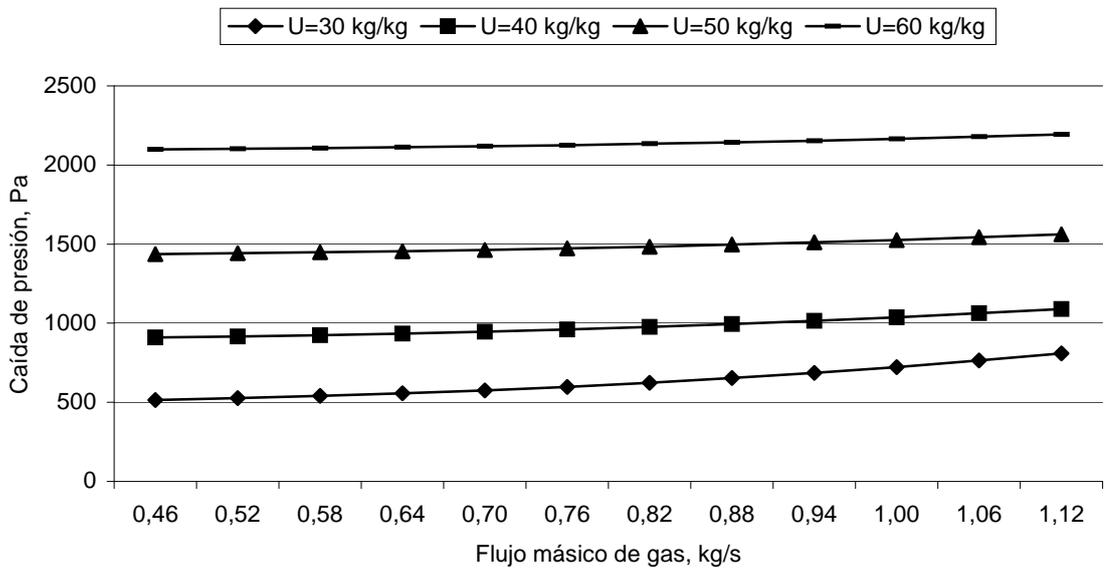


Figura 4.9. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en codo horizontal – vertical.

4.2.4. Simulación de las características de transporte de los sistemas generales.

Para examinar el comportamiento total del sistema mediante la interrelación de los parámetros de cada uno de los elementos se construyen las características de transporte que incluyen de forma integrada las pérdidas en tramos horizontales, verticales y codos. En estos últimos se tiene en cuenta la zona dispersa y de dispersión del material, se incluye además las pérdidas en la alimentación del material. Los efectos del estudio se exponen en las figuras 4.10 - 4.12 para un diámetro de tuberías de 250 mm.

En las características de transporte se interrelacionan los parámetros fundamentales de un sistema, ellos son: Flujo másico de gas, flujo másico de sólidos, caída de presión y concentración de la mezcla.

En las figuras 4.10 hasta la 4.12 se observa el incremento de la caída de presión con la concentración de la mezcla y el flujo másico de gas. En las zonas inferiores a 0,7 kg/s se producen las menores pérdidas de presión, las que se encuentran por debajo de los $3 \cdot 10^5$ Pa. Los valores de flujo másico de sólidos alcanzan las 120 T/h, lo que permite transportar la cantidad de material necesaria en cada etapa del proceso.

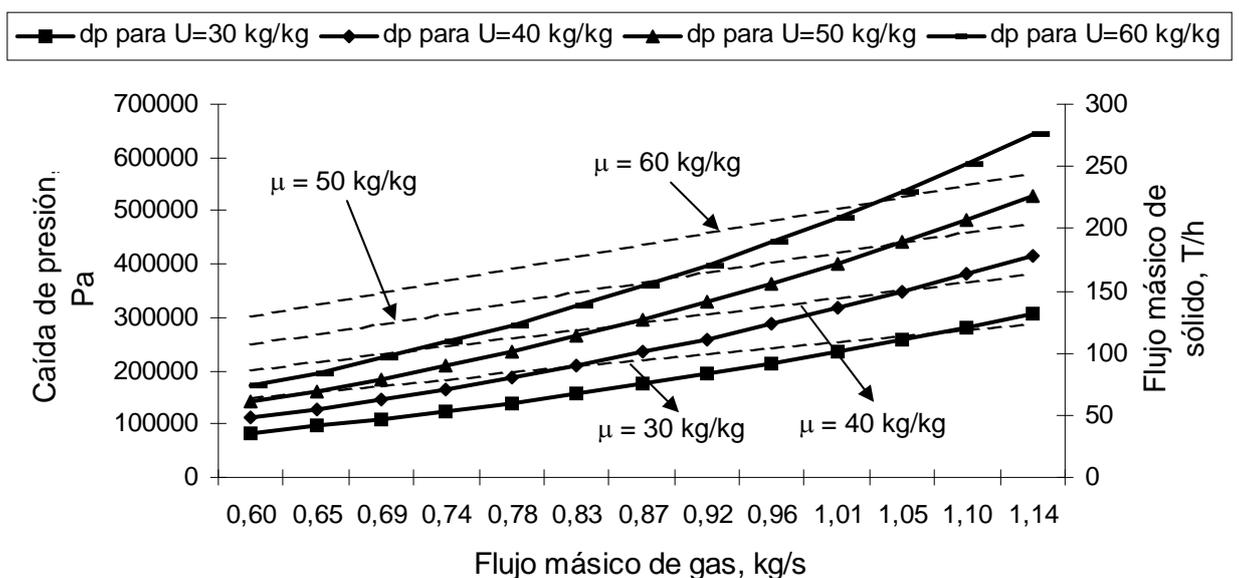


Figura 4.10. Característica de transporte neumático del mineral laterítico para el sistema 1 y D=250 mm.

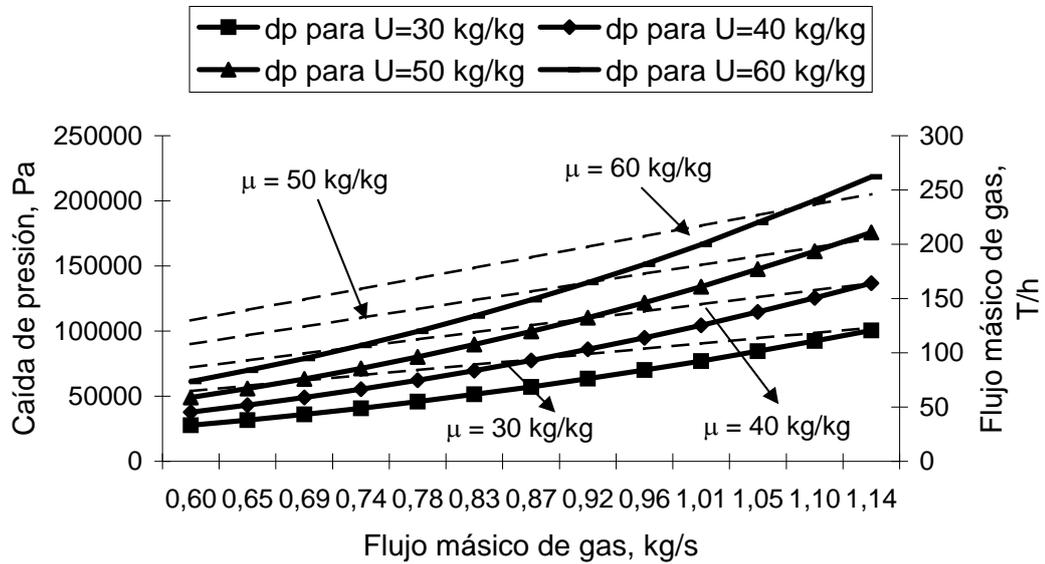


Figura 4.11. Característica de transporte neumático del mineral laterítico para el sistema 2 y D=250 mm.

