



MINISTERIO DE EDUCACIÓN SUPERIOR  
INSTITUTO SUPERIOR MINERO METALÚRGICO  
“Dr. Antonio Núñez Jiménez”  
FACULTAD DE METALURGIA ELECTROMECAÁNICA

# TESIS EN OPCIÓN AL TÍTULO DE MASTER EN ELECTROMECAÁNICA

**TITULO:** Evaluación de los sistemas de transporte neumático del cacao en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”

**AUTOR:** Agustín Lino Domínguez Viana

**TUTORES:** Dr.C. Enrique Torres Tamayo

Dr.C. Raúl izquierdo pupo

Caracas, 2010

**INDICE**

|                                                                                                                                                         | <b><i>Pág.</i></b> |
|---------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|--------------------|
| <b>RESUMEN</b>                                                                                                                                          |                    |
| <b>INTRODUCCIÓN . . . . .</b>                                                                                                                           | <b>1</b>           |
| <b>CAPITULO 1. MARCO TEÓRICO - METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN</b>                                                                                     |                    |
| 1.1. Introducción . . . . .                                                                                                                             | 6                  |
| 1.2. Trabajos precedentes . . . . .                                                                                                                     | 6                  |
| 1.3. Estado actual del transporte neumático en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista<br>“Cacao Oderi” . . . . .                               | 12                 |
| 1.4. Influencia de las propiedades y parámetros más importantes de los granos de cacao en los<br>sistemas de transporte neumático . . . . .             | 17                 |
| 1.5. Principales dimensiones de las instalaciones de transporte neumático en la Empresa<br>Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi” . . . . . | 18                 |
| 1.6. Conclusiones del capítulo 1 . . . . .                                                                                                              | 20                 |
| <b>CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS</b>                                                                                                                |                    |
| 2.1. Introducción . . . . .                                                                                                                             | 21                 |
| 2.2. Propiedades físicas y aerodinámicas de los granos de cacao . . . . .                                                                               | 21                 |
| 2.3. Método de cálculo de los sistemas de transporte neumático del cacao . . . . .                                                                      | 29                 |
| 2.3.1. Expresiones fundamentales de transporte neumático . . . . .                                                                                      | 29                 |
| 2.3.2. Pérdidas de presión para el aire limpio en el transporte neumático por tuberías<br>horizontales y verticales . . . . .                           | 31                 |
| 2.3.3. Modelos recientes para el cálculo de las pérdidas de presión en el transporte neumático<br>de materiales polidispersos . . . . .                 | 34                 |
| 2.3.4. Ecuaciones para el cálculo de las pérdidas en codos durante el transporte neumático del<br>cacao . . . . .                                       | 36                 |
| 2. 4. Conclusiones capítulo 2 . . . . .                                                                                                                 | 39                 |



### **CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN ECONÓMICA**

|                                                                                                                                                                             |    |
|-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| 3.1. Introducción . . . . .                                                                                                                                                 | 40 |
| 3.2. Resultados del cálculo de las pérdidas de presión en tuberías horizontales y verticales para transporte de los granos de cacao . . . . .                               | 40 |
| 3.3. Resultados del cálculo de las pérdidas de presión en codos para el transporte neumático de los granos de cacao . . . . .                                               | 45 |
| 3.4. Valoración económica . . . . .                                                                                                                                         | 46 |
| 3.4.1. Comparación entre los parámetros calculados y los medidos en la instalación de transporte neumático de la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi” | 50 |
| 3.5. Conclusiones del capítulo 3 . . . . .                                                                                                                                  | 52 |
| <b>CONCLUSIONES</b> . . . . .                                                                                                                                               | 53 |
| <b>RECOMENDACIONES</b> . . . . .                                                                                                                                            | 54 |
| <b>REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> . . . . .                                                                                                                                 | 55 |
| <b>ANEXOS</b> . . . . .                                                                                                                                                     | 59 |



## SUMMARY

In the Company Bolivarian of Socialist Production "Cocoa Oderi" although the pneumatic transport presents indexes ecological superiors to other mechanical transporters its employment it has been limited by problems of obstruction of the transportation pipes and the material loss in the discharges of the systems. The causes that originate this difficulty are: the incorrect selection of the transporter gas speed and the infinite variety of physical and aerodynamic characteristics of the materials to transport that lead to the inaccuracy of the projects, due to absence of scientific investigations and experimental works in this science.

Starting from the existent knowledge for the pneumatic transport of solids in the flowed and dense phases, and previous characterization of the material is deduced an experimental theoretical procedure for the evaluation of the cocoa transportation systems. With the employment of the same one it is simulated the dependence of the pressure losses, the mass flow and the mixture concentration in function of the gas mass flow másico of the pneumatic systems in the company Bolivarian of Socialist Production "Cocoa Oderi". The calculated parameters are compared with those obtained in an experimental way.

The results of the investigation predict that to avoid the obstructions in the system and the material losses the speed of transport should be bigger to 18 m/s for the classified and toasted materials, and 14 m/s for crushed. The increment in the consumption of power is practically insignificant (0.15kW for the classified and toasted grains and 0.1 kW for crushed).



## RESUMEN

En la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi” aunque el transporte neumático presenta índices ecológicos superiores a otros transportadores mecánicos su empleo se ha visto limitado por problemas de obstrucción de las tuberías de transporte y la pérdida de material en las descargas de los sistemas. Las causas que originan esta dificultad son: la incorrecta selección de la velocidad del gas transportador 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.

A partir de los conocimientos existentes para el transporte neumático de sólidos en las fases fluida y densa y previa caracterización del material se deduce un procedimiento teórico experimental para la evaluación de los sistemas de transporte neumático del cacao. Con el empleo del mismo se simula la dependencia de las pérdidas de presión, el flujo másico de sólido y la concentración de la mezcla en función del flujo másico de gas de los sistemas de transporte neumático de la empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”. Se comparan los parámetros calculados con los obtenidos de forma experimental.

Los resultados de la investigación predicen que para evitar las obstrucciones en el sistema y las pérdidas de material se debe establecer una velocidad de transporte superior a los 18 m/s para los materiales clasificados y tostados y 14 m/s para los triturados. El incremento en el consumo de potencia es prácticamente insignificante (0.15kW para los granos clasificados y tostados y 0.1 kW para los triturados).



## INTRODUCCIÓN

A partir del llamado del Presidente de la República Bolivariana de Venezuela sobre la Revolución Energética y la optimización de los procesos, se realiza en todo el país una campaña dirigida a la implantación de acciones de corto, mediano y largo plazo para promover el uso eficiente de la energía en todas las áreas de la vida cotidiana del ciudadano, de las instituciones y empresas del Estado y el sector privado, del sector comercial y de servicios.

La Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”, ubicada en el estado de Miranda, tiene el objeto de optimizar el proceso productivo de este fruto y mejorar las condiciones de vida de los productores del estado Miranda.

Esta planta, ubicada en El Sitio de Oderi, entre las poblaciones de Juan Díaz y Mango de Ocoyta, en la parroquia Panaquire del Municipio Acevedo, brinda la posibilidad para que los pequeños productores organizados participen en el circuito completo de producción del cacao en la región, recuperando las hectáreas destinadas al cultivo, y a su vez asumir el control autogestionario de la comercialización e incorporarse al procesamiento industrial.

Durante el proceso de producción y procesamiento del cacao el transporte neumático juega un papel importante, debido a que es un eslabón intermedio entre los procesos de recepción, limpieza y clasificación, tostión, descascarillado y Molienda. El procesamiento del cacao comienza con la recepción del grano. El cacao que llega de las diferentes zonas productoras es sometido a un control de calidad, en el que se determina si ha recibido un proceso de beneficio de manera adecuada o no, luego mediante el proceso de limpieza y clasificación el grano de cacao una vez haya pasado la revisión de calidad es llevado a la máquina limpiadora a través de un sistema de transporte por cangilones. El objetivo de esta operación es retirar los contaminantes que pueden generar peligro para la salud del consumidor, deficiencias en la calidad del producto final y daños en los equipos. Estos contaminantes pueden ser piedras, tornillos, polvos, cuerdas, excrementos de animales, residuos químicos de herbicidas, plaguicidas, etc. Por las características de la mayoría de los contaminantes, ésta se efectúa en seco, utilizando básicamente la aspiración y tamizado, además de imanes que retienen las partículas ferrosas.

Con el cacao correctamente fermentado, secado, limpio y clasificado proveniente de la anterior operación, se realiza la tostión donde se logra el desarrollo del aroma y el sabor característico del chocolate. Entre otros aspectos, se busca oscurecer el color, facilitar el desprendimiento de la

cascarilla y alcanzar una textura ideal para el quebrantamiento del grano. Durante la tostión de los granos de cacao suceden cambios químicos conocidos con el nombre de reacciones de Maillard, las cuales causan modificaciones en los aminoácidos libres y azúcares reductores que conducen a la formación de aromas y sabores.

El cacao es llevado al tostador a través de un sistema de transporte neumático, previamente clasificado en dos clases de tamaño (granos fino y grueso, respectivamente), en la actualidad este sistema presenta varios problemas asociados con la obstrucción de la tubería de transporte y la pérdida de material en la descarga del sistema en las tolvas. El primer aspecto contribuye a la paralización del sistema y la pérdida de tiempo en el proceso productivo. El segundo aspecto favorece la pérdida de material, lo que conduce a la baja eficiencia del proceso.

El torrefactor, está constituido por una tolva de carga, un cilindro de cocción rodante incorporado en un tambor fijado a un basamento que contiene el horno, una tina de enfriamiento y un ciclón. El horno de combustión, construido en piedra refractaria está provisto de tiraje reforzado, con la aplicación de un quemador adecuado el torrefactor está dotado de un termómetro, válvulas mariposa, tuberías de enlace al ciclón, motores con sus conexiones y tablero de mando situado en un basamento. En total la máquina la compone un quemador, un horno refractario, un tambor de cocción, un aspirador, una tina de enfriamiento, una salida de aire de enfriamiento, un ciclón y un bastidor.

El aire es el portador del calor. En el tostador continuo el aire se calienta en los registros calentadores de vapor mediante el procedimiento del aire circulante siendo presionado o bien aspirado alternadamente y a alta velocidad a través de los registros calentadores y el grano a tostar, con ayuda de potentes ventiladores auxiliares. El aire de salida húmedo es sustituido por aire nuevo que anteriormente fue precalentado en la refrigeración del producto tostado. Se garantiza la temperatura de tostado constante por un dispositivo automático regulador de vapor. El bloqueo de la cuba, que está ubicado entre la zona de tostado y refrigeración evita el retorno del grano tostado de la zona de refrigeración al entrar la nueva carga.

La eliminación de la cáscara se realiza basada en la diferencia de densidades de la cáscara y el grano. Los granos de cacao son entregados a la máquina, a través de un sistema de transporte neumático (separado en dos sistemas diferentes que transportan los granos fino y grueso que salen de la tostadora), durante esta operación se presentan problemas similares a los mencionados con anterioridad, asociados a la obstrucción del sistema y la pérdida de material en la descarga en

las tolvas. Un tamiz previo separa los granos quebrados de los enteros, antes de que ellos entren en el quebrantador de impacto o de trituración, reduciendo de esta forma la cantidad que pasa al quebrantador. Luego un tamiz clasificador separa la mezcla de granos quebrantados de más grandes a más chicos, en diferentes grupos. El equipo está previsto de una esclusa, esta corriente de aire que arrastra al polvo y parte de la cascarilla va a parar a un ciclón separador, saliendo los fragmentos del cacao por cada compartimiento a una tolva donde es impulsado neumáticamente a la próxima operación (molienda), el grado de cacao que no ha sido triturado o granos partidos y cáscaras menores de 7 mm pasan a través de la última sección de la rejilla y es transportado por un helicoide hasta el elevador para completar la operación.

Los granos quebrados salen limpios de la máquina por un canal colector, ubicado al lado de la caja del tamiz. En el separador de polvo es limpiado el aire que sale del soplador. En la actualidad en la trilladora se presentan problemas relacionados con la presión del aire sobre cada una de las mallas, ello provoca: incremento de la cantidad de cáscaras que queda en el cacao, lo que afecta directamente la calidad de la taza, es decir, si hay alto contenido de cascarilla en la taza queda un residuo sólido que generalmente no es aceptado por el consumidor, si la succión es demasiado fuerte, en la cáscara se va encontrar cacao, lo que ocasiona mermas muy altas.

La situación actual del transporte neumático en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”, se caracteriza por la siguiente situación problemática:

- ***Obstrucción de las tuberías de transporte y la pérdida de material en las descargas de los sistemas debido a la incorrecta selección de los parámetros de transporte.***
- ***Incremento frecuente del contenido de cascarilla que queda en el cacao, asociado al proceso de transporte neumático y clasificación, lo que provoca un residuo sólido que generalmente no es aceptado por el consumidor y ocasiona mermas demasiado altas.***

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

***El proceso de transporte neumático del cacao en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”.***

En la temática estudiada se presenta un problema interesante abordado en la literatura, pero con limitaciones reales para las condiciones de transporte de la planta de “Cacao Oderi”, en el mismo

es necesario analizar el transporte en forma de sistema bifásico sólido - gas en fases fluida y densa para este tipo de material.

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 los resultados obtenidos es de primordial importancia en la solución de la problemática planteada.

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

***Es posible obtener los parámetros racionales de trabajo (Flujo másico de aire, flujo másico de gas, concentración de la mezcla, velocidad y presión del sistema) en el transporte neumático del cacao en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi” mediante el uso de los modelos físico – matemático que describen su comportamiento.***

Esta hipótesis científica exige la necesidad de conocer las principales propiedades físicas y aerodinámicas del material investigado: el cacao; 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 modificaciones que respondan en su diseño a las necesidades que demanda el proceso.

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

***Obtener los parámetros racionales de trabajo durante el transporte neumático del cacao en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi” en fases fluida y densa a través de tuberías horizontales, verticales y accesorios.***

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

- ***Establecer el marco teórico que sustenta la investigación a través del análisis de los trabajos precedentes y los principales fundamentos teóricos asociados al objeto de estudio.***
- ***Determinar las propiedades físicas y aerodinámicas que mayor influencia tienen en el transporte neumático del cacao.***
- ***Obtener, a partir de un procedimiento teórico- experimental, la dependencia de la caída de presión en función de los parámetros de transporte y las propiedades físicas y aerodinámicas del material.***



- ***Simular las características de transporte neumático del cacao para diferentes regímenes de operación.***
- ***Valorar económicamente la propuesta efectuada.***

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

- Método de investigación documental y bibliográfico para la sistematización del conjunto de conocimientos y teorías relacionadas con el objeto de estudio.
- 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.
- Método de investigación experimental para describir, caracterizar el objeto de estudio y sus principales regularidades.
- Método de simulación computacional de los modelos obtenidos.

