

# Simulación del transporte neumático del mineral laterítico en fase densa

Enrique Torres Tamayo<sup>1</sup> [etorrest@ismm.edu.cu](mailto:etorrest@ismm.edu.cu)  
Ángel Oscar Columbié Navarro<sup>1</sup> [acolumbie@ismm.edu.cu](mailto:acolumbie@ismm.edu.cu)  
Yoalbys Retirado Mediaceja<sup>1</sup> [yretirado@ismm.edu.cu](mailto:yretirado@ismm.edu.cu)  
Alexander Machado Noa<sup>2</sup> [anoa@ecg.moa.minbas.cu](mailto:anoa@ecg.moa.minbas.cu)

## Resumen

El transporte neumático en las empresas cubanas del níquel, aunque presenta índices ecológicos superiores a otros transportadores mecánicos, ha visto limitado su empleo por su excesivo gasto de energía. La simulación de los sistemas de transporte neumático empleando los modelos teórico – experimentales permitió predecir las zonas de menor consumo energético y con ello realizar la correcta selección y explotación de los sistemas de transporte, con el considerable ahorro energético para la empresa. Se construyeron las características de transporte y se estableció la zona de trabajo racional a partir de consideraciones esenciales sobre el consumo de energía. Los resultados de la investigación predicen que el incremento de la concentración de la mezcla desde 12,8 hasta 30 kg/kg, permite reducir el consumo específico de energía en 13,45 MJ/T. Si se considera la productividad actual de sólido, el consumo total de energía se reduce en 3 012 kW-h.

## Palabras clave

Consumo energético, simulación, transporte neumático, mineral laterítico.

---

Recibido: febrero 2009 / Aceptado: junio 2009

<sup>1</sup> Instituto Superior Minero Metalúrgico, Las Coloradas s/n, Moa, Holguín, Cuba

<sup>2</sup> Empresa Ernesto Che Guevara.

## Simulation of pneumatic conveying system for dense lateritic ore

### Abstract

Although the existing pneumatic conveying systems in Cuban nickel industries are more environmentally friendly than other mechanic conveying equipment, their use has been restricted due to excessive energy consumption. With the simulation of the pneumatic conveying system through theoretical and experimental models it was possible to anticipate the areas of lower energy consumption so as to make a correct selection and use of the conveying system; which translates into significant energy savings for the company. The characteristics of conveyors and the working area for their rational operation were identified based on essential considerations on power consumption. According to the results of the research, an increase in the mixture concentration to 30 kg/kg from 12.8 is expected to reduce the specific energy consumption by 13,45 MJ/T. Assuming current solid productivity, the overall energy consumption will be reduced by 3 012 kW-h.

### Key words

energy consumption, simulation, pneumatic conveying system, lateritic mineral.

## INTRODUCCIÓN

El transporte neumático por sus múltiples ventajas constituye uno de los medios más avanzados de transporte de sólidos, ampliamente utilizado a nivel mundial. En Cuba este tipo de transporte se emplea en la industria del níquel y en menor medida en la de cemento, harina, entre otras (Torres, 2003).

En las empresas del níquel de tecnología carbonato amoniacal, aunque el transporte neumático presenta índices ecológicos superiores a otros transportadores mecánicos, su empleo se ha visto limitado por su excesivo gasto de energía, que asciende a los 18,82 MJ/T. Entre las causas que originan tales gastos se pueden mencionar la incorrecta selección de la velocidad del gas transportador, la existencia de los alimentadores sinfín y la 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 este ámbito (Torres, 2003; Torres & Retirado, 2007).

La simulación de los sistemas de transporte neumático empleando los modelos teórico-experimentales permite predecir las zonas de menor consumo energético, y con ello, hacer una correcta selección y explotación de los sistemas de transporte, con un considerable ahorro energético para la empresa (Rodes, 2001).

Numerosos artículos publicados abordan la simulación de sistemas de transporte neumático, entre ellos merece destacarse 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 & Tomita, 2000). Otro es el de Huttli *et al.* (2007) en el que hacen un análisis de la trayectoria de las partículas por medio de la simulación directa; estos métodos también son utilizados por Yamamoto *et al.* (1998); Tanaka & Yamamoto (1997); Miyoshi *et al.* (1999), entre otros. Un razonamiento diferente exponen Raheman & Jindal (1993), quienes determinan la velocidad de deslizamiento, que no es más que la

diferencia existente entre las velocidades del gas y del material en el transporte de fluidos bifásicos gas-sólido.

Mason *et al.* (1998) desarrollan la simulación de los sistemas de transporte neumático con el fin de incrementar la flexibilidad de los métodos de diseño. Esta tarea es dividida en dos partes: la predicción del punto de operación del sistema y la influencia de las componentes individuales de la tubería en el flujo.