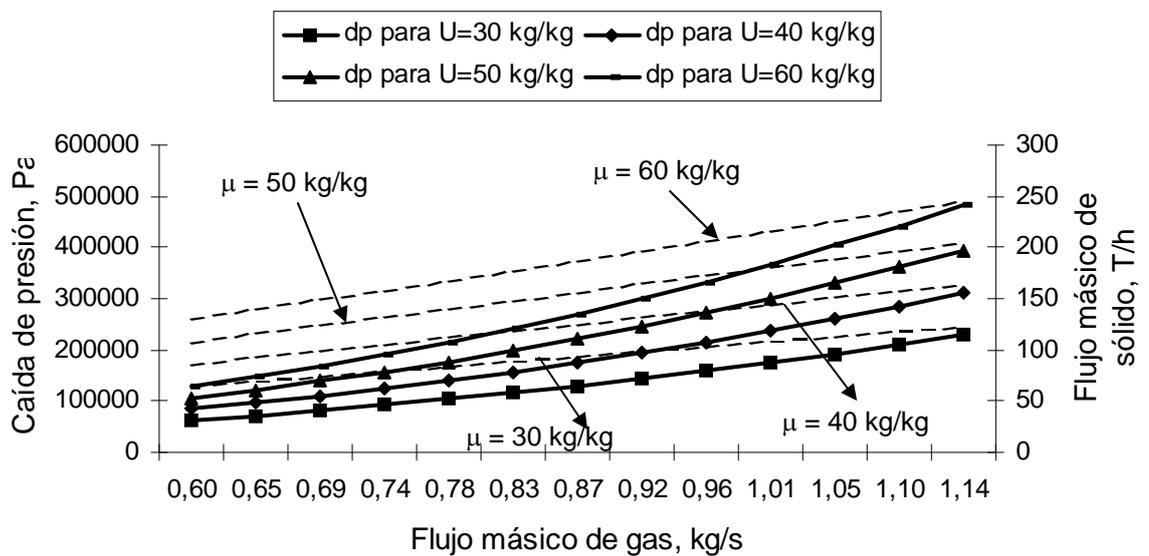


Figura 4.12. Característica de transporte neumático del mineral laterítico para el sistema 3 y D=250 mm.

En las figuras 4.13 hasta 4.15 se muestra la simulación de las características de transporte de los sistemas para un diámetro de tuberías de 200mm.

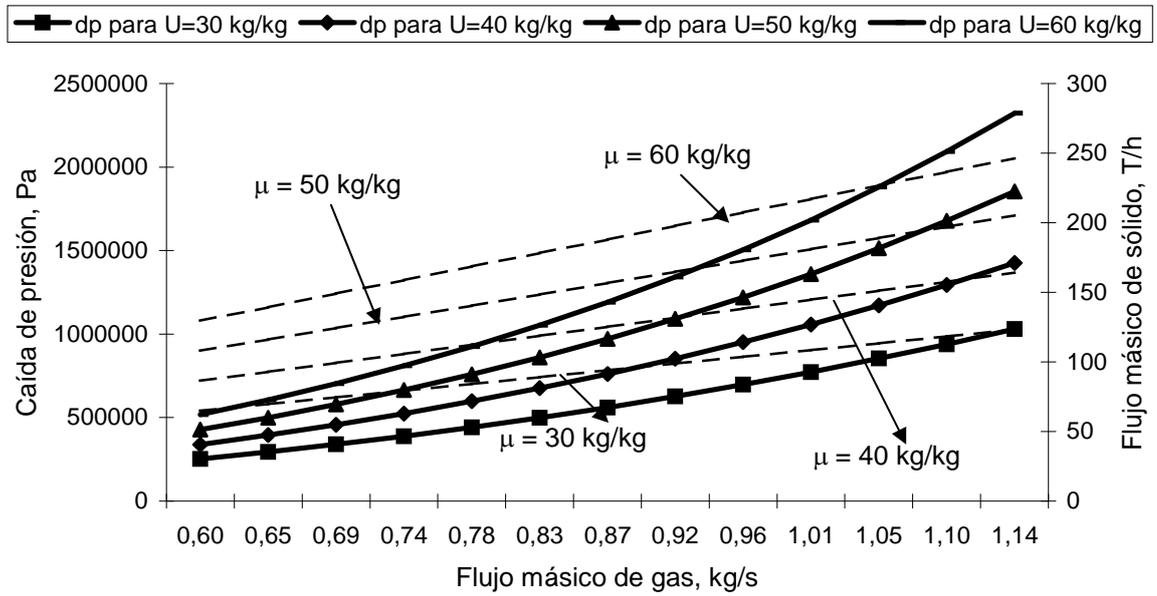


Figura 4.13. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en la empresa Ernesto Che Guevara para el sistema 1 y D = 200 mm.

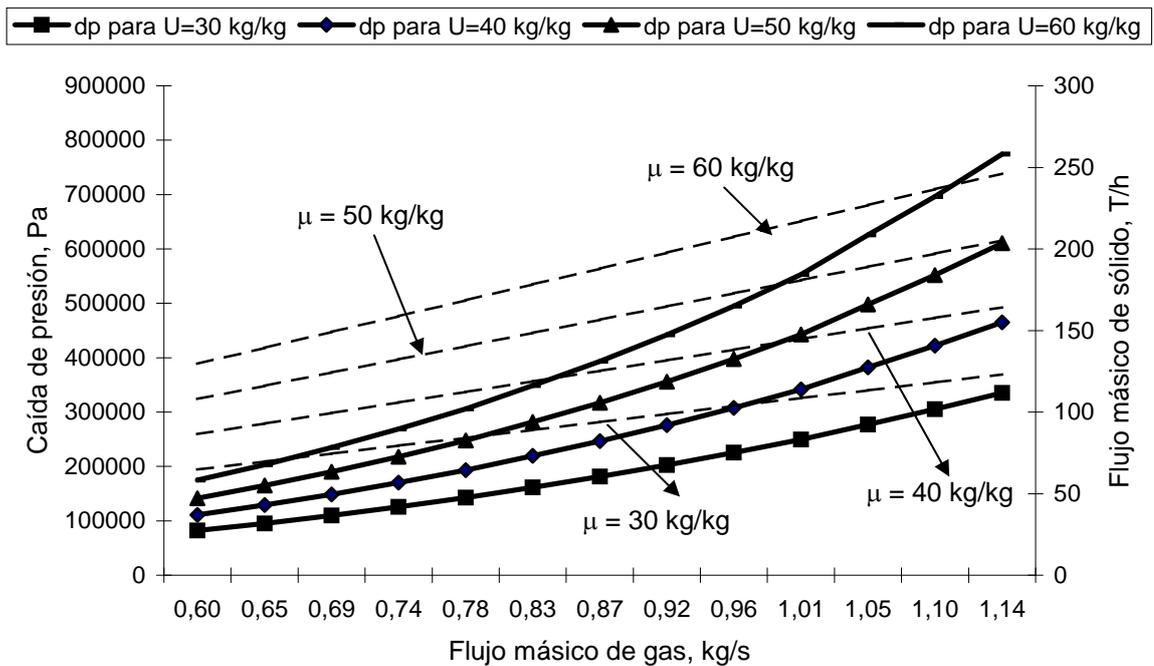


Figura 4.14. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en la empresa Ernesto Che Guevara para el sistema 2 y D = 200 mm.