## CAPÍTULO I. MARCO TEÓRICO- METODOLÓGICO DE LA INVESTIGACIÓN

### 1.1. Introducción

En este capítulo se analiza el estado actual de la temática de transporte neumático a escala mundial y las particularidades del mismo en el transporte de cacao en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”. Se realiza la descripción del flujo tecnológico y los aspectos teóricos más importante concerniente a la temática tratada, es por ello que el **objetivo** del capítulo es:

Caracterizar el estado actual del proceso de transporte neumático de la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”

### 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.

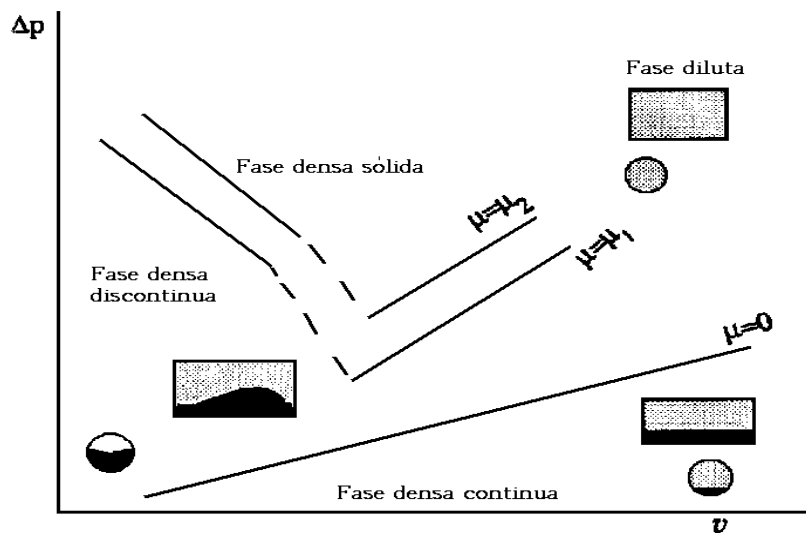
Resulta muy útil la revisión de los trabajos de Mesarovich (1996) que aborda la temática relacionada con la teoría general de los sistemas y la metodología de las investigaciones sistémicas. Guzmán (2001) conceptualiza con claridad los métodos sistémicos de análisis del conocimiento científico, permitiéndole 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 sólidos que crea una caída de presión entre el inicio y el final de la tubería (Neidigh, 2007).

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 (2008) 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 (2007); Pan y Wipych (2008). 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.

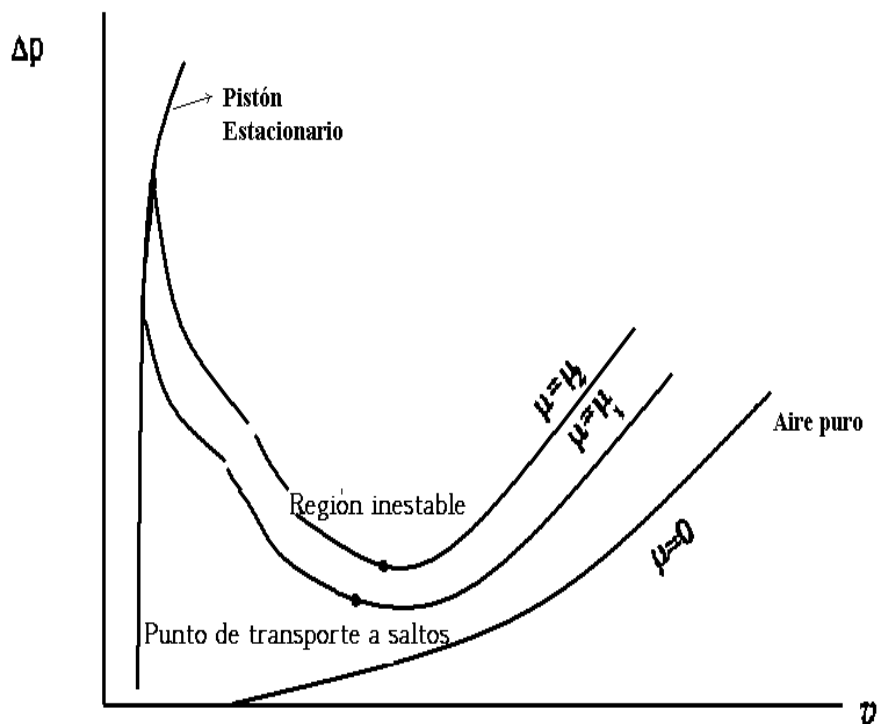
En los últimos años se han incrementado las investigaciones relacionadas con el transporte neumático de diversos materiales, la mayoría de los autores (Lampinen, 1991;) distinguen dos fases fundamentales: la fluida o diluta y la densa; en esta última se hacen diferentes clasificaciones, las más completas son las efectuadas por Rodes (2007) 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: Lampinen, 1991.



**Fig.1.2.** Diagrama de fases en el transporte neumático de materiales

Fuente: Rhodes, 2007

Investigaciones recientes (Paul, 2008; Rodes, 2007; Farnish, 2008; Singer, 2008) usan otra gráfica (figura 1.2) que guarda grandes similitudes con la gráfica anterior, aunque en esta última se establece con mayor claridad la llamada fase pistón y la zona de tránsito entre las fases fluida y densa.

Se resalta en los trabajos 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 (2006); Arnold y Wypych (2007), 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 (2006) en Inglaterra; Alberti (2007) 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 (2008), 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 (2009) 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. 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, 2007). 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, 2008). Otro es el de Huttel et al (2009) 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 (2005); Tanaka y Yamamoto (2006); Miyoshi et al (2008), entre otros. Un razonamiento diferente elabora Raheman y Jindal (2007), 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.

Mason et al (2007) 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 de cacao 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.

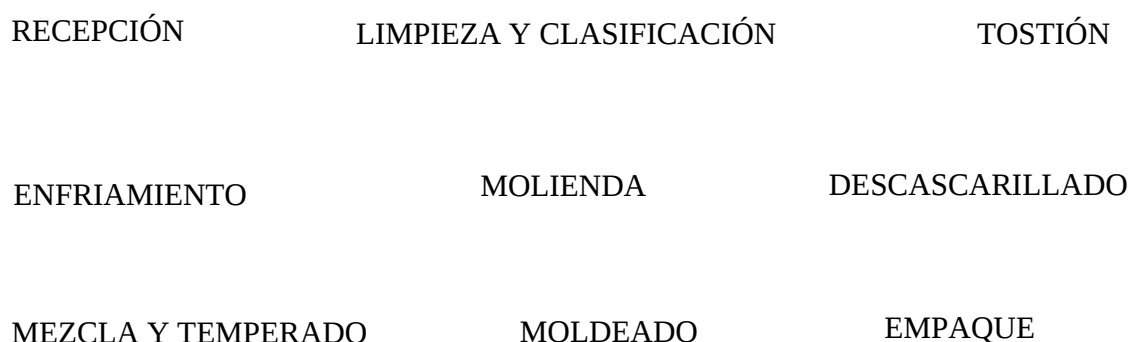
Un modelo para el análisis de las pérdidas de presión en el sistema de transporte es el desarrollado por Pan y Wypych (2008), donde estudian el comportamiento del transporte en fase densa de materiales de forma irregular a partir de la modelación teórica en tuberías horizontales y verticales, los validan 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 (2006) hacen una comparación entre la caída de presión en tuberías horizontales y verticales donde establecen la correlación entre ambas, minimizan la cantidad de experimentos a efectuar en el examen de los diferentes sistemas. En todos los artículos citados los autores no muestran el comportamiento del transporte de los materiales en las dos fases a la vez y no efectúan una exposición del comportamiento del consumo energético que delimite la zona de operación de un sistema en particular.

Los aspectos económicos de los sistemas de transporte neumático se examinan en la literatura, se destaca Hayes et al (2004), ellos dividen los costos en dos categorías fundamentales: costo capital y costo operacional. El primero incluye los costos de diseño, conexión, instalación y puesta en marcha del sistema y el segundo los costos por conceptos energéticos, de mantenimiento, entre otros. Crawley y Bell (2008) en una búsqueda análoga circunscriben ejemplos de cálculo para sistemas en fases fluida y densa.

Las técnicas para el procesamiento del cacao son ampliamente tratadas en la literatura, dentro de los trabajos más relevante se encuentra el de Braudeau, J. (1970), quien expone las experiencias prácticas obtenidas en países tropicales. En otros trabajos de interés (Álvarez Clímaco, 2007; INIAP, 2006; Bradley, R. L, 2003; Reyes, H, 2000; Beckett S. T, 1994) se expone el procedimiento para determinar las propiedades más importantes del cacao, ello tomando en consideración la higroscopicidad del mismo y los métodos para la selección del equipamiento durante su procesamiento que incluye el transporte neumático del material.

La literatura consultada muestra suficiente información para la evaluación de los sistemas de transporte neumático del cacao de la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”, ello permite desarrollar el método adecuado para el cálculo y evaluación del sistema con vista a darle solución a la problemática planteada relacionada con la obstrucción de las tuberías de transporte y la pérdida de material en las descargas de los sistemas debido a la incorrecta selección de los parámetros de transporte.

### **1.3. Estado actual del transporte neumático en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”**



**Figura 1.3. Diagrama de flujo en el procesamiento del cacao en Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”**

El diagrama de flujo del procesamiento del cacao comienza con la **recepción del grano** (figura 1.3). El cacao que llega de las diferentes zonas productoras es sometido a un control de calidad, en el que se determina si ha recibido un proceso de beneficio de manera adecuada o no.

Mediante el **proceso de limpieza y clasificación** el grano de cacao una vez haya pasado la revisión de calidad es llevado a la máquina limpiadora a través de un sistema de transporte por cangilones. El objetivo de esta operación es retirar los contaminantes que pueden generar peligro para la salud del consumidor, deficiencias en la calidad del producto final y daños en los equipos. Estos contaminantes pueden ser piedras, tornillos, polvos, cuerdas, excrementos de animales, residuos químicos de herbicidas, plaguicidas, etc. Por las características de la mayoría de los contaminantes, ésta se efectúa en seco, utilizando básicamente la aspiración y tamizado, además de imanes que retienen las partículas ferrosas.

Una buena limpiadora debe separar además, todas las partes específicamente más pesadas y las partes específicamente más livianas. El cacao en grano debe clasificarse por tamaños y por lo tanto, es recomendable que en la clasificación los tamices o las cribas sean intercambiables.

### **Tostión**

Con el cacao correctamente fermentado, secado, limpio y clasificado proveniente de la anterior operación, se realiza la tostión donde se logra el desarrollo del aroma y el sabor característico del chocolate. Entre otros aspectos, se busca oscurecer el color, facilitar el desprendimiento de la cascarilla y alcanzar una textura ideal para el quebrantamiento del grano. Durante la tostión de los granos de cacao suceden cambios químicos conocidos con el nombre de reacciones de Maillard, las cuales causan modificaciones en los aminoácidos libres y azúcares reductores que conducen a la formación de aromas y sabores. El cacao es llevado al tostador a través de un sistema de transporte neumático, previamente clasificado en dos clases de tamaño (granos fino y grueso, respectivamente).

El torrefactor, está constituido por una tolva de carga, un cilindro de cocción rodante incorporado en un tambor fijado a un basamento que contiene el horno, una tina de enfriamiento y un ciclón. El horno de combustión, construido en piedra refractaria está provisto de tiraje reforzado, con la aplicación de un quemador adecuado el torrefactor está dotado de un termómetro, válvulas mariposa, tuberías de enlace al ciclón, motores con sus conexiones y tablero de mando situado en un basamento. En total la máquina la compone un quemador, un horno refractario, un tambor de

cocción, un aspirador, una tina de enfriamiento, una salida de aire de enfriamiento, un ciclón y un bastidor.

El aire es el portador del calor. En el tostador continuo el aire se calienta en los registros calentadores de vapor mediante el procedimiento del aire circulante siendo presionado o bien aspirado alternadamente y a alta velocidad a través de los registros calentadores y el grano a tostar, con ayuda de potentes ventiladores auxiliares. El aire de salida húmedo es sustituido por aire nuevo que anteriormente fue precalentado en la refrigeración del producto tostado. Se garantiza la temperatura de tostado constante por un dispositivo automático regulador de vapor. El bloqueo de la cuba, que está ubicado entre la zona de tostado y refrigeración evita el retorno del grano tostado de la zona de refrigeración al entrar la nueva carga.

### **Descascarillado**

La eliminación de la cáscara se realiza basada en la diferencia de densidades de la cáscara y el grano. Los granos de cacao son entregados a la máquina, a través de un sistema de transporte neumático (separado en dos sistemas diferentes que transportan los granos fino y grueso que salen de la tostadora. Un tamiz previo separa los granos quebrados de los enteros, antes de que ellos entren en el quebrantador de impacto o de trituración, reduciendo de esta forma la cantidad que pasa al quebrantador. Luego un tamiz clasificador separa la mezcla de granos quebrantados de más grandes a más chicos, en diferentes grupos. El equipo está previsto de una esclusa, esta corriente de aire que arrastra al polvo y parte de la cascarilla va a parar a un ciclón separador, saliendo los fragmentos del cacao por cada compartimiento a una tolva donde es impulsado neumáticamente a la próxima operación (molienda), el grado de cacao que no ha sido triturado o granos partidos y cáscaras menores de 7 mm pasan a través de la última sección de la rejilla y es transportado por un helicoides hasta el elevador para completar la operación.

Es muy importante que la trilladora tenga forma de ajustar la presión del aire sobre cada una de las mallas en forma precisa, pues de esta depende:

- La cantidad de cáscaras que quede en el cacao, lo que afecta directamente la calidad de la taza, es decir, si hay alto contenido de cascarilla en la taza queda un residuo sólido que generalmente no es aceptado por el consumidor.
- Si hay una succión demasiado fuerte, en la cáscara se va encontrar cacao, lo que ocasiona unas mermas muy altas.

## **Molienda**

Por medio de las fuerzas de fricción y compresión, los granos de cacao se convierten en masa al pasar por el proceso de molienda. Los dos molinos realizan las funciones siguientes: triturador y refinador, el primero es un molino de percusión y el segundo un molino de rodillos. El objetivo de la molienda es obtener tamaños de partículas menores o iguales a 0.04 mm, al menos en el 60% de las partículas.