En los últimos años, se han incrementado las investigaciones relacionadas con la simulación del transporte neumático de diversos materiales, la mayoría de los autores (Lampinen, 2005; Paul, 2006; Rodes, 2001; Farnish, 2007; Singer, 2007) distinguen dos fases fundamentales: la fluida o diluta y la densa. En esta última se hacen diferentes clasificaciones, siendo la de Rodes (2001), la más completa (Figura 1):

1. Flujo en fase densa continua, donde el sólido ocupa la parte inferior de la tubería horizontal. Aquí el transporte requiere de altas presiones del gas y es limitado a distancias menores de un kilómetro.
2. 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.

La zona de menor consumo energético corresponde con los menores valores de pérdidas de presión, en la explotación de los sistemas de transporte neumático es conveniente trabajar en valores cercanos a la fase densa continua para evitar la obstrucción del sistema y garantizar el transporte de los sólidos con los menores gastos energéticos.

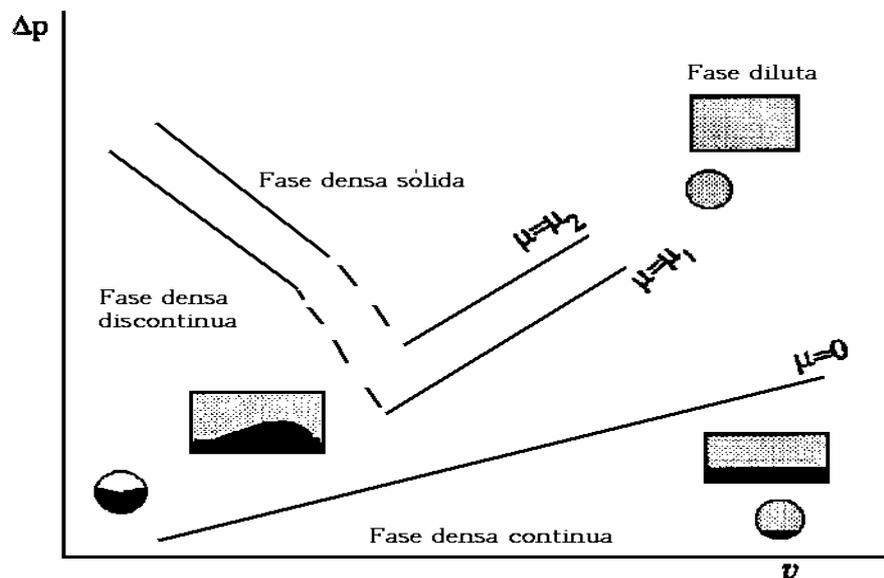


Figura 1. Fases presentes en el transporte neumático de materiales (Tomado de Rodes, 2001).

### MATERIAL Y MÉTODO

El desarrollo del modelo teórico para el transporte neumático del mineral laterítico en fases fluida y densa en tuberías horizontales y verticales se elaboró a partir del uso simultáneo de las ecuaciones de balance de masa, de momentum y de energía (Torres & Retirado, 2007).

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

La expresión (1) constituye la ecuación del modelo teórico para el cálculo de las pérdidas de presión en el transporte neumático del mineral laterítico en tuberías en fase densa. En ella es necesario identificar dos parámetros: la velocidad del sólido y la velocidad de flotación de las partículas. Ambos constituyen una función de la longitud de la tubería (Torres & Retirado, 2007). La simplificación de esta expresión en tramos horizontales y verticales se plantea en las ecuaciones (2) y (3).

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

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

$$\left[ -1 + \frac{\varepsilon \cdot \rho_G \cdot V_g^2}{P} + \frac{1}{2} \cdot \varepsilon \cdot \rho_G \cdot \mu \cdot \frac{V_g \cdot (V_g + V_s)}{P} \right] \frac{dP}{dx} = \frac{\lambda_G \cdot \varepsilon \cdot \rho_G \cdot V_g^2}{2 \cdot D} + \varepsilon \cdot \rho_G \cdot g \cdot \left( 1 + \mu \cdot \frac{V_g}{V_s} \right) + \mu \cdot \varepsilon \cdot \rho_G \cdot \frac{V_g}{V_s} \cdot \frac{0,1625}{D} \cdot V_s^2 \quad (3)$$

La simulación del transporte neumático de la ECG se realizó a partir de los valores de los parámetros del modelo característicos para el mineral laterítico (velocidad de flotación y velocidad relativa entre el gas y el sólido, Tabla 1), las ecuaciones 1, 2 y 3 y las expresiones de enlace (Torres & Retirado, 2007). Se comparó el comportamiento de los parámetros actuales y los obtenidos a través de la simulación. Posteriormente, se construyeron las características de transporte y se estableció la zona de trabajo racional a partir de consideraciones esenciales sobre el consumo de energía.

Tabla 1. Valores de velocidad relativa y velocidad de sustentación para los diferentes diámetros de partículas

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

En ECG existen tres grupos de sistemas de transporte neumático (Tabla 2), a saber:

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

Tabla 2. Características de los sistemas de transporte neumático de la ECG

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

## RESULTADOS

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

En las Figuras 2 y 3 se muestra la existencia de valores de velocidad del gas para los que las pérdidas de presión son mínimas. Esta zona coincide con el tránsito entre la fase densa y la fase fluida. A partir de estos valores, las pérdidas de presión aumentan con el incremento de la velocidad del gas y se produce una rápida reducción de la concentración de la mezcla.