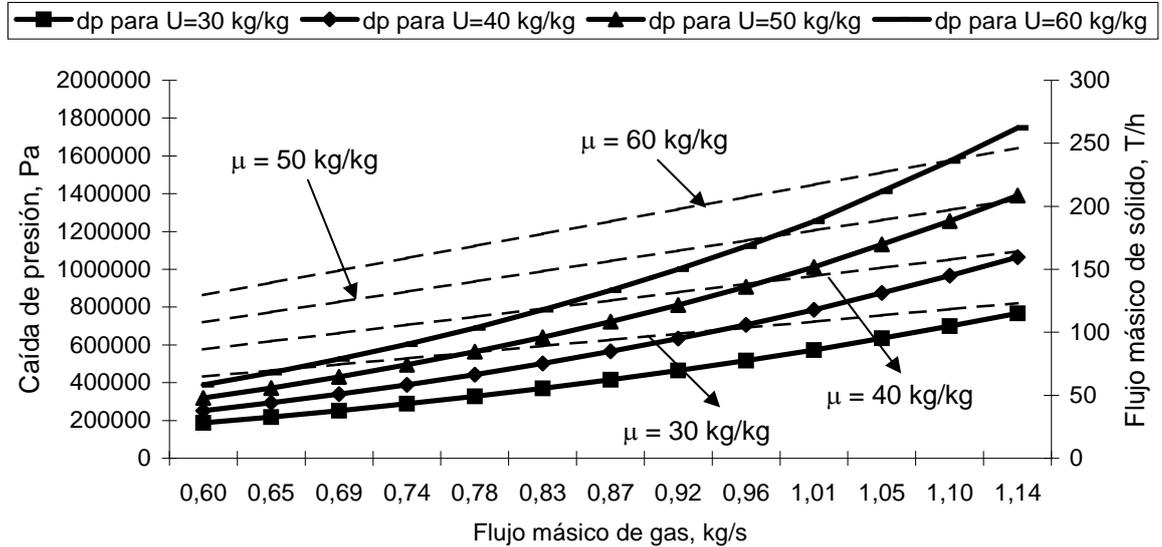


Figura 4.15. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en la empresa Ernesto Che Guevara para el sistema 3 y D = 200 mm.

Se revela la tendencia a la reducción de la caída de presión en las zonas de flujo másico de gas inferiores a los 0,7 kg/s donde el material comienza la tendencia a trasladarse en fase densa continua. Los valores de flujo másico en la zona de menores consumos es posible escogerlos dentro de los requeridos por el proceso de reducción del mineral (100 – 120 T/h por cada sistema).

4.3. Valoración económica

Los costos de los sistemas de transporte neumático pueden dividirse en costo capital y costo de operación por tonelada de material transportado. Los costos de operación determinan el consumo de energía específica que tiene las unidades de kJ/kg de material transportado. La energía específica varía para un sistema de transporte neumático con el cambio de las propiedades del material y comportamiento del aire usado.

Costo capital

Los sistemas de transporte neumático constan de cuatro elementos fundamentales: tubería, cámara de alimentación, alimentador de aire y separador. El costo de cada

uno de ellos cambia con el diámetro de la tubería y con esta la presión y el flujo de aire alimentado. El efecto del incremento en los costos con el diámetro de la tubería es fácil de predecir. Otros como: el costo del alimentador de aire, la cámara de alimentación y el separador para un rango de trabajo determinado, son más difíciles de predecir. No obstante, cuando las condiciones de diseño para cada sistema han sido establecidas, las componentes necesarias son especificadas y la estimación de los costos capitales son obtenidos.

Costo de operación

El costo de operación de un sistema de transporte neumático se divide en tres partes fundamentales.

- ✓ Costo debido a la degradación del producto
- ✓ Costo de mantenimiento
- ✓ Costo energético

Degradación del producto

El material al ser transportado en una tubería puede sufrir daños debido a las colisiones con otras partículas y con las paredes de la tubería, particularmente cercano a los codos. La cantidad de daños al material depende de la naturaleza, forma de este y la velocidad de transporte; el costo de los daños depende del cambio en el valor del producto y sus efectos en el proceso siguiente. El material fino producido requiere de un proceso adicional para llevarlo hasta las especificaciones requeridas.

Es difícil en la etapa de diseño predecir cuantitativamente la extensión del cambio de diámetro de las partículas y las pérdidas consecuentes en el valor del producto o el incremento en el costo del proceso. Cuando la degradación es considerable se aconseja el empleo de los sistemas con velocidades cercanas al transporte en fase densa.

En la empresa Comandante Ernesto Che Guevara después de un proceso de molienda se produce el transporte neumático en dos etapas hasta los hornos de reducción. A estos últimos debe llegar el material con granulometría por debajo de los 0,074mm. Durante el proceso de transporte, el material no sufre cambios

significativos que puedan afectar el proceso de reducción, además en las propuestas realizadas en este trabajo se plantea un incremento de la concentración de la mezcla y reducción de la velocidad de transporte lo que favorece el proceso posterior.

Costo de mantenimiento

Los sistemas de transporte neumático son en la mayoría de los casos parte integrante de una planta de proceso. Si el sistema no está disponible en el momento requerido porque precisa mantenimiento, la planta completa puede pararse e incurrir en costos elevados. Cuando la planta opera a plena capacidad el costo se aproximará al valor de la producción durante el período de tiempo de la parada, más el costo propio de la reparación. Si la operación está por debajo de la plena capacidad, el costo se aproximará al tiempo de trabajo necesario para alcanzar la producción requerida.

El costo por mantenimiento de los sistemas de transporte neumático se concentra fundamentalmente en los elementos móviles. En la empresa Ernesto Che Guevara se utilizan alimentadores sinfín que incrementan los costos de mantenimiento debido a las frecuentes roturas que comparados con las cámaras de alimentación de los sistemas en fase densa son menos eficientes.

Costo energético

Para estimar las zonas de trabajo racionales, el consumo energético de los sistemas de transporte neumático de la empresa Ernesto Che Guevara y establecer una comparación con el consumo actual se simulan las características de transporte (figuras 4.10 – 4.12), en ellas se presenta el comportamiento de los parámetros según los modelos obtenidos para toda la longitud.

Los consumos energéticos se concentran fundamentalmente en el alimentador de aire y en el alimentador sinfín. Si se consideran las pérdidas de presión en la cámara de alimentación y en el separador, la demanda de potencia se estima a partir de la siguiente expresión:

$$N = 177 \cdot M_g \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (4.1)$$

Donde:

N – Demanda de potencia; kW.

M_g - Flujo másico de aire; kg/s.