El molino de percusión es un molino previo para triturar los granos de cacao quebrados provenientes de la descascarilladora, y convertirlos en una masa líquida de cacao. Estos molinos vienen provistos de una parrilla cribadora intercambiable, con ancho de separación que oscilan entre 0.08 - 0.05 mm. El producto a moler queda en el proceso de molienda hasta que se haya logrado la finura requerida, para poder llegar a través de la parrilla cribadora a la salida. El producto molido es recogido en un recipiente y trasladado al siguiente molino, a través de una bomba de pistones rodantes. El molino de rodillos es utilizado para la refinación de cacao premolido, destinado a la producción de chocolatinas y coberturas de chocolate.

La máquina consiste en un juego de cinco cilindros, cada uno con 600 mm de longitud y 250 mm de diámetro. Los tres primeros que se encuentran ubicados en la parte superior de la máquina realizan la primera y segunda molienda del grano y los dos últimos ubicados en la parte inferior de la máquina realizan la molienda de refinación. La máquina cuenta además con un sistema de cribado que clasifica el producto por el tamaño de la partícula, obligando a la recirculación o al paso inmediato a la salida exterior de la máquina.

## **Enfriamiento**

Debido a las fuerzas de fricción generadas en los molinos de licor de cacao se calienta (En molinos con circulación de agua refrigerante la masa alcanza temperaturas de 60 - 70°C), por lo tanto, se recomienda enfriar la masa de cacao lo más rápido posible con el objeto de conservar todas las propiedades organolépticas y obtener la temperatura adecuada para el moldeo.

Este enfriamiento se realiza en tanques con agitadores y recubierto con una camisa (de doble pared) por la que circula agua fría (15°C o menos). En este proceso la temperatura de la masa baja hasta 38 - 40°C.

## **Mezcla y temperado**

De los tanques de enfriamiento el licor de cacao pasa a una mezcladora donde se le adiciona el azúcar y la lecitina en forma opcional y otros ingredientes adicionales. La lecitina es un

emulsificante que ayuda a producir y a mantener la espuma cuando se prepara el chocolate. Las proporciones que se utilizan en chocolate de mesa con azúcar son: 32% de licor de cacao, 16% de lecitina, 50% de azúcar en polvo, 2% esencia de clavos y canela. Otra formulación es 30% licor de cacao, 10% de lecitina y 60% azúcar en polvo. Una formulación para chocolate amargo sería: 90% de licor de cacao (60% cacao corriente y 30% pasilla), 9% de lecitina y 1% esencia de clavos y canela.

Temperar chocolate significa crear en la fracción grasa, o sea la manteca de cacao, un número suficiente de partículas de cristalización en forma estable y distribuirlas de manera homogénea en la masa.

En resumen, el temple o temperado consiste en pre-cristalizar la manteca de cacao mediante cambios rápidos de temperaturas, para esto se recomienda bajar el chocolate hasta 27° C para destruir algunos tipos de cristales indeseables y volverla a subir a 30°C para ser moldeado. La máquina temperadora consiste en un tanque de doble pared con agitador cuya función es adecuar la masa a la temperatura de moldeo, con el fin de evitar afloramientos en el producto final debido a la diferencia de temperaturas entre el molde y el producto.

### **Moldeo**

El chocolate azucarado se coloca en moldes con capacidad de 250 gramos divididos en 10 pastillas. El chocolate amargo se coloca en moldes con capacidad de 125 gramos divididos en 16 pastillas, el moldeo se hace mecánicamente por medio de pistones y émbolo que dosifican el volumen o peso necesario.

El accionamiento de esta máquina es neumático a través de aire comprimido y puede dar un rendimiento de 1800 moldes por hora. Ya estando el chocolate en los moldes se pasa por una mesa o banda transportadora-vibradora, con el objeto, de que la masa de chocolate adquiera la forma del molde y desaloje todas las burbujas de aire internas.

### **Empaque**

El área locativa para esta sección debe ser diseñada de tal manera que sea bien fresca o con aire acondicionado, porque a temperaturas mayores de 30°C el chocolate se derrite fácilmente; se recomienda una temperatura de almacenamiento de 18°C - 23°C y una humedad relativa inferior de 50%. El empaque se realiza de forma mecánica.

#### 1.4. Influencia de las propiedades y parámetros más importantes de los granos de cacao en los sistemas de transporte neumático

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

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

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

| Propiedades           | A | B | C | D | E | F | G | H | I |
|-----------------------|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| Densidad del sólido   |   | X |   |   |   | X |   | X |   |
| Angulo de reposo      |   |   |   |   | X |   |   |   |   |
| Temperatura           | X |   | X | X |   | X |   | X | X |
| Humedad               | X | X |   |   | X |   |   | X |   |
| Granulometría         |   | X |   |   |   | X |   | X |   |
| Forma de la partícula | X |   |   |   |   | X | X | X |   |
| Dureza                | X | X | X |   |   | X | X |   |   |
| Fragilidad            | X | X |   |   |   | X | X |   |   |
| Flotabilidad          | X |   |   |   | X | X | X |   |   |
| Fluidez               | X |   |   |   | X |   |   |   |   |
| Higroscopicidad       | X |   |   | X | X |   |   |   |   |
| Agresividad química   |   |   | X |   |   |   |   |   | X |
| Toxicidad             | X |   |   |   |   |   |   |   | X |
| Explosividad          | X |   |   | X |   |   |   |   | X |
| Sensibilidad          |   |   |   | X |   |   |   |   |   |

Donde:

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

El segundo paso en el proceso de proyección de las instalaciones es la selección del tamaño del sistema en función de las propiedades y parámetros requeridos. Esto permite la determinación del flujo de gas, el diámetro de la tubería y la presión de operación requerida, como consecuencia, ello permite definir las dimensiones del equipo y la planta. Una correcta selección del tamaño del sistema debe estar basada en el conocimiento exacto de los parámetros característicos del producto que va a ser manipulado:

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

Esos parámetros pueden ser deducidos a partir de aplicaciones industriales previas con el mismo producto o estudios de similitud con otros materiales, o por la ejecución de ensayos experimentales en una instalación. Una buena demostración de la importancia de la relación de experimentos está dada por el hecho de que la solución óptima es generalmente obtenida por una comparación de varias soluciones técnicas posibles.

### **1.5. Principales dimensiones de las instalaciones de transporte neumático en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”**

En las tablas 1.2- 1.4 se exponen las principales dimensiones de los cinco sistemas de transporte neumático en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”, ellas se usarán en

el cálculo y evaluación de los mismos luego de establecer el método apropiado y el conjunto de expresiones que se necesitan para ejecutar la tarea.

**Tabla 1.2. Dimensiones de los sistemas de transporte neumático de los materiales clasificado fino y grueso entre la clasificadora y la tolva de alimentación a las tostadoras**

| Datos                               | Magnitud |
|-------------------------------------|----------|
| Diámetro interior de la tubería     | 100 mm   |
| Longitud de los tramos horizontales | 18.7 m   |
| Longitud de los tramos verticales   | 5.6 m    |
| Cantidad de codos 90°               | 3        |
| Cantidad de válvulas de dos vías    | 1        |

**Tabla 1.3. Dimensiones de los sistemas de transporte neumático de los materiales tostados fino y grueso entre las tostadoras y la tolva de alimentación a la trituradora**

| Datos                               | Magnitud |
|-------------------------------------|----------|
| Diámetro interior de la tubería     | 100 mm   |
| Longitud de los tramos horizontales | 27.4 m   |
| Longitud de los tramos verticales   | 5.6 m    |
| Cantidad de codos 90°               | 4        |
| Cantidad de válvulas de dos vías    | 1        |

**Tabla 1.4. Dimensiones del sistema de transporte neumático del material triturado entre la trituradora y la tolva de alimentación al molino**

| Datos                               | Magnitud |
|-------------------------------------|----------|
| Diámetro interior de la tubería     | 100 mm   |
| Longitud de los tramos horizontales | 12.4 m   |
| Longitud de los tramos verticales   | 5.6 m    |
| Cantidad de codos 90°               | 3        |
| Cantidad de válvulas de dos vías    | 1        |



### 1.6. Conclusiones del capítulo 1

- El análisis de los trabajos precedentes muestra suficiente información especializada para la solución de la tarea, ello se compendia en textos básicos y publicaciones en revistas que resumen los aspectos esenciales de los procesos de transporte neumático del cacao y otros materiales.
- El estado actual del transporte neumático del cacao en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi” demuestra la existencia de problemas relacionados con obstrucción en el sistema y pérdidas de material asociados a los diferentes procesos.

## **CAPÍTULO II. MATERIALES Y MÉTODOS**

### **2.1. Introducción**

El análisis y aplicación del método de cálculo teórico es fundamental para describir el comportamiento del sistema de transporte neumático. En este capítulo se determinan las propiedades físicas y aerodinámicas del material investigado, se establece el procedimiento teórico que describe la influencia de la velocidad y presión de trabajo en el punto de operación de los sistemas de transporte neumático que permite predecir el trabajo estable del sistema.

### **2.2. Propiedades físicas y aerodinámicas de los granos de cacao**

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 centrales azucareros.

Lampinen (1991); Taylor (2005) examinan la influencia de las propiedades de materiales tales como: madera, arroz, pelets de polietileno, polvo de cacao entre otros, en las pérdidas de presión y el consumo de energía específica de los sistemas de transporte neumático.

Las propiedades físicas y aerodinámicas del material más importante desde el punto de vista del transporte neumático son las siguientes:

- Contenido de humedad
- Forma de las partículas
- Composición granulométrica
- Densidad de las partículas
- Densidad aparente
- Velocidad de flotación de las partículas

### Contenido de humedad

El contenido de humedad del material en los sistemas de transporte neumático se determina por el método de diferencia de pesada. Los materiales para los experimentos son los siguientes:

- Granos de cacao
- 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 (Papadakis, 2004) 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 de los granos de cacao antes del proceso de tostado se muestra en la tabla 2.1

### Composición granulométrica

Debido a la importancia que tiene el diámetro de las partículas en el transporte neumático del cacao se hace el análisis granulométrico con muestras tomadas de los tres tipos de materiales a transportar (clasificado grueso, clasificado fino y triturado). 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 seca. Los valores del análisis granulométrico se muestran en las tablas (2.1-2.3)

**Tabla 2.1. Valores del análisis granulométrico y contenido de humedad de los granos de cacao correspondiente al clasificado grueso.**

|                            |           |                      |           |
|----------------------------|-----------|----------------------|-----------|
| Contenido de humedad: 7.4% |           |                      |           |
| Composición granulométrica |           |                      |           |
| Clase de tamaño (mm)       | % en peso | Clase de tamaño (mm) | % en peso |
| + 18,00                    | 9,2       | - 10,00 + 8,00       | 5,4       |
| - 18,00 + 14,00            | 67,4      | - 8,00 + 6,30        | 5,1       |
| - 14,00 + 10,00            | 8,7       | - 6,30               | 4,2       |

**Tabla 2.2. Valores del análisis granulométrico y contenido de humedad de los granos de cacao correspondiente al clasificado fino.**

|                            |           |                      |           |
|----------------------------|-----------|----------------------|-----------|
| Contenido de humedad: 7.4% |           |                      |           |
| Composición granulométrica |           |                      |           |
| Clase de tamaño (mm)       | % en peso | Clase de tamaño (mm) | % en peso |
| + 10,00                    | 8,3       | - 6,30 + 4,5         | 5,9       |
| - 10,00 + 8,00             | 71,4      | - 4,5 + 2,25         | 4,7       |
| - 8,00 + 6,30              | 6,8       | - 2,25               | 2,9       |

**Tabla 2.3. Valores del análisis granulométrico del material triturado.**

|                            |           |                      |           |
|----------------------------|-----------|----------------------|-----------|
| Composición granulométrica |           |                      |           |
| Clase de tamaño (mm)       | % en peso | Clase de tamaño (mm) | % en peso |
| + 6,30                     | 4,34      | - 2,25 + 1,5         | 3,87      |

|              |       |              |      |
|--------------|-------|--------------|------|
| - 6,30 + 4,5 | 12,68 | - 1,5 + 1,00 | 2,45 |
| - 4,5 + 2,25 | 74,27 | - 1,00       | 2,39 |

### Forma de las partículas

La morfología de los granos del cacao se estudia con ayuda de mediciones con un pie de Rey previa clasificación de las muestras como se observa en las tablas (2.1-2.3). Se examinaron 100 granos de cada una de las clases, fueron fotografiados (figura 2.1).



Figura 2.1. Método para determinar las dimensiones de los granos de cacao

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.

$$deq = \sqrt[3]{(6/\pi) \cdot l \cdot a \cdot e} \quad (2.1)$$

Donde:

l – largo; mm

a – ancho; mm

e – espesor; mm

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

$$SF = \frac{e}{\sqrt{l \cdot a}} \quad (2.2)$$

El factor expresa el aplastamiento que presentan los granos de cacao. 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 1.4) alcanza valores relativamente altos, en general superiores a 0,8, por lo que pueden ser consideradas esferas.

**Tabla 2.4. Factor de forma promedio para los granos de cacao**

| Clase de tamaño (mm) | Dimensiones promedio (mm) |       |         | Factor de forma (promedio) |
|----------------------|---------------------------|-------|---------|----------------------------|
|                      | Largo                     | Ancho | Espesor |                            |
| - 18,00 + 14,00      | 19,25                     | 16,4  | 14,87   | 0,837                      |
| - 14,00 + 10,00      | 13,87                     | 11,25 | 10,1    | 0,809                      |
| - 10,00 + 8,00       | 9,89                      | 8,74  | 8,04    | 0,865                      |
| - 8,00 + 6,30        | 8,56                      | 7,29  | 6,37    | 0,806                      |
| - 6,30 + 4,5         | 6,28                      | 4,92  | 4,79    | 0,862                      |
| - 4,5 + 2,25         | 4,23                      | 3,48  | 3,09    | 0,805                      |

### Densidad de los granos de cacao

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. Para calcular la densidad real de los granos de cacao se pueden usar varios métodos, dentro de ellos el más difundido es el picnométrico. Según la literatura consultada (Álvarez C, 2007; INIAP, 2006) la densidad real de los granos de cacao tiene un valor promedio de:

- Granos clasificados de cacao,  $\rho_{real} = 897 \text{ kg/m}^3$
- Granos secos de cacao,  $\rho_{real} = 742 \text{ kg/m}^3$

### 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 2.5. Comportamiento de la densidad aparente en función del diámetro de las partículas para granos clasificados.**

|                                   |     |     |     |     |     |     |      |        |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|--------|
| ds (mm)                           | 18  | 14  | 10  | 8   | 6,3 | 4,5 | 2,25 | Mezcla |
| $\rho_{apa}$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 702 | 716 | 739 | 756 | 761 | 783 | 794  | 775    |

**Tabla 2.6. Comportamiento de la densidad aparente en función del diámetro de las partículas para granos tostados.**

|                                   |     |     |     |     |     |     |      |        |
|-----------------------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-----|------|--------|
| ds (mm)                           | 18  | 14  | 10  | 8   | 6,3 | 4,5 | 2,25 | Mezcla |
| $\rho_{apa}$ (kg/m <sup>3</sup> ) | 512 | 526 | 547 | 584 | 608 | 628 | 634  | 620    |

En las tablas (2.5-2.6) 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, esto se debe a la reducción de la porosidad del material. La tendencia decreciente ha sido observada por otros autores (Pacheco, 1984; Torres, 2002) en la caracterización de diferentes materiales.