P_1 - Presión de entrada; bar_{abs}

P_2 - Presión de salida; bar_{abs}

Si se divide esta ecuación por la cantidad de material transportado se obtiene la demanda de energía específica expresada en kJ/kg de material transportado. Con estos resultados y las características de transporte de los sistemas se estiman los parámetros racionales de transporte neumático del mineral laterítico en la empresa Ernesto Che Guevara. Se puede predecir el comportamiento de cualquier modificación o ampliación que se quiera realizar en estos sistemas y otras empresas niquelíferas cubanas tales como: René Ramos Latour y el proyecto de la planta de Ferroníquel en Las Camariocas

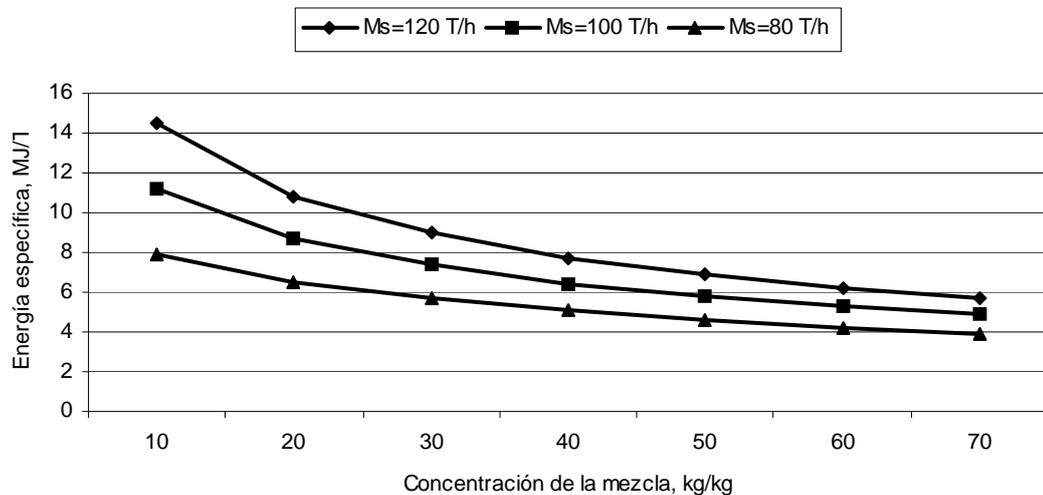


Figura 4.13. Simulación del comportamiento del consumo de energía específica en función de la concentración de la mezcla para el sistema 1.

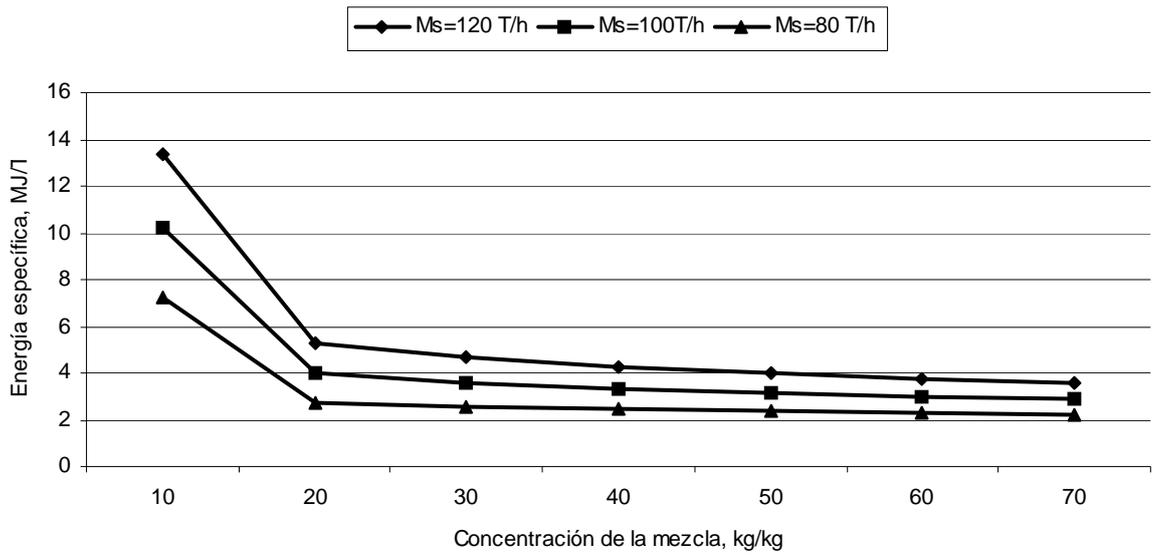


Figura 4.14. Simulación del comportamiento del consumo de energía específica en función de la concentración de la mezcla para el sistema 2.

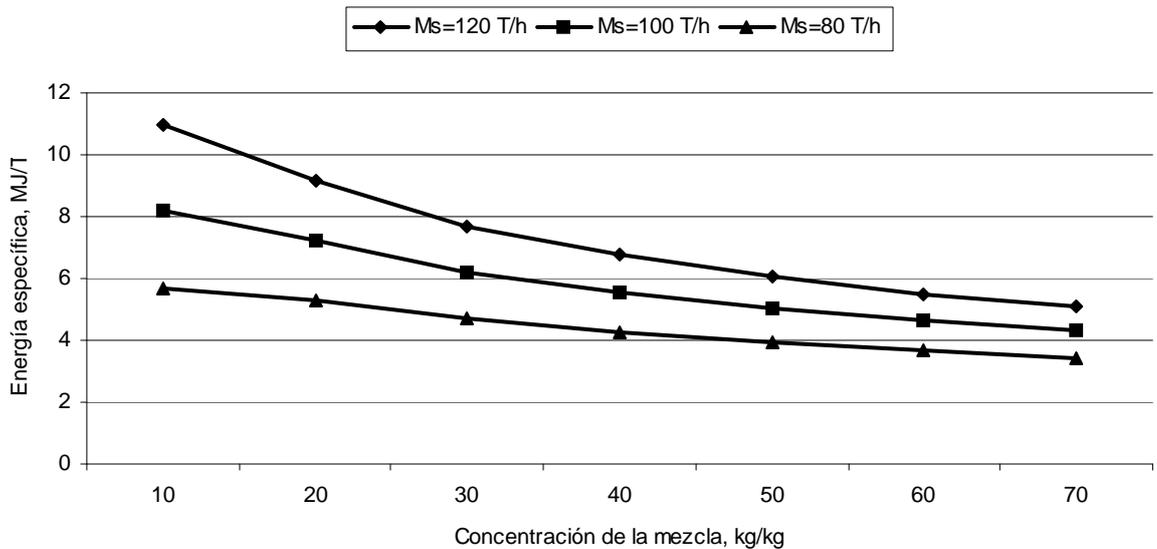


Figura 4.15. Simulación del comportamiento del consumo de energía específica en función de la concentración de la mezcla para el sistema 3.

En las figuras 4.13 – 4.15 se simula el comportamiento del consumo específico de energía en función de la concentración de la mezcla para los tres sistemas. Se observa la tendencia a la reducción del consumo con el aumento de la concentración de la mezcla y por tanto de la cantidad de material transportado. Este crecimiento de

la concentración se limita por las características de transporte en dependencia de los parámetros conjuntos del alimentador de aire y el sistema. Los valores de consumo se encuentran entre 2,23 MJ/T y 14,55 MJ/T, este último para los menores valores de concentración de la mezcla bifásica gas - sólido (10 – 20 kg /kg).

Comparación entre los parámetros actuales y los simulados de los sistemas de transporte neumático de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara.

En la tabla 4.2 se expresan los parámetros actuales de trabajo de los sistemas de transporte neumático de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara, estos se obtienen a través de mediciones directas en diferentes períodos de tiempo, en varios trabajos de diploma guiados por el autor. Se indica que para transportar las 1160 T/h se utilizan como promedio 15 sistemas independientes de transporte neumático con un consumo de potencia de 5520 kW. El consumo de aire es de 72956 m³/h efectuándose el transporte a una concentración de 15,9 kg/m³ de aire.