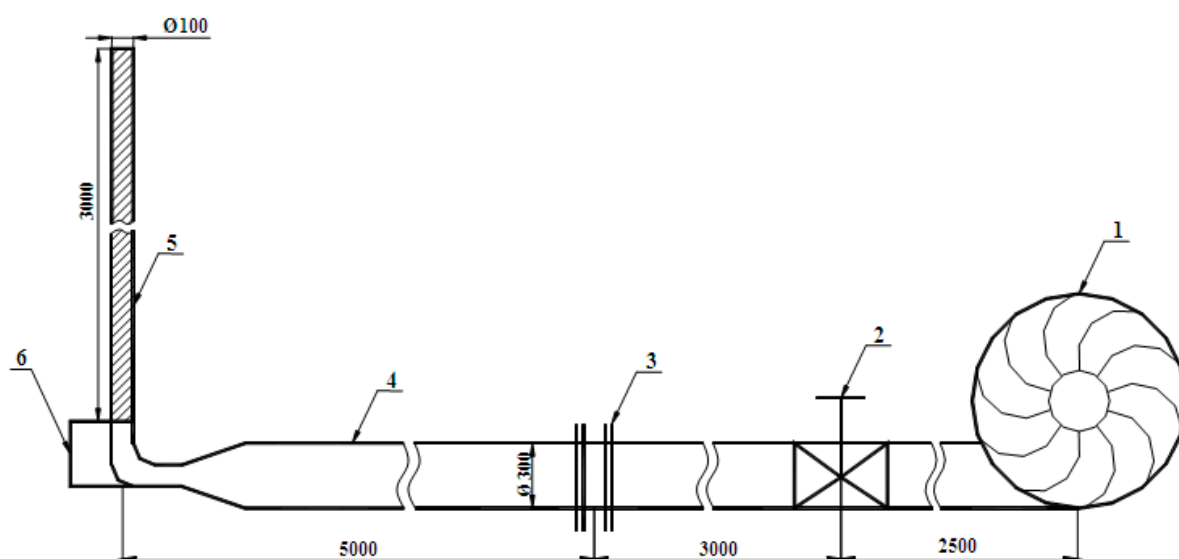
### **Velocidad de flotación**

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 (ds) y su velocidad de flotación (Vf), 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 descende 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 (2005) 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 (2007) 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.2.2. Instalación experimental para determinar la velocidad de flotación de los granos de cacao**

El parámetro se determina en una instalación experimental construida en áreas del Instituto Superior Minero Metalúrgico de Moa, sus detalles aparecen en la figura 1.4.

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. 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 las tablas 2.7 y 2.8 se muestran los resultados de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas. Se observa un incremento de la velocidad con el incremento del diámetro de partículas, alcanzando el máximo valor de 12,4 m/s para los granos antes del proceso de tostado y 10,6 m/s para los granos luego del proceso de tostado.

**Tabla 2.7. Comportamiento de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas para granos clasificados.**

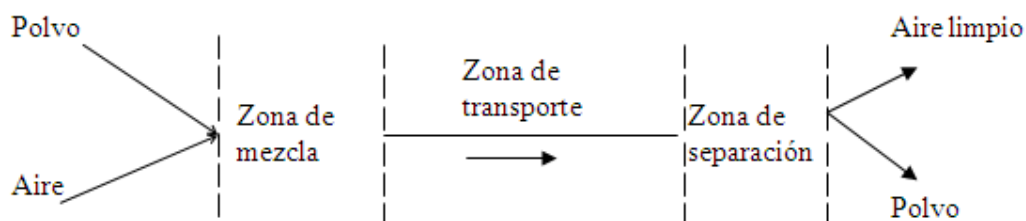
|          |      |      |      |      |      |     |      |
|----------|------|------|------|------|------|-----|------|
| ds (mm)  | 18   | 14   | 10   | 8    | 6,3  | 4,5 | 2,25 |
| Vf (m/s) | 12,4 | 11,8 | 11,3 | 10,7 | 10,1 | 9,8 | 9,3  |

**Tabla 2.8. Comportamiento de la velocidad de flotación en función del diámetro de las partículas para granos tostados.**

|          |      |      |     |     |     |     |      |
|----------|------|------|-----|-----|-----|-----|------|
| ds (mm)  | 18   | 14   | 10  | 8   | 6,3 | 4,5 | 2,25 |
| Vf (m/s) | 10,6 | 10,1 | 9,7 | 9,2 | 8,7 | 8,4 | 7,9  |

### 2.3. Método de cálculo de los sistemas de transporte neumático del cacao

Los sistemas de transporte neumático a presión pueden dividirse en tres zonas fundamentales como se muestra en la figura.



#### 2.3.1. Expresiones fundamentales de transporte neumático

La concentración de la mezcla sólido aire es fundamental en el cálculo de los sistemas de transporte neumático, ella se determina por la siguiente expresión:

$$\mu = \frac{G_m}{Q_a \cdot \rho_g} \quad (2.3)$$

Donde

$G_m$ , Flujo másico de sólidos, kg/s

$Q_a$ , Flujo volumétrico de aire, m<sup>3</sup>/s

$\rho_g$ , Densidad del aire, kg/m<sup>3</sup>

Otra expresión que puede usarse para determinar la concentración de la mezcla es la siguiente:

$$\mu_{mez} = \frac{\text{Peso del aire} + \text{Peso del material}}{\text{Volumen del aire} + \text{Volumen del material}}$$

Generalmente, el peso del aire es pequeño comparado con el del material, y el volumen del material es pequeño en comparación con el del aire. En la mayoría de los sistemas de transporte de polvos, estas diferencias son tan grandes que puede despreciarse el peso del aire, y el volumen del material a fin de simplificar la estimación de  $\mu_{mez}$ .

La elección de la proporción entre material transportado y aire, y por lo tanto, del valor de  $\mu_{mez}$ , la determinan principalmente razones económicas. Un valor elevado ayuda a mantener pequeño el tamaño de la tubería transportadora, pero a su vez aumenta el valor de  $(P_1 - P_2)$ , se limita en la práctica a alrededor de 0,56 kgf/cm<sup>2</sup>, valores superiores suponen grandes volúmenes en el

extremo aspirador del sistema, encareciendo la bomba de vacío y la tubería. En un sistema de transporte por presión con alimentación continua de polvo ( $P_1 - P_2$ ), se limita por lo general a  $0,7 \text{ kgf/cm}^2$  aproximadamente, debido a lo difícil que resulta proyectar un sistema de alimentación sencillo y barato, aunque para mayores diferencias de presión se dispone de alimentadores especiales. Al elegir un sistema discontinuo estas limitaciones desaparecen y es económico trabajar con presiones bastante grandes, hasta de  $7 \text{ kgf/cm}^2$ .

En el transporte de tipo aerodinámico, existe un límite superior para la relación polvo /aire para cualquier material determinado. Si se sobrepasa, este valor puede ocurrir una obturación en la tubería, particularmente en los codos.

El cálculo de las instalaciones de transporte neumático se reduce a la determinación del diámetro de la tubería y las pérdidas de presión durante el movimiento de la mezcla sólido-aire, según la cual se elige la máquina sopladora de aire. La longitud de transporte y las características del material son datos iniciales para el cálculo.

En las instalaciones de transporte neumático es necesario garantizar una velocidad superior a la crítica, según la literatura consultada su valor se determina por:

$$V_{as} = (1.1 - 1.25) \cdot V_f \quad (2.4)$$

Donde:

$V_{as}$ , Velocidad de transporte, m/s

$V_f$ , Velocidad de flotación, m/s

La velocidad de transporte tiene estrecha relación con los flujos volumétricos de sólido y aire, respectivamente, usando la ecuación de continuidad se puede determinar por la siguiente ecuación:

$$V_{as} = \frac{4 \cdot (Q_m + Q_a)}{\pi \cdot D^2} \quad (2.5)$$

Es importante el conocimiento de la velocidad crítica o de sustentación de las partículas de cacao en un flujo de aire ( $V_f$ ), ella se determina de forma experimental y los resultados para los diferentes diámetros del material investigado se exponen en las tablas 2.7 y 2.8.

Las partículas dentro de todo el margen de variación de su diámetro, tienen un número de Reynolds crítico que se puede calcular a través de la siguiente expresión:

$$R_f = \frac{V_f \cdot d_p}{\nu} \quad (2.6)$$

Donde

$\nu$ , Coeficiente cinemático de viscosidad,  $\text{m}^2/\text{s}$

$d_p$ , Diámetro equivalente de las partículas, m

### 2.3.2. 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 cacao es necesario definir las ecuaciones de pérdidas de presión en un flujo de aire limpio con el uso de la ecuación de Darcy.

$$\frac{dp}{dl} = \frac{1}{D} \cdot \lambda_G \cdot \frac{\rho_G}{2} \cdot V_g^2 \quad (2.7)$$

Donde:

D – Diámetro de la tubería; m

$\lambda_G$ , Coeficiente de fricción del gas

$\rho_G$ , Densidad del aire;  $\text{kg}/\text{m}^3$

$V_g$ , Velocidad del aire;  $\text{m}/\text{s}$

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

Aunque el coeficiente de fricción del gas  $\lambda_G$  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  $2320 < R_e < 10^5$ .

$$\lambda_G = 0,3164 \cdot R_e^{-\left(\frac{1}{4}\right)} \quad (2.8)$$

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

$$\frac{1}{\sqrt{\lambda_G}} = 2,0 \cdot \log_{10} (R_e \cdot \sqrt{\lambda_G}) - 0,8 \quad (2.9)$$

El número de Reynolds se determina por:

$$Re = \frac{V_g \cdot D}{\nu} \quad (2.10)$$

Donde:

$\nu$ , Coeficiente cinemático de viscosidad del aire; m<sup>2</sup>/s

Para el cálculo de las pérdidas de presión en el transporte neumático de sólidos la siguiente versión modificada de la ecuación (2.5), siempre se puede encontrar en la literatura (Lampinen, 1991; Wypych y Arnold, 2006).

$$\frac{dp}{dl} = \frac{1}{D} \cdot (\lambda_G + \mu \cdot \lambda_s) \cdot \frac{\rho_G}{2} \cdot V_g^2 \quad (2.11)$$

Donde:

$\mu$ , Concentración de la mezcla; kg de sólido/kg de aire

$\lambda_G$ , Coeficiente de pérdida de presión de las partículas sólidas.

La ecuación (2.9) 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  $\lambda_s$  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 los que contienen algunos números característicos de similitud. La misma idea la usa Weber (2008), quien encuentra una correlación del coeficiente de pérdida de presión en el transporte neumático vertical basado en datos experimentales. A fin de expresar uno de esos modelos, se introducen dos números adimensionales: el número de Froude relacionado al gas y al sólido respectivamente.

$$F_r = \frac{V_g^2}{D \cdot g} \quad (2.12)$$

y

$$Fr_s = \frac{V_f^2}{d_s \cdot g} \quad (2.13)$$

Donde:

$F_r$ , 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 de sólidos granulados (que incluye los granos de cacao) es:

$$\lambda_s = 2,1 \cdot \mu^{-0,3} \cdot F_r^{-1} \cdot Fr_s^{0,25} \cdot \left( \frac{D}{d_s} \right)^{0,1} \quad (2.14)$$

El coeficiente de pérdida de presión en el transporte neumático vertical (Weber, 2008) se calcula por la siguiente expresión:

$$\lambda_s = \frac{V_g/V_s}{12} + \frac{2 \cdot V_g/V_s}{F_r} \quad (2.15)$$

Donde:

$V_s$ , Velocidad de las partículas sólidas; m/s

El comportamiento del transporte neumático de granos de cacao y polvo por tuberías varía considerablemente. En un caso extremo, una masa fluidizada, de un tipo que mantenga persistentemente su fluidez, se moverá lentamente como un todo de forma homogénea. En el otro caso extremo gránulos grandes tales como las de cacao, carbón menudo, o el trigo, pueden ser acarreados solo por volúmenes relativamente grandes de aire en rápido movimiento (especialmente en tuberías horizontales). Una partícula es obligada a avanzar debido al arrastre aerodinámico y se desplaza a menor velocidad que el aire de acarreo. Por acción de la gravedad

se hunde constantemente hasta la superficie inferior de la tubería en donde la frena el rozamiento con dicha superficie y nuevamente es acelerada por el arrastre aerodinámico. El gránulo está también sujeto a cavitaciones aleatorias que pueden retardarlo o acelerarlo con respecto a la dirección del transporte. En un tubo vertical la tendencia a desviarse hacia las paredes es menos pronunciada, pero subsiste, debido al movimiento turbulento del aire. Entre estos dos tipos extremos de movimiento hay una zona intermedia en la cual los aspectos característicos de ambos tipos ocurren en dichas proporciones.

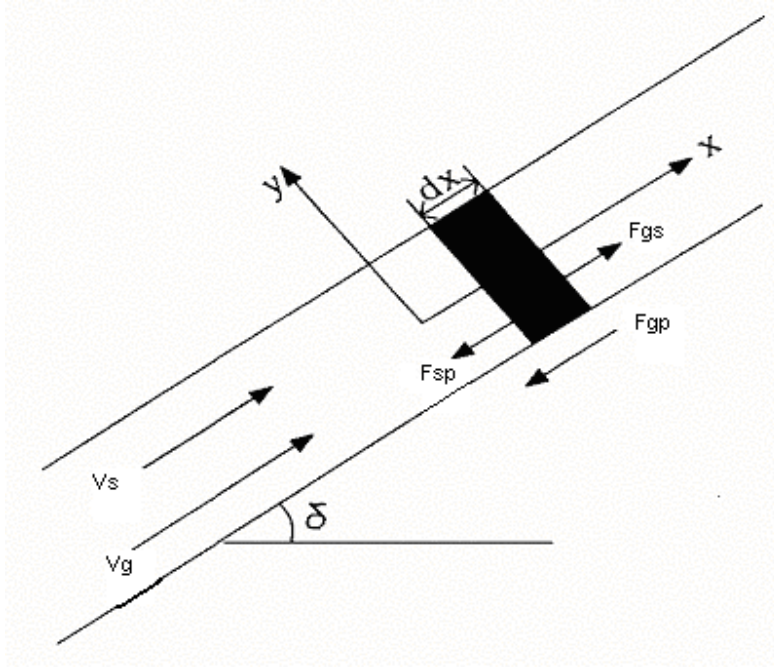
Otros autores plantean que para calcular las pérdidas de presión ( $P_1-P_2$ ) en un sistema a presión, la presión de referencia se fija en el extremo por donde se descarga el material, donde la presión de salida es la atmosférica. A esta presión de referencia debe agregarse la caída de presión conocida o supuesta en la zona de separación. Esto dará una  $P_2$  determinada. En un sistema de aspiración, la presión atmosférica de referencia se sitúa en el extremo de entrada del material. Puede haber cierta resistencia artificial debido a un filtro de aire, válvulas y conductos de distribución de aire, o a un contador de aire. Es preciso verificar o suponer la caída de presión debido a dichas resistencias y restarla de la presión atmosférica. Esto dará una  $P_1$  determinada. El resto del procedimiento es el mismo para los sistemas de presión o de vacío.

Los valores de  $V$  y de  $\mu_{mez}$  pueden obtenerse a partir del conocimiento de sistemas para transportar el mismo material. Si no se dispone de tal conocimiento deben entonces, buscarse en tablas o calcularse por las relaciones empíricas que aparecen en la literatura pero teniendo en cuenta las consideraciones expuestas bajo “velocidades de transporte, relación material transportado/aire” de los acápites anteriores. Luego debe verificarse el diámetro de la tubería el cual puede calcularse a partir de la densidad de la mezcla material/aire, de la velocidad del aire de transporte y del gasto de material.

### **2.3.3. Modelos recientes para el cálculo de las pérdidas de presión en el transporte neumático de materiales polidispersos**

Investigaciones recientes (Torres, 2003; Rodes, 2007) establecen modelos para el transporte neumático de materiales en fases fluida y densa en tuberías horizontales y verticales, ellos se obtienen a partir del uso simultáneo de las ecuaciones de balance de masa, de momento y de

energía. Para ello se considera un tubo inclinado hacia arriba con un ángulo  $\delta$  desde la horizontal como se muestra en la figura 2.3.



**Figura 2.3 Fuerzas de fricción que afectan el movimiento de la mezcla aire - material durante el transporte neumático (Fuente: Torres, 2003).**

El elemento de mezcla mostrado en la Figura 2.1 contiene el flujo de aire y partículas de material.

Las densidades parciales de esos dos elementos son  $\rho_g$  y  $\rho_s$ , respectivamente y la porosidad es  $\varepsilon$ . 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  $(1 - \varepsilon) \cdot P$ .

Luego del análisis de las diferentes fuerzas que intervienen en el transporte neumático de los materiales se obtiene una expresión en derivadas parciales en función de la longitud de la tubería que permite estimar las pérdidas de presión en el sistema.

$$\left[ -1 + \frac{\varepsilon \cdot \rho_g \cdot V_g^2}{P} + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot \rho_g \cdot \mu \cdot \frac{V_g \cdot (V_g + V_s)}{P} \right] \frac{dP}{dx} = \frac{\lambda_g}{D} \cdot \frac{\varepsilon \cdot \rho_g}{2} \cdot V_g^2 +$$

$$+ \varepsilon \cdot \rho_g \cdot g \cdot \sin \delta \cdot \left( 1 + \mu \cdot \frac{V_g}{V_s} \right) + \mu \cdot \varepsilon \cdot \rho_g \cdot \frac{V_g}{V_s} \cdot \left( g \cdot \frac{V_f}{V_g} \cdot \cos^2 \delta + \frac{0,1625}{D} \cdot V_s^2 \right) \quad (2.16)$$

La expresión (2.16) no puede usarse directamente en la estimación de las pérdidas de presión en el transporte neumático del cacao, para ello es necesario realizar, en una instalación experimental, las corridas experimentales que permitan estimar los parámetros del modelo característicos para este material, es por ello que en la estimación de los valores de pérdidas se usó el procedimiento descrito en los epígrafes anteriores.

#### 2.3.4. Ecuaciones para el cálculo de las pérdidas en codos durante el transporte neumático del cacao.

Para la construcción de las características de transporte neumático del cacao 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:

$$\Delta P = \xi \cdot \rho_G \cdot \frac{V_g^2}{2} \quad (2.17)$$

Donde:

$\xi$ , 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 ( $\theta$ ) y de la forma de su sección transversal.

Con un ángulo de curvatura de  $90^\circ$  el coeficiente experimental ( $\xi$ ) según Lesme (1996) se calcula por la siguiente expresión:

$$\xi = 0,051 + 0,19 \cdot \left( \frac{D}{R} \right) \quad (2.18)$$

Donde:

$R$ , Radio de curvatura; m

La literatura actual sobre el tema para el transporte neumático de partículas (Bradley, 2007; Pan y Wypych, 2008; 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:

$$\Delta P_{CT} = \Delta P_C + \Delta P_d \quad (2.19)$$

Donde:

$\Delta P_{CT}$  , Pérdidas totales en el codo; Pa

$\Delta P_C$  , Pérdidas en la zona curva; Pa

$\Delta P_d$  , Pérdidas en la zona de dispersión; Pa

Para el cálculo de  $\Delta P_C$  y  $\Delta P_d$  en el estudio del transporte neumático del cacao se utilizaron los resultados de Lesme (1996) en granos y polvos.

#### **Pérdidas en la zona curva del codo**

$$\Delta P_C = \Delta P + \Delta P_s \quad (2.20)$$

Donde:

$\Delta P$  , Pérdidas para el aire limpio; Pa

$$\Delta P_s = \xi_s \cdot \rho_s \cdot \frac{V_g^2}{2} \quad (2.21)$$

Donde:

$\xi_s$  - Coeficiente de resistencia en la curvatura producto del movimiento del material

$$\xi_s = A \cdot \left( \frac{R}{D} \right)^{0,5} \cdot Re^{0,1} \cdot Re_F^{0,35} \cdot \left( \frac{D}{ds} \right)^{0,2} \cdot F_{rs}^{-0,65} \cdot F_r^{0,35} \cdot \mu^{-1,09} \quad (2.22)$$

Donde:

$\mu$  , 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

### Pérdidas en la zona de dispersión

$$\Delta P_d = \beta_{OT} \cdot \rho_G \cdot \frac{V_g^2}{2} \quad (2.23)$$

Donde:

$\beta_{OT}$  , 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:

$\Delta_{OT}$  , Coeficiente que tiene en cuenta la disminución de las pérdidas por curvatura con la reducción del ángulo.

$\Delta Y$  , Coeficiente experimental de la longitud recta del codo

Los valores de  $\Delta Y$  y  $\Delta_{OT}$  se obtienen en las figuras 1 y 2 de los anexos.

$\beta_{da}$  - Coeficiente de pérdidas de presión por dispersión de las partículas sólidas

En el transporte vertical

$$\beta_{da}^v = 1,55 \cdot 10^2 \cdot \text{Re}_f^{-0,15} \cdot \left( \frac{\rho_s}{\rho_G} \right)^{-0,45} \cdot \left( \frac{D}{ds} \right)^{-0,1} \cdot \mu^{2,59} \quad (2.24)$$

En el transporte horizontal

$$\beta_{da}^h = 0,28 \cdot 10^2 \cdot Re^{0,4} \cdot Re_f^{-0,8} \cdot Fr^{0,3} \cdot \left( \frac{\rho_s}{\rho_G} \right)^{-0,9} \cdot \left( \frac{D}{ds} \right)^{-0,5} \cdot \mu^{3,81} \quad (2.25)$$

## 2. 4. Conclusiones capítulo 2

- Los granos de cacao constituyen un sistema polidisperso con predominio de tamaño inferiores a los 18mm para los granos gruesos y 10 mm para los granos finos, forma esférica y un contenido de humedad inferior al 7.4%. La densidad real es inferior a 897kg/m<sup>3</sup> y la aparente de la mezcla de materiales no sobrepasa los 775kg/m<sup>3</sup>. La velocidad de flotación es inferior a 12.4 m/s para los mayores diámetros presente en las muestras.
- Las principales ecuaciones para el cálculo de los sistemas de transporte neumático del cacao muestran la dependencia de las pérdidas de presión y los coeficiente de pérdidas  $\lambda_G$  y  $\lambda_s$  para el gas y sólido respectivamente, así como de otros parámetros tales como: concentración de la mezcla, flujo másico de sólido y flujo másico de gas.

## CAPÍTULO III. ANÁLISIS DE LOS RESULTADOS. VALORACIÓN ECONÓMICA

### 3.1. Introducción

En este capítulo se exponen los principales resultados del análisis de los sistemas de transporte neumático en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”. A partir del algoritmo para el cálculo de las pérdidas de presión en el sistema se determina el punto de operación donde se establece la interrelación entre los parámetros más importantes en el transporte: Flujo másico de sólido, flujo másico de gas, concentración de la mezcla y pérdidas de presión. Se realiza, además, la valoración económica de la nueva propuesta estableciéndose las nuevas condiciones de explotación en función de los resultados experimentales y las curvas de comportamiento obtenidas a partir de los modelos teóricos.

### 3.2. Resultados del cálculo de las pérdidas de presión en tuberías horizontales y verticales para transporte de los granos de cacao.

#### Datos de entrada

$G_m, Q_a, V_g, D, g, d_s, V_f, \rho_g, v$

$$\begin{aligned} V_{as} &= 1.2 \cdot V_f & Fr_s &= \frac{V_f^2}{d_s \cdot g} & F_r &= \frac{V_g^2}{D \cdot g} & Re &= \frac{V_g \cdot D}{\nu} \\ \mu &= \frac{G_m}{Q_a \cdot \rho_g} & \lambda_G &= 0,3164 \cdot Re^{-\left(\frac{1}{4}\right)} \\ \lambda_s &= 2,1 \cdot \mu^{-0,3} \cdot F_r^{-1} \cdot Fr_s^{0,25} \cdot \left(\frac{D}{d_s}\right)^{0,1} & \lambda_s &= \frac{V_g/V_s}{12} + \frac{2 \cdot V_g/V_s}{F_r} \\ \frac{dp}{dl} &= \frac{1}{D} \cdot (\lambda_G + \mu \cdot \lambda_s) \cdot \frac{\rho_G}{2} \cdot V_g^2 \end{aligned}$$

**Figura 3.1. Algoritmo para el cálculo de las pérdidas de presión durante el transporte neumático de los granos de cacao en tuberías horizontales y verticales.**

En la figura 3.1 se expone el algoritmo para el cálculo de las pérdidas de presión en el transporte neumático de los granos de cacao en tuberías horizontales y verticales. Con los resultados del algoritmo y el método propuesto en el capítulo anterior, en las figuras 3.2- 3.4 se muestra el comportamiento de las pérdidas de presión en función del flujo másico de gas para tuberías horizontales y diferentes valores de concentración de la mezcla con diámetros de las partículas que oscilan entre (6-18) mm. En todos los casos se usa un diámetro de tubería de 100mm. En las figuras se observa una primera zona donde se produce una reducción de las pérdidas de presión con el incremento del flujo de gas, a partir de una zona (oscila entre 0.136kg/s - 0.165kg/s) comienza un incremento de las pérdidas que depende del diámetro de las partículas a transportar y la concentración de la mezcla, la zona de tránsito representa el cambio entre las fases diluta y densa en el transporte neumático de materiales sólidos. De forma similar se obtienen las curvas de comportamiento para los granos luego del proceso de tostión donde se elimina parte del contenido de humedad.

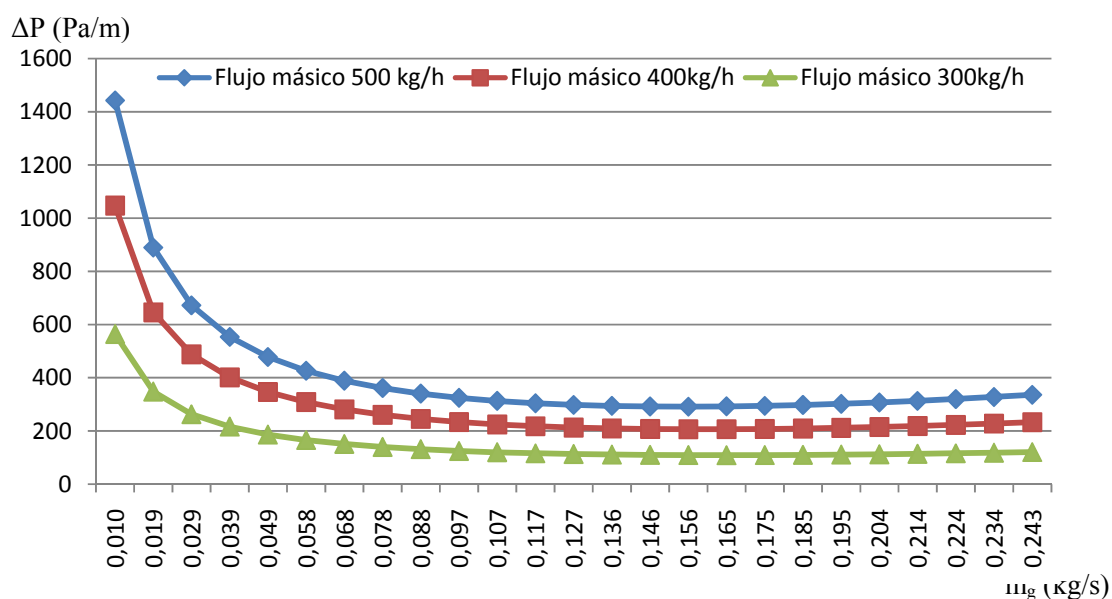


Figura 3.2. Comportamiento de las pérdidas de presión en el transporte neumático horizontal de los granos clasificados de cacao para granulometría  $d_s=15\text{mm}$