Tabla 4.2. Parámetros actuales de trabajo de los sistemas de transporte neumático de la empresa Ernesto Che Guevara.

Parámetros y dimensiones	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Velocidad de transporte	24,92 m/s	26,11 m/s	26,11 m/s
Concentración de la mezcla	12,8 kg/kg	12,8 kg/ kg	12,8 kg/kg
Diámetro interior de la tubería	250 mm	250 mm	250 mm
Presión a la entrada del sistema (abs)	3.3 x 10 ⁵ Pa	3.5 x 10 ⁵ Pa	3.5 x 10 ⁵ Pa
Consumo de potencia para mover el aire y accionar los alimentadores sinfín.	5 520 kW		
Cantidad de material transportado	280 T/h	440 T/h	440 T/h
Consumo de aire	17 610 m ³ /h	27 673 m ³ /h	27 673 m ³ /h
Consumo específico de energía	18,82 MJ/T		

Tabla 4.3. Parámetros simulados a partir del modelo para una concentración de 30 kg /kg .

Parámetros y dimensiones	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Diámetro de la tubería; mm	250	250	250
Velocidad de transporte; m/s	14,3	14,3	14,3
Concentración de la mezcla; kg/kg	30	30	30
Consumo de aire; m ³ /h	2 526	2 526	2 526
Presión a la entrada del sistema; bar _{abs}	4,65	2,89	4
Flujo másico de sólido; T/h	94	94	94
Consumo de potencia; kW	181	87	153
Consumo de potencia para accionar los elementos móviles	0	0	0
Consumo específico de energía; MJ/T	6,94	3,33	5,83
Parámetros para los requerimientos del proceso			
Flujo másico de sólido; T/h	282	470	470
Cantidad de sistemas trabajando	3	5	5
Consumo de aire; m ³ /h	7 578	12 630	12 630
Consumo de potencia; kW	543	435	765
Consumo específico de energía; MJ/T	6,94	3,33	5,83
Presión a la entrada del sistema; bar _{abs}	4,65	2,89	4

En la tabla 4.3 se exponen los parámetros simulados a partir del modelo para una concentración de 30 kg /kg, en ella se observa que el consumo de potencia del alimentador de aire después de considerar el consumo para mantener la presión en toda la línea, el aire de control y de limpieza de filtros se ahorran 3 012 kW-h, para ello es necesario el cambio de tecnología mediante el uso de las cámaras de alimentación e incrementar la concentración de la mezcla desde 12,8 kg/kg hasta 30 kg/kg. El consumo específico de energía disminuye desde 18,82 MJ/T hasta 5,37 MJ/T para el sistema.

En la nueva propuesta simulada solo funcionan 13 sistemas para garantizar la misma cantidad de material transportado, con la posibilidad de trabajar algunos de ellos en régimen intermitente solamente en los momentos de mayor demanda del proceso. Los restantes parámetros del sistema se obtienen a partir de las características de transporte y las gráficas de consumo específico de energía.

Según las ofertas de las firmas productoras la modernización total de los sistemas de transporte neumático de la empresa Ernesto Che Guevara tiene un valor aproximado de 11 millones de dólares; Si se considera el costo total del equipamiento y los que se incurren en el montaje, transporte y mano de obra. El costo promedio de la energía es de 70 dólares el MW-h, el ahorro anual por concepto energético es de 1 821 657,6 USD, por lo que el tiempo de recuperación de la inversión por este concepto sería de 6,04 años el que disminuye cuando se suma la reducción de los costos de mantenimiento y medioambientales debido al descenso de las emisiones de polvos a la atmósfera y la humanización de la labor de los operarios.

4.4. Conclusiones del Capítulo 4.

- ✓ La simulación de los sistemas de transporte neumático de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara confirman la posibilidad de reducir la demanda de energía específica y de potencia. Para un incremento de la concentración de la mezcla hasta 30 kg/kg y el cambio de tecnología en el sistemas de alimentación el consumo específico de energía se reduce en 13,45 MJ/T y el de potencia en 3 012 kW-h.
- ✓ Se simulan los parámetros racionales para una variante de transporte de la siguiente manera: un flujo másico de 94 T/h, una concentración de la mezcla de 30 kg/kg y un diámetro de tubería de 250mm en los tres sistemas fundamentales de la empresa Ernesto Che Guevara. Los resultados obtenidos predicen el comportamiento en cualquier otro régimen de explotación.

CONCLUSIONES
Y
RECOMENDACIONES

CONCLUSIONES

- ✓ Las partículas del mineral laterítico constituyen un sistema polidisperso con predominio de tamaño inferiores a los 74 μm , densidad real de 3 027 kg/m^3 , densidad aparente de 1 108 kg/m^3 , velocidad de flotación máxima de 5,21 m/s y forma esférica con un índice de aplastamiento superior a 0.8.
- ✓ El modelo empírico - teórico en el transporte neumático del mineral laterítico está formado por cuatro ecuaciones diferenciales (2.41, 2.42, 2.52 y 2.53) que describen el comportamiento del proceso, incluyéndose además varias ecuaciones de enlace. Se identifica mediante la aplicación de un algoritmo que permite la comparación de los resultados experimentales y los arrojados por el modelo. El módulo del error relativo promedio es inferior al 10,1%.
- ✓ Las curvas de transporte del mineral laterítico de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara exponen la tendencia a la reducción de la caída de presión con el incremento de la velocidad del fluido en zonas inferiores a los 6,12 m/s en el transporte horizontal y 5,21 m/s en el vertical. El transporte en fase densa continua se extiende hasta los 18 m/s, aproximadamente, en ambos casos.
- ✓ La simulación de los sistemas de transporte neumático de la empresa Comandante Ernesto Che Guevara confirma la posibilidad de reducir el consumo de energía. Con un incremento de la concentración de la mezcla hasta 30 kg/kg y el cambio de tecnología en el sistemas de alimentación el consumo de energía se reduce en 3012 kW – h y el de energía específica en 13,45 MJ/T. Si se considera el costo promedio de la energía de 70 dólares el MW-h el ahorro por toneladas de material transportado sería de 0,18 USD.

RECOMENDACIONES

- ✓ Aplicar el modelo físico - matemático de los sistemas de transporte neumático del mineral laterítico en el proceso de modernización que se lleva a cabo en las empresas del níquel Comandante Ernesto Che Guevara, René Ramos Latour y en la fábrica de ferroníquel Las Camariocas actualmente en fase de proyecto.
- ✓ Realizar las correcciones necesarias al modelo una vez que sea aplicado en la entidad productiva para los parámetros de explotación en condiciones industriales no contemplados en este trabajo.

BIBLIOGRAFÍA

PUBLICACIONES DEL AUTOR

1. Torres, E. Características físicas y aerodinámicas del mineral laterítico utilizado en los sistemas de transporte neumático de la industria del níquel. Memorias de la tercera conferencia internacional CINAREM 2002. Moa, Holguín, 2002.
2. Torres, E. Características reológicas para el transporte de fluidos bifásicos utilizados en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Minería y Geología. 15 (2): 70 – 75, 1998.
3. Torres, E. Comportamiento del transporte neumático de partículas en los gases durante el proceso de secado en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. Minería y Geología. 17(2): 73 – 77, 2000.
4. Torres, E. 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, 2001.
5. Torres, E. 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. 1999. 87p.
6. Torres, E. Transporte de partículas en flujos de gases para el incremento de la eficiencia del proceso de secado. Memorias de la segunda conferencia internacional CINAREM 2000. Moa, Holguín, 2000.
7. Torres, E. Propiedades físicas y aerodinámicas del mineral laterítico utilizado en los sistemas de transporte neumático. Minería y Geología. 24 (2): 71 – 76, 2003.