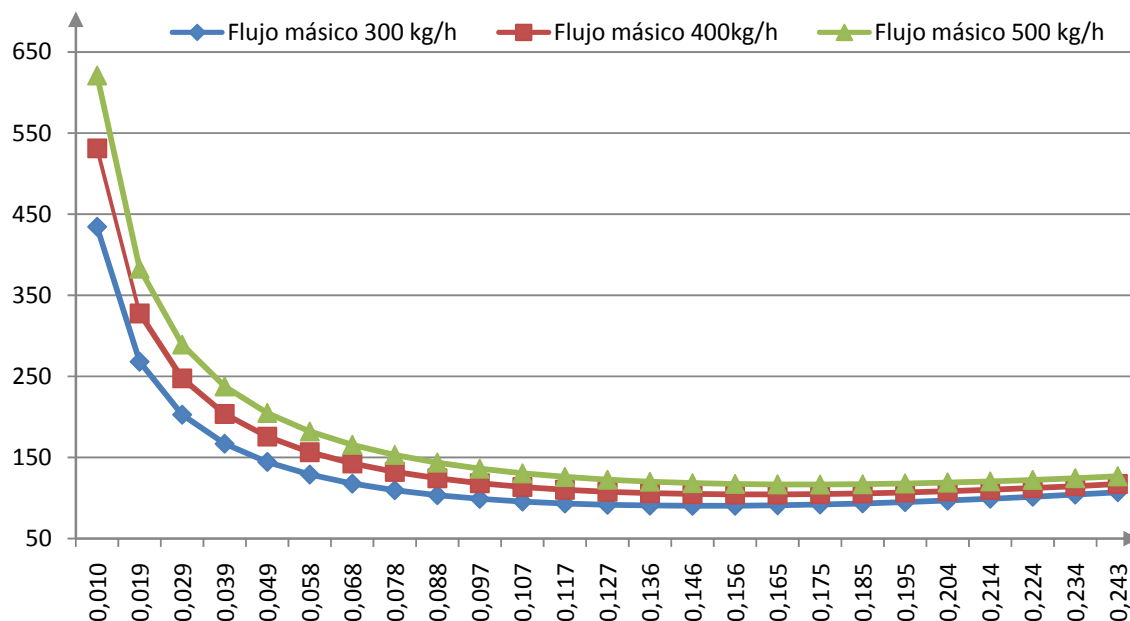


Figura 3.3. Comportamiento de las pérdidas de presión en el transporte neumático horizontal de los granos clasificados de cacao para granulometría  $d_s=10\text{mm}$

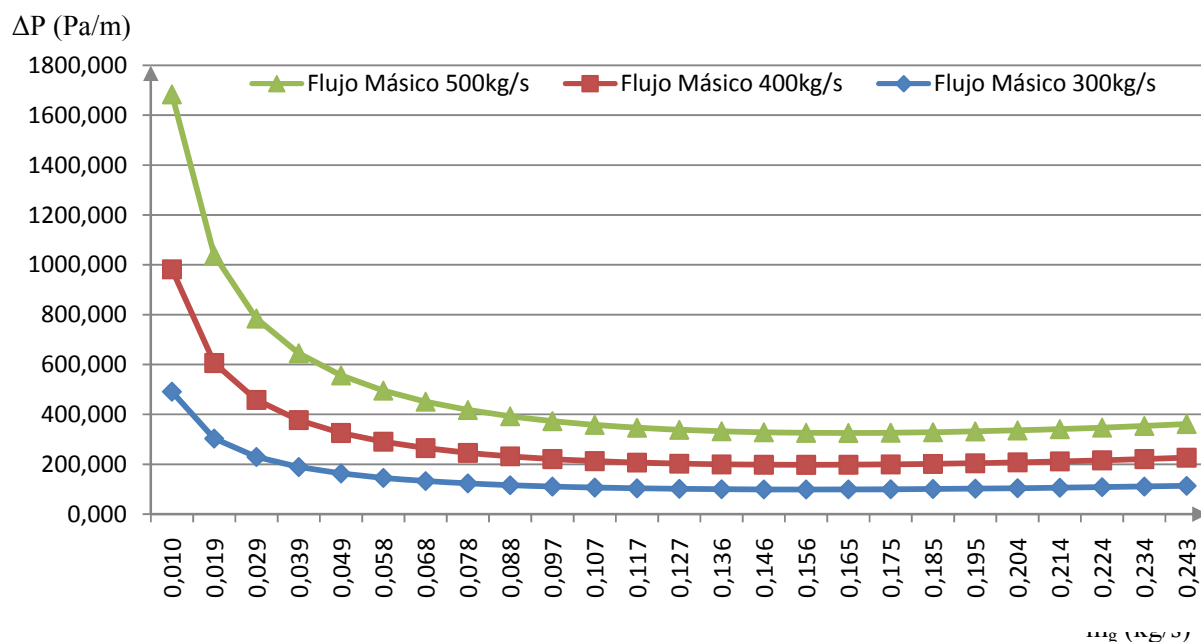


Figura 3.4. Comportamiento de las pérdidas de presión en el transporte neumático horizontal de los granos clasificados de cacao para granulometría  $d_s=6\text{mm}$

Para el transporte en tramos verticales cambia la expresión que se usa en el cálculo del coeficiente de fricción  $\lambda_s$  (ver algoritmo de la figura 3.1), es por ello que se obtienen diferentes valores de pérdidas de presión en comparación con el transporte neumático en tuberías horizontales. En las figuras (3.5 – 3.7) se expone el comportamiento de las pérdidas en función del flujo másico de gas, se observa un incremento con el flujo, factor importante en la selección de la zona racional de transporte.

Para obtener la zona racional de transporte es necesario combinar las pérdidas en tramos horizontales, verticales y accesorios, además se tienen en cuenta las pérdidas que se producen en el sistema de alimentación y descarga. Con los resultados anteriores se obtiene el comportamiento del consumo de energía específica, que relaciona el consumo energético con la cantidad de material transportado.

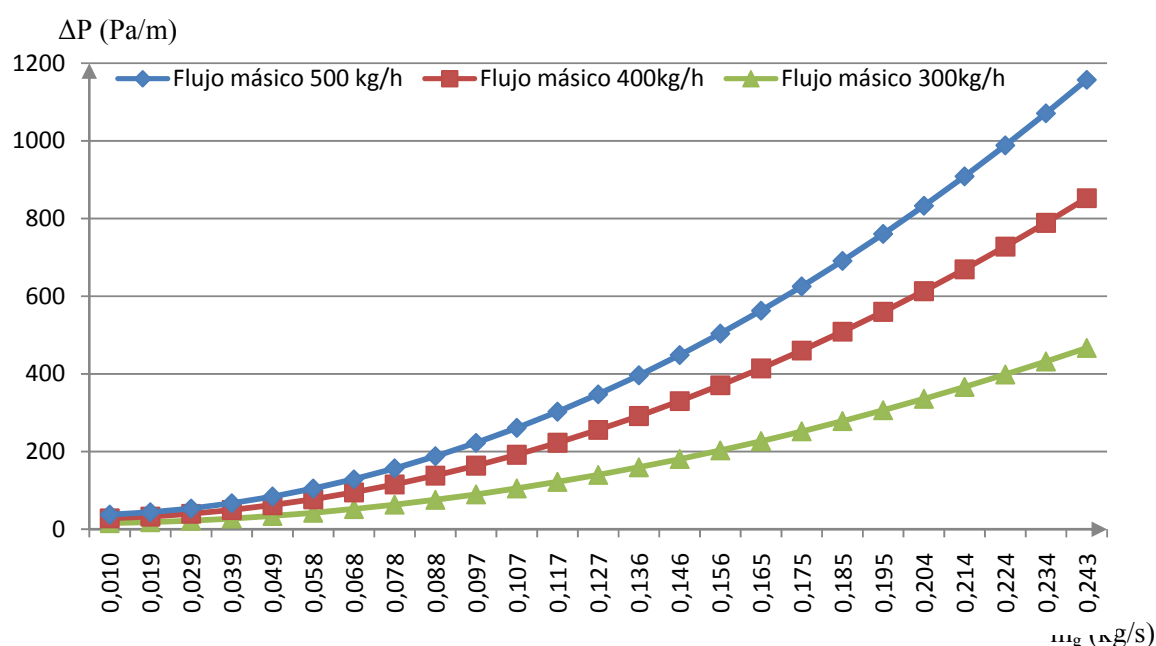


Figura 3.5. Comportamiento de las pérdidas de presión en el transporte neumático vertical de los granos clasificados de cacao para granulometría  $d_s=15\text{mm}$

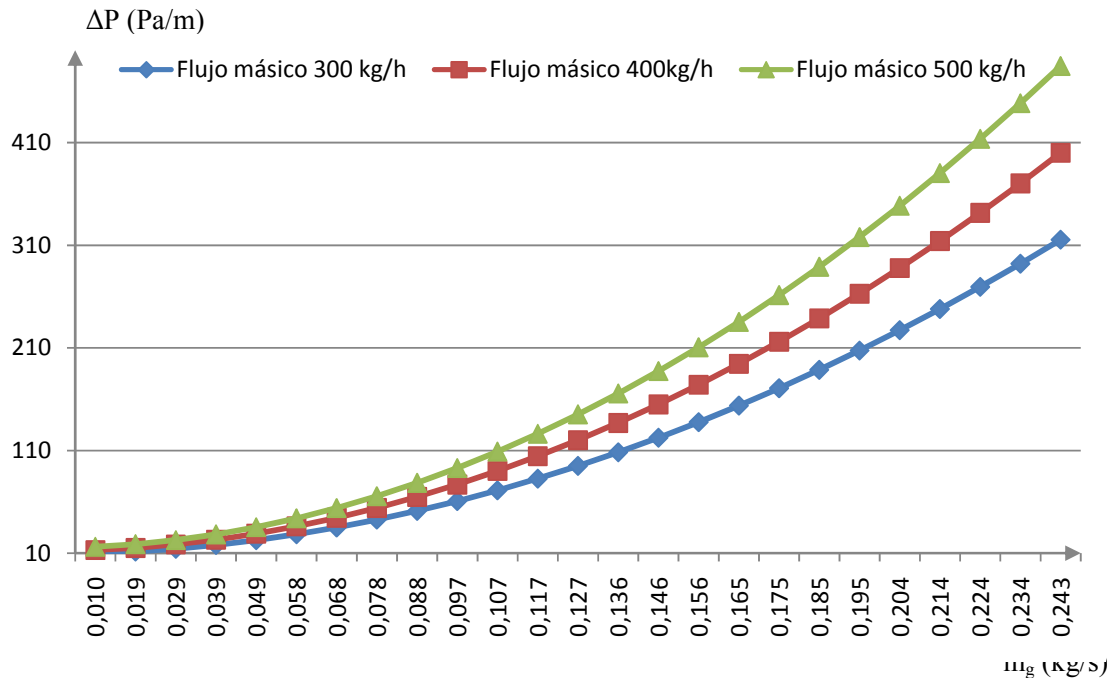


Figura 3.6. Comportamiento de las pérdidas de presión en el transporte neumático vertical de los granos clasificados de cacao para granulometría  $d_s=10\text{mm}$

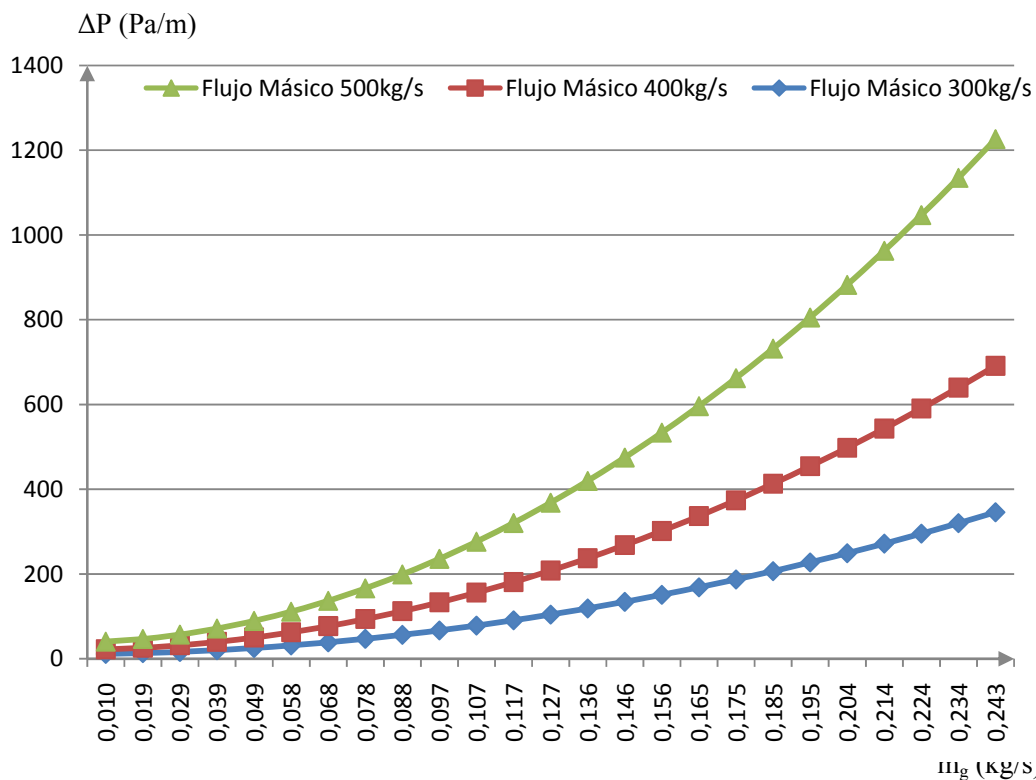


Figura 3.7. Comportamiento de las pérdidas de presión en el transporte neumático vertical de los granos clasificados de cacao para granulometría  $d_s=6\text{mm}$

### 3.3. Resultados del cálculo de las pérdidas de presión en codos para el transporte neumático de los granos de cacao.

Datos de entrada

$G_m, Q_a, D, d_s, R, A, \Delta Y, \Delta_{OT}, \rho_g, \rho_s, V_g$

$$Re = \frac{V_g \cdot D}{\nu} \quad R_f = \frac{V_f \cdot d_p}{\nu}$$

$$\xi = 0,051 + 0,19 \cdot \left( \frac{D}{R} \right) \quad F_r = \frac{V_g^2}{D \cdot g} \quad Fr_s = \frac{V_f^2}{d_s \cdot g} \quad \mu = \frac{G_m}{Q_a \cdot \rho_g}$$

$$\xi_s = A \cdot \left( \frac{R}{D} \right)^{0,5} \cdot Re^{0,1} \cdot Re_F^{0,35} \cdot \left( \frac{D}{ds} \right)^{0,2} \cdot F_{rs}^{-0,65} \cdot F_r^{0,35} \cdot \mu^{-1,09}$$

$$\Delta P = \xi \cdot \rho_g \cdot \frac{V_g^2}{2} \quad \Delta P_C = \Delta P + \Delta P_s \quad \Delta P_s = \xi_s \cdot \rho_s \cdot \frac{V_g^2}{2}$$

$$\beta_{da}^v = 1,55 \cdot 10^2 \cdot Re_f^{-0,15} \cdot \left( \frac{\rho_s}{\rho_g} \right)^{-0,45} \cdot \left( \frac{D}{ds} \right)^{-0,1} \cdot \mu^{2,59}$$

$$\Delta P_{CT} = \Delta P_C + \Delta P_d \quad \Delta P_d = \beta_{OT} \cdot \rho_g \cdot \frac{V_g^2}{2} \quad \beta_{OT} = 0,5 \cdot \Delta Y \cdot \Delta_{OT} \cdot \beta_{da}$$

**Figura 3.8. Algoritmo para el cálculo de las pérdidas en codos durante el transporte neumático de los granos de cacao.**

En la figura 3.8 se expone el algoritmo para el cálculo de las pérdidas de presión en codos, se observa la dependencia de múltiples factores incluyendo la posición geométrica del codo que

incluye (Horizontal- Horizontal, Horizontal –Vertical). Los resultados obtenidos para la granulometría de 15 mm y posición H-H se muestran en la figura 3.9, en ella se observa el incremento de las pérdidas con el flujo másico de gas y la concentración de la mezcla, de forma similar se obtienen los resultados para las restantes configuraciones y granulometrías de los granos de Cacao.