REFERENCIAS BIBLIOGRAFICAS

1. Alberti, E. Advanced Design of Pneumatic Conveying Systems. Bulk solids handling. 11(1): 103 – 110,1991.
2. Arnold, P.C; P.W. Wipych. The development of pneumatic conveying in Australia. Bulk solids handling .11(1): 85 - 91, 1991.
3. Aróstegui, J. M. Metodología del Conocimiento Científico. La Habana: Editorial de Ciencias Sociales, 1978. 445 p.
4. Arzola Ruiz, J. Sistemas de Ingeniería, La Habana: Editorial “Felix Varela”, 2000. 482p.
5. Bates, L. Flow in Bulk Storage Bins. <http://www.powderandbulk.com>. November, 1998.
6. Biplab K. Pneumatic transportation of a dry chemical powder for fire fighting on ships. Powder Sciences and technology. 19 (1): 11 – 12, 2000.
7. Blazer, G; Simonin, O. Extension of Eulerian gas – solid flow modelling to dense fluidised bed prediction. Proc. Int. Symp. on Refined Flow Modelling and Turbulence Measurements, Paris, France, 1993.
8. Boizán M. Optimización. La Habana: Editorial Pueblo y Educación, 1988. pp294.
9. Bradley, M. Pressure losses caused by bends in pneumatic conveying pipelines. Powder handling processing. 2(4), 1990.
10. Chandana R. Experimental investigation of scaling techniques in pneumatic transportation. Powder Science and Technology. 19 (1): 13 – 14, 2000.
11. Chang, A. Una Visión Sobre las Reservas Estratégicas de Eficiencia Metalúrgica en la Tecnología Carbonato-Amóniacal. Minería y Geología. 16 (1):13 – 19, 1999.
12. Chase J. Solids processing. <http://www.ecgf.uakron.edu/~chem/fclty/chase/solids.html>. July, 2002.
13. Clyde Materials Handling. Pneumatic Transport System Modernisation. Metals, Minerals & petrochemicals. Doncaster. Reino Unido. July, 2002
14. Colin H. Achieving high reliability from gravity flow hoppers and bins and pneumatic conveying systems. <http://www.mhia.org/bs/pdf/75629.pdf>. July, 2002.
15. Colijn, H. Bulk Powder Conveying. <http://www.powderandbulk.com>. November, 1999.

16. Columbié, A. Modelación matemática del proceso de calcinación del carbonato básico de níquel en el horno tubular rotatorio. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 2001. 98p.
17. Cos P, F. Caída de presión a través de un inyector del tipo vénturi y conductos horizontales en el transporte neumático de materiales granulares. Revista Tecnia. 6(1): 9 -28,1996.
18. Crawley, M; J. Bell. The application of life cycle cost analysis to pneumatic conveying systems. <http://www.macawber.com>. July, 2002.
19. Crowe, C; M. Sommerfeld. Fundamentals of gas – particle and gas – droplet flows. CRC Press, Boca Raton, USA, 1998.
20. Darren, T. Pneumatic conveying, basic design and component options. <http://www.Powderandbulk.com>. July, 2000.
21. Decker, S; M. Sommerfeld. Numerical calculations of two – phase flows in agitated vessels using the Euler/Lagrange approach. Proc. of the ASME 2000 fluid Engineering Division Summer Meeting, paper No, FEDSM´00 – 11154, 2000.
22. Destoop, T; Benoit Oesterlé. Using Euler / Lagrange simulation to define minimum particle conveying velocities. <http://www.esstin.uhp-nancy.fr/lumen/lumen4.html>. November, 2002.
23. Destoop, T. Computer simulation: plug flow pneumatic conveying correlation with the polymer producer industry, AIChE. Annual Meeting, Miami beach, FL, Nov. 12 – 17, 1995.
24. Destoop, T. Mathematical modelisation of dense phase conveying systems. Powder Bulk Solids conference , Chicago, May, 1994.
25. Destoop, T. Sizing of discontinuous dense phase conveying systems. Powder Handling processing. 5(2): 1 – 5, 1993.
26. Dynamic Air. The basics of pneumatic conveying. <http://www.dynamicair.com/pdf/9515-2-pdf>. July, 2002.
27. Dynamic Air. Sistemas de transporte neumático en fase densa. <http://www.dinamicair.com>. July, 2002.
28. Enwald, H; E. Peirano. Eulerian two - phase flow theory applied to fluidisation. Int. J. Multiphase Flow, Suppl. 22: 21 – 66, 1996.
29. Farnish, R. Is My Pneumatic Conveying System Causing Segregation?. <http://www.powderandbulk.com>. August, 2000.

30. Farnish R. Wear in lean – phase pneumatic conveying pipelines. <http://www.powderanbulk.com>. September, 2002.
31. Fitzgerald S. A 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. 1996. 140p.
32. Frank, T; Q. Yu. Experimental and numerical investigation of particle separation in a symmetrical double cyclone separator. 3rd ASME/JSME Joint Fluids Engineering Conference, paper No. FEDSM99 – 7865, 1999.
33. Garcia J. Study of the turbulence modulation in particle – laden flows using LES. <http://ctr.stanford.edu/resbriefs01/garcia.pdf>. October, 2002.
34. Giffiths, M. Abrasion, Efficiency and Rotary Valves. <http://www.powderandbulk.com>. September, 1999.
35. Giusti, L. The morphology, mineralogy and behaviour of fine grained gold from placer deposits of Alberta. Can. J. Earth SCI. 23: 1 – 8, 1986.
36. Gordón G. M.; I. L. Peisájov: Captación de polvos y purificación de gases en la metalurgia de metales no ferrosos. Mir, Moscú, 1981. pp392
37. Gourdel, C. Q. Simoning. Modelling and simulation of gas - solid turbulent flows with a binary mixture of particles. Third Int. Conf. on Multiphase flow, Lyon, France, 1998.
38. Guerra, J. D.; E. S. Pereda: Introducción al análisis estadístico para proceso. Editorial Pueblo y Educación, La Habana, 1987. pp368.
39. Gustavsson K; O. Jesper . Consolidation of concentrated suspensions – numerical simulations using a two – phase fluid model. <http://www.nada.kth.se/~katarina/compviz1.pdf>. November, 2002.
40. Guzman D. 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. 2001. 124p.
41. Haider, A; O. Levenspiel. Drag coefficient and terminal velocity of spherical and nonespherical particles. Powder technology. 58, 63 – 70, 1989.
42. Haraburda S. Calculating two – phase pressure drop. <http://www.rivercityeng.com/FFA2000-calc2phase.pdf>. July, 2002.