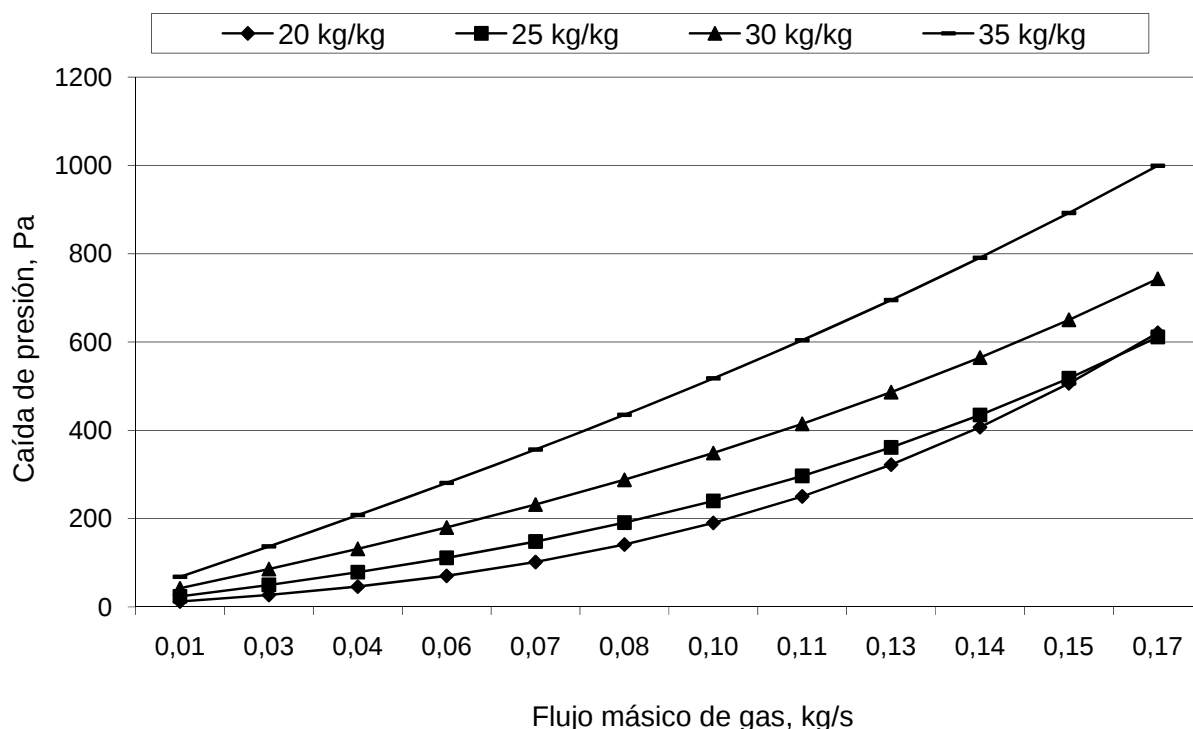


Figura 3.9. Comportamiento de las pérdidas de presión en un codo Horizontal-Horizontal en el transporte neumático de los granos clasificados de cacao para granulometría  $d_s=15\text{mm}$

### 3.4. 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 este 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 es obtenida.

### **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.

#### *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.

### Costo energético

Para estimar las zonas de trabajo racionales, el consumo energético de los sistemas de transporte neumático de la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi” y establecer una comparación con el consumo actual se simulan las características de transporte, 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 de esclusa. 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:

$$N = 177 \cdot M_g \cdot \ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \quad (3.1)$$

Donde:

$N$  – Demanda de potencia; kW.

$M_g$  - Flujo másico de aire; kg/s.

$P_1$  - Presión de entrada; bar<sub>abs</sub>

$P_2$  . Presión de salida; bar<sub>abs</sub>

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 de cacao en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”. Se puede predecir el comportamiento de cualquier modificación o ampliación que se quiera realizar en estos sistemas y otras empresas similares.

En las figuras 3.10 – 3.12 se simula el comportamiento de la potencia consumida en función del flujo másico de gas para diferentes flujos másico de sólidos con el uso de los granos de cacao clasificados (sistema 1). Se observa la tendencia al incremento del consumo con el aumento del flujo másico de gas y por tanto de la cantidad de material transportado. Este crecimiento se limita por las características de transporte en dependencia de los parámetros conjuntos del alimentador de aire y el sistema. De forma similar se obtiene el comportamiento para los restantes sistemas, el material tostado y triturado respectivamente.

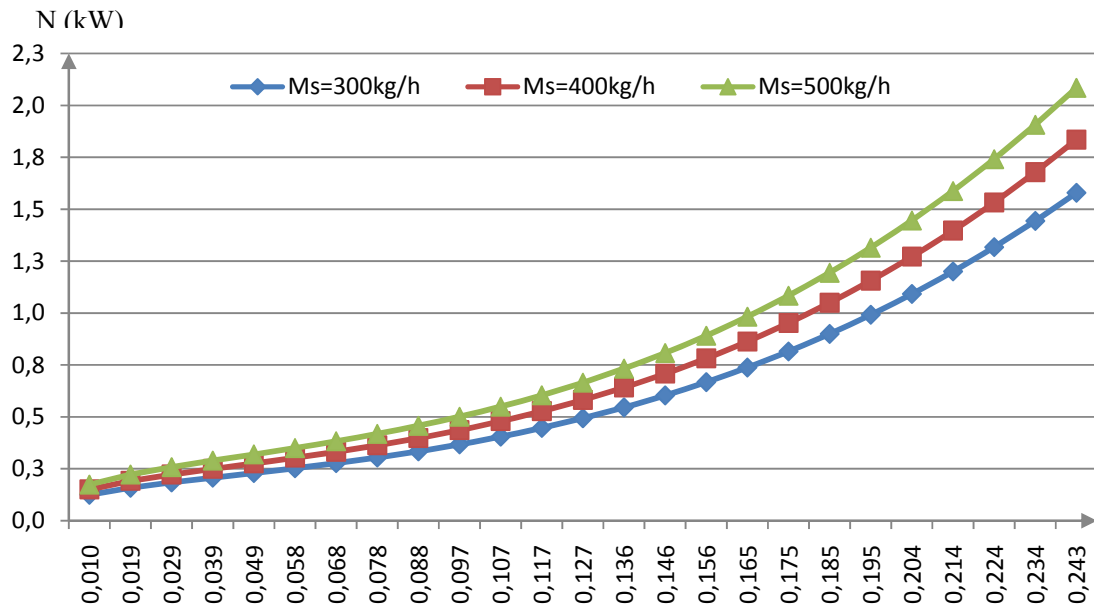


Figura 3.9. Comportamiento de la potencia consumida en función del flujo másico de gas en el transporte neumático de los granos clasificados de cacao y granulometría de 15mm.

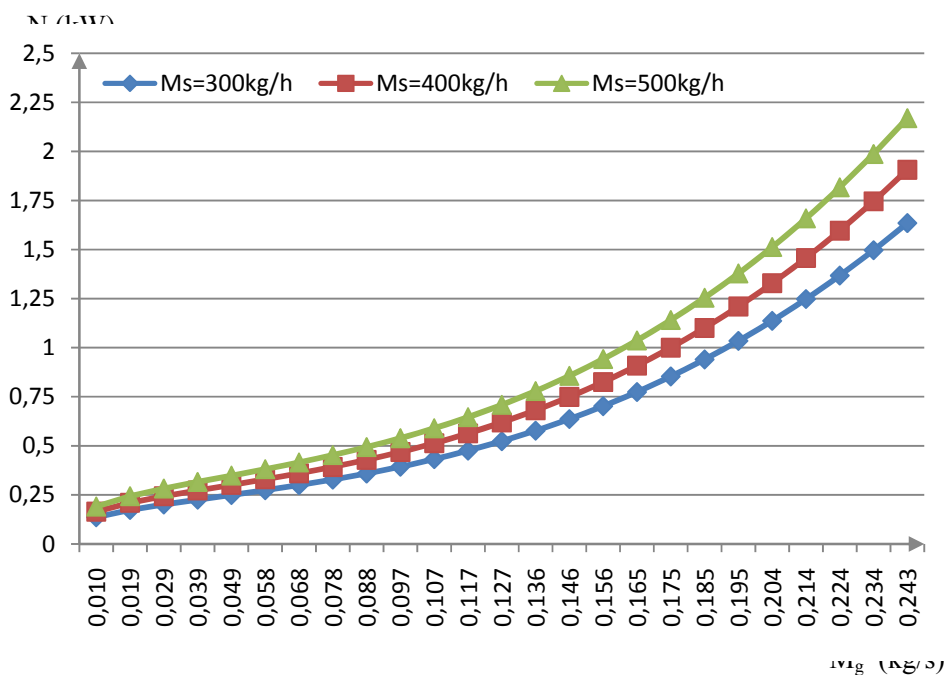


Figura 3.10. Comportamiento de la potencia consumida en función del flujo másico de gas en el transporte neumático de los granos clasificados de cacao y granulometría de 10mm.

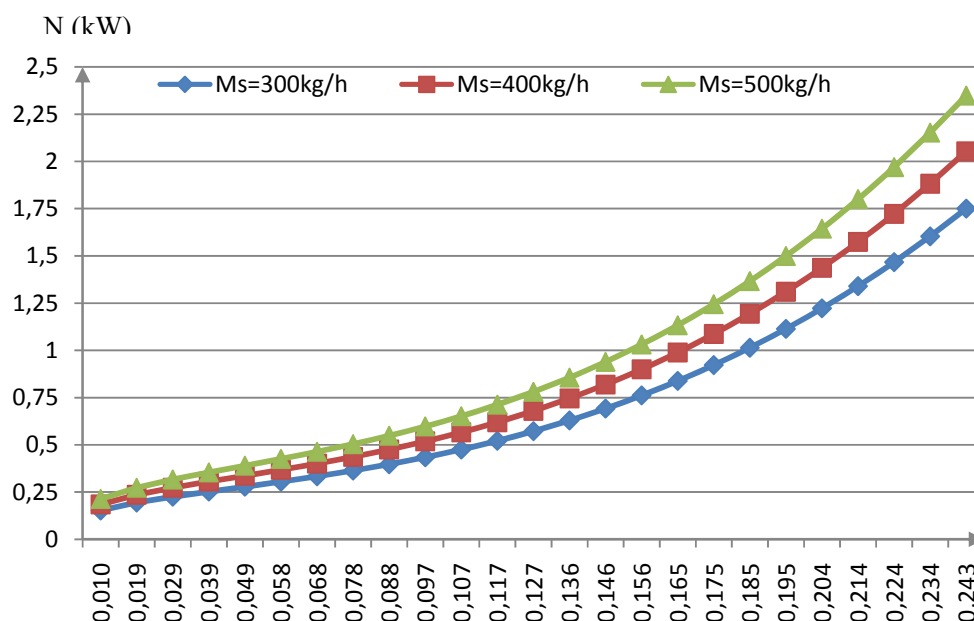


Figura 3.11. Comportamiento de la potencia consumida en función del flujo másico de gas en el transporte neumático de los granos clasificados de cacao y granulometría de 6mm.

### 3.5. Comparación entre los parámetros calculados y los medidos en la instalación de transporte neumático de la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”

En la tabla (3.1) se expresan los parámetros actuales de trabajo de los sistemas de transporte neumático de los granos clasificados, tostados y triturados de la empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”, estos se obtienen a través de mediciones directas en diferentes períodos de tiempo. Se indica que para transportar los 450 kg/h el consumo de potencia es de 0,67 kW para los granos clasificados y tostados y 0.45 kW para los triturados. La velocidad de transporte oscila entre los 12 y 16 m/s en todos los casos.

En la tabla (3.2) se exponen los resultados luego del análisis de las curvas de comportamiento usando el algoritmo propuesto para obtener la zona racional de transporte y evitar la obstrucción del sistema así como las pérdidas de material durante la operación de transporte. En la tabla se observa que con un incremento de la velocidad de transporte hasta los 18m/s en los granos clasificados y tostados y hasta 14m/s para los granos triturados se logra sobrepasar la zona de transporte inestable y evitar los problemas antes mencionados. El incremento en el consumo de potencia es prácticamente insignificante (0.15kW para los granos clasificados y tostados y 0.1

kW para los triturados) lo que se compensa con los beneficios que se reportan desde el punto de vista de pérdidas de material y continuas paradas por obstrucción del sistema.

**Tabla 3.1. Parámetros actuales de trabajo de los sistemas de transporte neumático de la empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”**

| <b>Parámetros y dimensiones</b>        | <b>Granos clasificados</b> | <b>Granos tostados</b> | <b>Granos triturados</b> |
|----------------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|
| Velocidad de transporte                | 16 m/s                     | 16 m/s                 | 12 m/s                   |
| Concentración de la mezcla             | 13,8 kg/kg                 | 13,8 kg/ kg            | 14,5 kg/kg               |
| Diámetro interior de la tubería        | 100 mm                     | 100 mm                 | 100 mm                   |
| Presión a la entrada del sistema       | 20 kPa                     | 20 kPa                 | 20 kPa                   |
| Consumo de potencia para mover el aire | 0,67 kW                    | 0,67 kW                | 0,45 kW                  |
| Cantidad de material transportado      | 400 kg/h                   | 400 kg/h               | 400 kg/h                 |
| Consumo de aire                        | 424 m <sup>3</sup> /h      | 424m <sup>3</sup> /h   | 339 m <sup>3</sup> /h    |

**Tabla 3.2. Parámetros propuestos de los sistemas de transporte neumático de la empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi”**

| <b>Parámetros y dimensiones</b>        | <b>Granos clasificados</b> | <b>Granos tostados</b> | <b>Granos triturados</b> |
|----------------------------------------|----------------------------|------------------------|--------------------------|
| Velocidad de transporte                | 18 m/s                     | 18 m/s                 | 14 m/s                   |
| Concentración de la mezcla             | 12,9 kg/kg                 | 12,9 kg/ kg            | 13,7 kg/kg               |
| Diámetro interior de la tubería        | 100 mm                     | 100 mm                 | 100 mm                   |
| Presión a la entrada del sistema       | 20 kPa                     | 20 kPa                 | 20 kPa                   |
| Consumo de potencia para mover el aire | 0,82 kW                    | 0,82 kW                | 0,55 kW                  |
| Cantidad de material transportado      | 400 kg/h                   | 400 kg/h               | 400 kg/h                 |
| Consumo de aire                        | 508 m <sup>3</sup> /h      | 508m <sup>3</sup> /h   | 396 m <sup>3</sup> /h    |

### 3.5. Conclusiones del capítulo 3

- La zona de tránsito entre las fases fluida y densa en el transporte neumático de los granos clasificados y tostados de cacao de la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Odeí” oscila entre (0.136 - 0.165) kg/s, a partir de las mismas comienza un incremento de las pérdidas que depende del diámetro de las partículas, la velocidad del gas y la concentración de la mezcla. Para los granos triturados la zona de cambio se encuentra entre (0.088 y 0.107) kg/s.
- La experimentación en las instalaciones de transporte indica que para transportar los 450 kg/h de material, el consumo de potencia es de 0,67 kW para los granos clasificados y tostados y 0.45 kW para los triturados. La velocidad de transporte oscila entre los 12 y 16 m/s en todos los casos.
- El análisis teórico – experimental demuestra que para evitar las obstrucciones en el sistema y las pérdidas de material se debe establecer una velocidad de transporte superior a los 18 m/s para los materiales clasificados y tostados y 14 m/s para los triturados. El incremento en el consumo de potencia es prácticamente insignificante (0.15kW para los granos clasificados y tostados y 0.1 kW para los triturados).