43. Harada, S; T. Tanaka; Y. Tsuji. Fluid Force Acting on a Falling Particle toward a Plane Wall. FEDSM2000-11267, Boston, USA: 1 – 5, 2000.
44. Hayes, J; A. R. Reed; M. S. Bradley. Economics of pneumatic conveying systems. Powder handling processing. 5(1): 1 – 5, 1993.
45. Hettiaratchi, K; S. Woodhead. Comparison between pressure drop in horizontal and vertical pneumatic conveying pipelines. Powder technology, 95: 67 – 73, 1998.
46. Huber, N; M. Sommerfeld. Modelling and numerical calculation of dilute – phase pneumatic conveying in pipe systems. Powder technology. 99: 90 – 101, 1998.
47. Huggett, R. Low velocity, the ultimate dense phase conveyor. Powder handling processing. 2: 207 – 210, 1990.
48. Hui L. “Characteristics of a Horizontal Swirling Flow Pneumatic Conveying with a Curved Pipe”. Particulate Science & Technology. 18 (3): 187 – 198, 2000.
49. Hui L. Multiresolution analysis of pressure fluctuation in horizontal swirling flow pneumatic conveying using wavelets. Revista Powder Technology. 11(4): 423-438, 2000.
50. Hui L; Y. Tomita. “An Experimental Study of Swirling Flow Pneumatic Conveying System in a Vertical Pipeline”. Transactions of The ASME, Journal of Fluids Engineering. 120 (1): 200 – 203, 1998.
51. Hui L; Y. Tomita. “A Numerical Simulation of Swirling Flow Pneumatic Conveying in a Horizontal Pipeline”. Particulate Science & Technology. 18 (4): 275 – 292, 2000.
52. Hui, L; Y. Tomita. Characterization of pressure fluctuation in swirling gas-solid two-phase flow in a horizontal pipe. Powder Technology. 12(2) : 169-186, 2001.
53. Hui L; Y. Tomita. “Particle Velocity and Concentration Characteristics in a Horizontal Dilute Swirling Flow Pneumatic Conveying”. Power Technology. 107 (2): 144 – 152, 2000.
54. Hurtado, F. G. 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. 1999. 120p.
55. Huttli T; J. Hernando; C. H. Ribeiro; C. Wagner. 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, 20002.
56. Kawaguchi, T; A. Miyoshi; T. Tanaka ; Y. Tsuji. Discrete Particle Analysis of 2D Pulsating Fluidized Bed. Proc. of 4th Int. Conf. on Multiphase Flow (ICMF-2001), New Orleans, USA: 429 – 433, 2001.
57. Kawaguchi, T; T. Tanaka; Y. Tsuji. Numerical Analysis of Density Wave in Dense Gas-Solid Flows in a Vertical Pipe. Proc. of the 5th International Conference of Computational Physics(ICCP5), Kanazawa, Japan: 696 –701, 1999.
58. Kawaguchi, T; T. Tanaka; Y. Tsuji. Discrete Particle Simulation of Plug Conveying in a Vertical Pipe. Proc. of 6th International Conference on Bulk Materials Storage, Wollongong, Australia: 321-327, 1998.
59. Klintworth, J; R. Marcus. A review of low – velocity pneumatic conveying systems. Bulk Solids Handling. 5(4): 747 – 753, 1985.
60. Konrad, K; D. Harrison. Prediction of the pressure drop for horizontal dense phase pneumatic conveying of particles. 5th Int. Conf. Pneumatic Transport of Solids in pipes: 225 – 244, London, UK, 1980.
61. Laborde, R; Alfredo C; Secundino M; Olga A. Productividad y eficiencia energética en el proceso de molienda del mineral laterítico. Minería y Geología. XVII(2): 79 – 83, 2000.
62. Lampinen, M. 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, 1991.
63. Legel, D; J. Schwedes. Investigation of pneumatic conveying of plugs of cohesionless bulk solids in horizontal pipes. Bulk Solid Handling. 4(2): 399 – 405, 1984.
64. Lesme J. R. Modelación del movimiento de las partículas y pérdidas en codos durante el transporte neumático del bagazo. Tesis doctoral. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. 1996. 112p.
65. Lesme J; R. Roca. Metodología para el cálculo de instalaciones de transporte neumático del bagazo. 1ra conferencia Internacional de termoenergética industrial. Universidad Central de Las Villas, 1993.
66. Manual de Operaciones del Taller de preparación del mineral de la empresa Comandante "Ernesto Che Guevara", 1985. 219 p.

67. Marinelli, J. How wall friction effects hopper angles. <http://www.powderandbulk.com>. August, 1999.
68. Marinelli, J. Wall friction effects. <http://www.powderandbulk.com>. August, 1999.
69. Mason, D; P. Marjanovic; A. Levy. A simulation system for pneumatic conveying systems. Powder Technology. 95 (1): 7 – 14, 1998.
70. Massoudi M; K. R. Rajagopal; T. X. Phuoc. On the fully developed flow of a dense particulate mixture in a pipe. Powder technology. 104 (1): 258 – 268, 1999.
71. Matousek V. Distribution and friction of particles in pipeline flow of sand– water mixtures. <http://www.ocp.tudelft.nl/dredging/matousek/handbookmatousek2000.pdf> .September, 2002.
72. Mawatari Y; K. Tetsu ; T. Yuji ; T. Takenari . Comparison of three vibrational modes (twist, vertical and horizontal) for fluidization of fine particles. Powder Technology. 12, (2): 157-168, 2001.
73. Mesa Redonda Informativa Sobre el Desarrollo de la Ciencia y la Técnica en Cuba, C. Habana, Enero 30 del 2001.
74. Mesarovich, M. Fundamentación de la Teoría General de los Sistemas. Editorial MIR. URSS, pp. 422-436, 1996.
75. Mi, B; P. Wypych. Pressure drop prediction in low – velocity pneumatic conveying. Powder Technology. 81(1): 125 – 137, 1994.
76. Mi, B; P. Wypych. Low – velocity pneumatic conveying of powders. Mech trans. IEAust, 20(3): 187 – 191, 1995.
77. Microcal Origin (versión 4.1). Microcal software, Inc. One Round house plaza Northampton, MA 01060. USA, 1996.
78. Miranda, J. L. Comparación y conjugación de métodos de determinación de humedad en la Industria del Níquel. Minería y Geología. Moa. 13 (2): 42 – 47, 1996.
79. Miyoshi, A; T. Kawaguchi; T. Tanaka; Y. Tsuji. "Numerical Analysis on Effects on Pulsating Gas on Flows in Gas-Solid Fluidized Bed." Proc. of Fourth International Particle Technology Forum (AIChE Annual Meeting 2000), Los Angeles, USA:12-17, 2000.
80. Miyoshi, A; T. Kawaguchi; Tanaka; Y. Tsuji; "Numerical Analysis of Granular Convection in Two-Dimensional Pulsating Fluidized Bed". Proc. of the 5th

- International Conference of Computational Physics (ICCP5), Kanazawa, Japan: 734-735, 1999.
81. Miyoshi, A; T. Kawaguchi; T. Tanaka; Y. Tsuji. "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), Takatsuki, Japan: 13 -18, 1999.
 82. Murrell A; C. Chris . The design of low velocity pneumatic conveying systems for stable and reliable transfer of polymer granules. <http://www.neutransfair.com/download/imech2000.pdf>. October, 2002.
 83. Neidigh S. Introduction to the theoretical and practical principles of pneumatic conveying. <http://www.porttechnology.org/journals/ed12/pdfs/pt12-235.pdf>. November, 2002.
 84. Oesterlé, B; B. Dinh. Simulation of particle – to – particle interactions in gas – solid flows. Int. J. Multiphase flow. 19: 199 – 211, 1993.
 85. Oesterlé, B; B. Dinh. Experiments on the lift of a spinning sphere in a range of intermediate Reynolds numbers. Experiments in Fluids. 25: 16 – 22, 1998.
 86. Oriol Guerra, J. Conferencias de Maquinas Transportadoras. Facultad de construcción de Maquinarias, ISPJAE,1986. 231p.
 87. Oshitani J; T. Bambang ; Zennosuke T. Evaluation of fluidized particle flow by measurement of apparent buoyancy. Powder Technology. 12(1): 95 -104, 2001.
 88. Pacheco Berlot, P. 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. 1984. 120p.
 89. Pan, Y; T. Tanaka; Y. Tsuji. "Numerical Study of Particle-Laden Rotating Turbulence". Proc. of 4th Int. Conf. on Multiphase Flow (ICMF-2001), New Orleans: 15 – 23, 2001.
 90. Pan, Y; T. Tanaka; Y. Tsuji. "Large-Eddy Simulation of Particle-Laden Rotating Channel Flow," Proc. of ASME FEDSM'00, Boston, USA: 1 - 7, 2000.