## CONCLUSIONES

1. El análisis de los trabajos precedentes muestra suficiente información especializada para la solución de la tarea, ello se compendia en textos básicos y publicaciones en revistas que resumen los aspectos esenciales de los procesos de transporte neumático del cacao y otros materiales.
2. Los granos de cacao constituyen un sistema polidiserso con predominio de tamaño inferiores a los 18mm para los granos gruesos y 10 mm para los granos finos, forma esférica y un contenido de humedad inferior al 7.4%. La densidad real es inferior a  $897\text{kg/m}^3$  y la aparente de la mezcla de materiales no sobrepasa los  $775\text{kg/m}^3$ . La velocidad de flotación es inferior a 12.4 m/s para los mayores diámetros presente en las muestras.
3. La zona de tránsito entre las fases fluida y densa en el transporte neumático de los granos clasificados y tostados de cacao de la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi” oscila entre (0.136 - 0.165) kg/s, a partir de las mismas comienza un incremento de las pérdidas que depende del diámetro de las partículas, la velocidad del gas y la concentración de la mezcla. Para los granos triturados la zona de cambio se encuentra entre (0.088 y 0.107) kg/s.
4. La experimentación en las instalaciones de transporte indica que para transportar los 450 kg/h de material, el consumo de potencia es de 0,67 kW para los granos clasificados y tostados y 0.45 kW para los triturados. La velocidad de transporte oscila entre los 12 y 16 m/s en todos los casos.
5. El análisis teórico – experimental demuestra que para evitar las obstrucciones en el sistema y las pérdidas de material se debe establecer una velocidad de transporte superior a los 18 m/s para los materiales clasificados y tostados y 14 m/s para los triturados. El incremento en el consumo de potencia es prácticamente insignificante (0.15kW para los granos clasificados y tostados y 0.1 kW para los triturados).



## RECOMENDACIONES

1. Aplicar los resultados obtenidos en la Empresa Bolivariana de Producción Socialista “Cacao Oderi, se debe tomar en consideración las velocidades de cambio de fases (diluta y densa) para evitar obstrucción en el sistema.
2. Realizar las correcciones necesarias al algoritmo de cálculo una vez que sea aplicado en la entidad productiva para los parámetros de explotación en condiciones industriales no contemplados en este trabajo.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Alberti, E (2007). Advanced Design of Pneumatic Conveying Systems. Bulk solids handling. 11(1): 103 – 110.
2. Álvarez C. (2007). Caracterización física y química de almendras de cacao fermentadas, secas y tostadas cultivadas en Venezuela. Agronomía tropical. Venezuela.
3. Arnold, P.C; P.W. Wipych (2007). The development of pneumatic conveying in Australia. Bulk solids handling .11(1): 85 - 91.
4. Aróstegui, J. M (1978). Metodología del Conocimiento Científico. La Habana: Editorial de Ciencias Sociales. 445 p.
5. Beckett S. T. (1994), Fabricación y utilización industrial del chocolate, Editorial Acribia., Págs. 22 – 29.
6. Bradley, M (2007). Pressure losses caused by bends in pneumatic conveying pipelines. Powder handling processing. 2(4).
7. Bradley, R. L. (2003). Moisture and Total Solids Analysis. In: Nielsen SS editor. Food Analysis. 3rd ed. Hardcover, USA: Springer. 119-40 p.
8. Braudeau, J. (1970). El cacao. Técnicas agrícolas y producciones tropicales. 1º Edic., Edit. Blume. Barcelona, España. 297 p.
9. Crawley, M; J. Bell (2008). The application of life cycle cost analysis to pneumatic conveying systems. <http://www.macawber.com>. July.
10. Darren, T (2009). Pneumatic conveying, basic design and component options. <http://www.Powderandbulk.com>. July.
11. Dynamic Air (2008). The basics of pneumatic conveying. <http://www.dynamicair.com/pdf/9515-2-pdf>. July.
12. Farnish R (2008). Wear in lean – phase pneumatic conveying pipelines. <http://www.powderanbulk.com>. September.
13. Fitzgerald S (1996). 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. 140p.
14. Giusti, L (1986). The morphology, mineralogy and behaviour of fine grained gold from placer deposits of Alberta. Can. J. Earth SCI. 23: 1 – 8.

15. Guzman D (2001). Modelación, simulación y control del tanque de contacto y los enfriadores de licor en el proceso de lixiviación carbonato amoniacal. Tesis doctoral. ISMMANJ, Moa, Cuba. 124p.
16. Hayes, J; A. R. Reed; M. S. Bradley (2004). Economics of pneumatic conveying systems. Powder handling processing. 5(1): 1 – 5.
17. Hettiaratchi, K; S. Woodhead (2006). Comparison between pressure drop in horizontal and vertical pneumatic conveying pipelines. Powder technology, 95: 67 – 73.
18. Hui L; Y. Tomita (2008). “A Numerical Simulation of Swirling Flow Pneumatic Conveying in a Horizontal Pipeline”. Particulate Science & Technology. 18 (4): 275 – 292.
19. Huttli T; J. Hernando; C. H. Ribeiro; C. Wagner (2009). 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.
20. INIAP (2006). Memoria del taller: Calidad física y organoléptica del cacao (teoría y práctica). Quevedo.
21. Lampinen, M (1991). Calculation Methods for Determining the pressure Loss of Twophase Pipe Flow and Ejectors in Pneumatic Conveying Systems. Acta polytechnica scandinavica. Mechanical Engineering series No 99.
22. Lesme J. R (1996). Modelación del movimiento de las partículas y pérdidas en codos durante el transporte neumático del bagazo. Tesis doctoral. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba.. 112p.
23. Mason, D. A (2007). Levy. A simulation system for pneumatic conveying systems. Powder Technology. 95 (1): 7 – 14.
24. Mesarovich, M (1996). Fundamentación de la Teoría General de los Sistemas. Editorial MIR. URSS, pp. 422-436.
25. Miyoshi, A; T. Kawaguchi; T. Tanaka; Y. Tsuji (2008). "Effect of Pulsation Frequency and Bed Height on Granular Flow Pattern in Two-Dimensional Pulsating Fluidized Bed". Proc. of Asian Symp. on Multiphase Flow 2008 (ASMF'08), Takatsuki, Japan: 13 -18.
26. Neidigh S (2007). Introduction to the theoretical and practical principles of pneumatic conveying. <http://www.porttechnology.org/journals/ed12/pdfs/pt12-235.pdf>. November.



27. Pacheco Berlot, P (1984). Ecuaciones para el diseño de instalaciones a transporte neumático por tuberías verticales de materiales polvorientos, granulados, polimorfos y polidispersos. Tesis doctoral. Universidad de Oriente, Santiago de Cuba. 120p.
28. Pan, R; P. Wypych (2008). Scale – up procedures for pneumatic conveying design. Powder handling processing. 4(2): 167 – 172.
29. Papadakis, S. E. (2004). Scale – up of cascading rotatory dryers. Drying Technology. 12: 259 – 279.
30. Paul, S. What is Dense Phase Conveying? (2008). <http://www.powderandbulk.com>. March.
31. Raheman, H; V. K. Jindal (2007). Slip velocity in pneumatic conveying of agricultural grains. Powder technology. 5 (1): 60 - 67.
32. Reed, R; Bradley, M (2006). Advances in the Design of Pneumatic Conveying Systems. Bulk solids handling. 11(1): 93 – 98.
33. Reyes, H. (2000). El cacao en Venezuela. Moderna Tecnología para su cultivo. Edit. Chocolates El Rey, Caracas, Venezuela. 270 p.
34. Rodes, M (2007). Pneumatic Transport of Powders. <http://www.erpt.org>. October.
35. Singer T (2008). You too, can select a pneumatic conveying system. <http://www.powderandbulk.com>. September.
36. Tanaka, T; Y. Yamamoto (2006). "LES of Gas-Particle Turbulent Channel Flow," Proc. of the 2006 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Vancouver, Canada: 1 - 5.
37. Taylor, T (2005). Specific energy consumption and particle attrition in pneumatic conveying. Powder Technology. 95(1): 1-6.
38. Torres, E (2002). Características físicas y aerodinámica del mineral laterítico utilizado en los sistemas de transporte neumático de la industria del níquel. Memorias de la tercera conferencia internacional CINAREM 2002. Moa, Holguín.
39. Torres, E (2003). Modelación matemática y simulación del transporte neumático del mineral laterítico en fases fluida y densa. Tesis Doctoral. Moa, Holguín, Cuba.
40. Tsuji Y (2007). Activities in discrete particle simulation in Japan. Powder technology. 113: 278 – 286.
41. Weber, M (2008). Friction of the Air and the Air/Solid Mixture in Pneumatic Conveying. Bulk solids handling. 11(1): 99 – 102.



42. Wypych, P; P. Arnold (2006). Plug – Phase Pneumatic Transportation of Bulk Solids and the importance of Blow Tank Air injection. Powder handling processing. 1(3): 271 – 275.
43. Yamamoto, Y; T. Tanaka; Y. Tsuji (2005). "Effect of Spatial Resolution of LES on Particle Motion," Proc. of FEDSM'98, Washington DC, USA.
44. Yonemura, S; T. Tanaka; Y. Tsuji (2005). "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.

**ANEXOS**

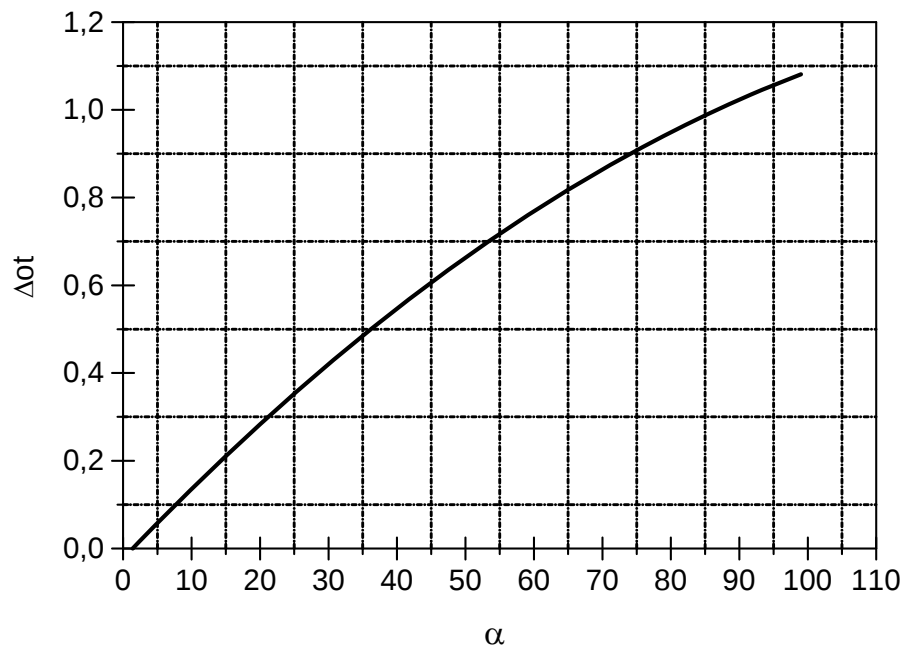


Figura 1. Coeficiente que tiene en cuenta la disminución de las pérdidas por curvatura con la reducción del ángulo.

Fuente: R. Lesme Jaén, 1996.

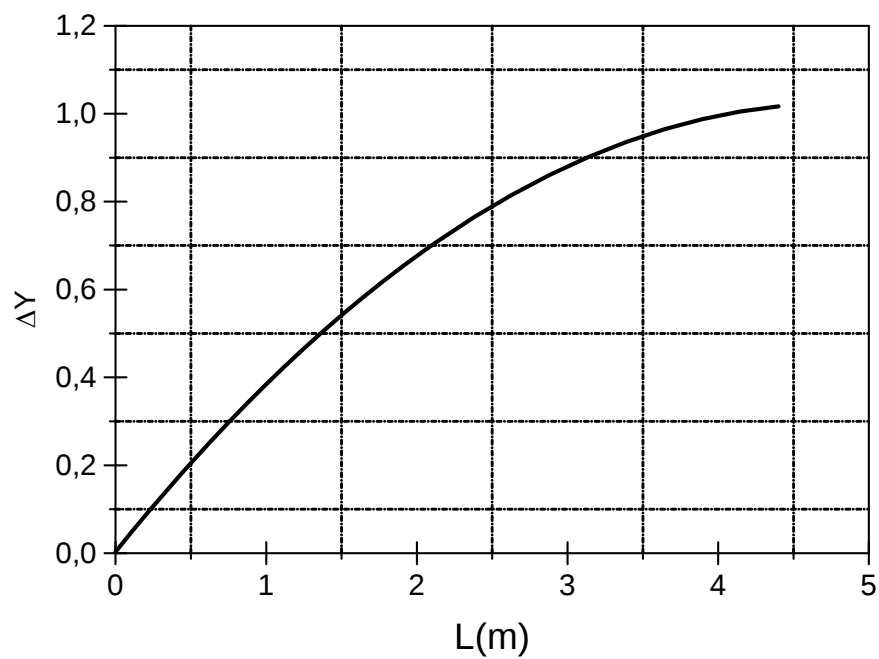


Figura 2. Coeficiente experimental de la longitud recta del codo

Fuente: R. Lesme Jaén, 1996.