91. Pan, R; P. Wypych. Scale – up procedures for pneumatic conveying design. Powder handling processing. 4(2): 167 – 172, 1992.
92. Pan, R; P. Wypych. Pressure drop and slug velocity in low – velocity pneumatic conveying of bulk solids. Powder technology. 94: 123 – 132, 1997.
93. Papadakis, S. E.: Scale – up of cascading rotatory dryers. Drying Technology. 12: 259 – 279, 1994.
94. Paul, S. What is Dense Phase Conveying?. <http://www.powderandbulk.com>. March, 1999.
95. Peterson, K. Selecting Diverter Valves For your Pneumatic Conveying System. <http://www.powderandbulk.com>. March, 2002.
96. Quintana, R. Conferencia Sobre la Industria Cubana del Níquel. II Seminario de Perfeccionamiento de Cuadros, ISMM, Octubre 1999.
97. Raheman, H; V. K. Jindal; Slip velocity in pneumatic conveying of agricultural grains. Powder technology. 5 (1): 60 - 67, 1993.
98. Reed, R; Bradley, M. Advances in the Design of Pneumatic Conveying Systems. Bulk solids handling. 11(1): 93 – 98, 1991.
99. Rodes, M. Pneumatic Transport of Powders. <http://www.erpt.org>. Octubre 2001.
100. Rojas L. Principales fases minerales portadoras de níquel en los horizontes lateríticos del yacimiento moa. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa. 1994. 92p.
101. Scott Neidigh. Introduction to the theoretical and practical principles of pneumatic conveying. <http://www.porttechnology.org>. September, 2002
102. Singer, T. Dense Phase Conveying, Is It The Right Choice?. <http://www.powderandbulk.com>. July, 2001.
103. Singer T. You too, can select a pneumatic conveying system. <http://www.powderandbulk.com>. September, 2002.
104. Sivert O. Pneumatic transport electrostatic charging bench. Powder Science and Technology. 17 (1): 19 – 20, 1998.
105. Sommerfeld M; G. Zivkovic; Recent advances in the numerical simulation of pneumatic conveying through pipe systems. Elsevier Science. 5(1): 201 – 211, 1992.
106. Sommerfeld M. Inter – particle collisions in turbulent flows: A stochastic model. Proceedings 1st Int. Symp. Turbulence and Shear flow phenomena. Begell House, New york: 265 – 270, 1999.

107. Sommerfeld, M; N. Huber. Experimental analysis and modelling of particle – wall collisions. *Int. J. Multiphase Flow*. 25: 1457 – 1489, 1999.
108. Sommerfeld M. Theoretical and experimental modelling of particulate flows. <http://www.ecgf.uakron.edu/~chem/fclty/chase/solids.html>. July, 2002.
109. Tanaka, T; Y. Yamamoto. "LES of Gas-Particle Turbulent Channel Flow," Proc. of the 1997 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Vancouver, Canada: 1 - 5, 1997.
110. Tanaka,T; Y. Tsuji. "Numerical Simulation of Gas-Solid Two-Phase Flow in a Vertical Pipe: On the Effect of Inter-Particle Collision". 4th Int. Symp. on Gas-Solid Flows, Portland: 123-128, 1991.
111. Tanida, K; Honda, K. "Particle Motion in Screw Feeder Simulation by Discrete Element Method". Proc. of IS&T's NIP14: International Conference on Digital Printing Technologies, Toronto, Canada: 429-431, 1998.
112. Tashiro, H; Peng, X. Numerical prediction of saltation velocity for gas – solid two – phase flow in a horizontal pipe. *Powder technology*. 91: 141 – 146, 1997.
113. Taylor, T. Specific energy consumption and particle attrition in pneumatic conveying. *Powder Technology*. 95(1): 1-6, 1998.
114. Torres, E. 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 2002. Moa, Holguín, 2002.
115. Torres, E. Características reológicas para el transporte de fluidos bifásicos utilizados en la empresa Comandante Ernesto Che Guevara. *Minería y Geología*. 15 (2): 70 – 75, 1998.
116. Torres, E. Comportamiento del transporte neumático de partículas en secadores rotatorios. *Minería y Geología*. 17(2): 73 – 77, 2000.
117. Torres, E. 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, 2001.
118. Torres, E. 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.1999. 87p.

119. Torres, E. Transporte de partículas en flujos de gases para el incremento de la eficiencia del proceso de secado. Memorias de la segunda conferencia internacional CINAREM 2000. Moa, Holguín, 2000.
120. Trisakti B; J. Oshitani. Circulating particle flow and air bubble behavior at various superficial air velocities in two-dimensional gas--solid fluidized beds. Powder Technology. 12: 507 – 517, 2001.
121. Tsuji Y. Activities in discrete particle simulation in Japan. Powder technology. 113: 278 – 286, 2000.
122. Tyrrell J. Development of an instrument for measuring inter-particle forces. Powder Technology. 12: 1-16, 2001.
123. Viera, R; S. López; M. Noemí. Modelación matemática para ingenieros químicos. Pueblo y Educación, La Habana, 1988. pp240.
124. Wang, Q; K. Squires. On the role of the lift force in turbulence simulations of particle deposition. Int. J. Multiphase Flow. 23: 749 – 763, 1997.
125. Weber, M. Friction of the Air and the Air/Solid Mixture in Pneumatic Conveying. Bulk solids handling.11(1): 99 – 102, 1991.
126. Weber, M. Correlation analysis in the design of pneumatic transport plant. Bulk Solids Handling, 2(2): 231 – 234, 1982.
127. Wypych, P; P. Arnold. Plug – Phase Pneumatic Transportation of Bulk Solids and the importance of Blow Tank Air injection. Powder handling processing. 1(3): 271 – 275,1989.
128. Yamamoto, Y; T. Tanaka; Y. Tsuji. "Effect of Spatial Resolution of LES on Particle Motion," Proc. of FEDSM'98, Washington DC, USA: 1 – 8, 1998.
129. Yamamoto, Y; T. Tanaka. "LES of Gas-Particle Turbulent Channel Flow (the Effect of Inter-Particle Collision on Structure of Particle Distribution)," Proc. of 3'rd Int. Conf. on Multiphase Flow (ICMF'98), Lyon, France: 8 -12,1998.
130. Yi, J; P. Wypych. W. Minimum conveying velocity in dilute – phase pneumatic conveying. Powder handling processing .10: 255 – 261, 1998.
131. Yonemura, S; T. Tanaka; Y. Tsuji. "Cluster Formation in Dispersed Gas-Solid Flow (Effects of Physical Properties of Particles)", Proc. of The 2nd Int. Conf. on Multi-phase Flows '95-Kyoto, Kyoto, Japan: 25 – 30, 1995.