En tuberías horizontales el valor promedio de la velocidad de transporte a saltos es 6,12 m/s y para tuberías verticales la velocidad de choque es 5,21 m/s, de lo que se deriva que en un sistema combinado es necesario escoger la velocidad mínima a partir del límite establecido de la velocidad de transporte a saltos en tuberías horizontales.

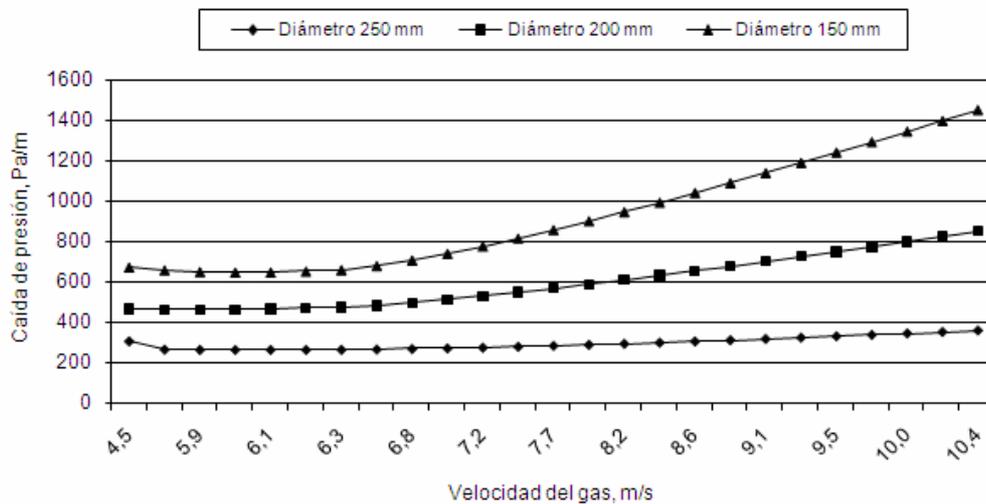


Figura 2. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas para tuberías horizontales y Ms=100 T/h.

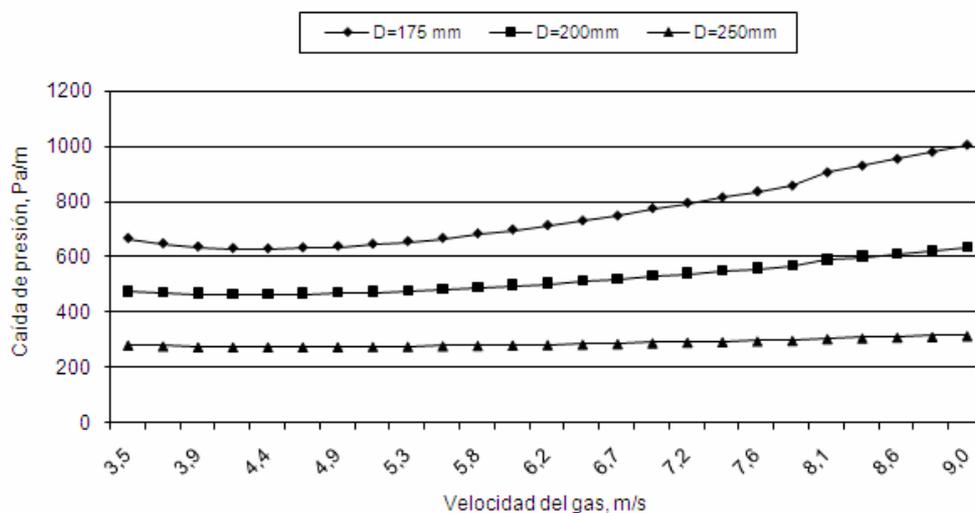


Figura 3. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas para tuberías verticales y Ms=100 T/h.

### Simulación de las características de transporte en tuberías horizontales y verticales

Para observar la interrelación entre los parámetros que intervienen en el transporte neumático del mineral laterítico y obtener la información necesaria sobre el comportamiento de las variables, es necesario simular las características de transporte, para ello se utiliza el modelo

matemático en tuberías horizontales y verticales, así como las ecuaciones de las pérdidas en accesorios (Torres, 2003).

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

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

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

En las características de transporte se expone el comportamiento del flujo másico de sólido en función del flujo másico de gas y la caída de presión necesaria para transportar el material a diferentes concentraciones. Ellas se simulan para tuberías horizontales, verticales y codos. Para tuberías horizontales este comportamiento se observa en las Figuras 4 y 5, en ellas está presente una zona de trabajo racional de los sistemas de transporte neumático desplazada hacia la izquierda de las figuras donde se alcanzan los mayores valores de concentración y las menores pérdidas de presión.

Con el aumento de la concentración de la mezcla crece el flujo másico de sólido transportado, pero ello va acompañado del incremento de la caída de presión en el sistema, por lo que para la selección de los parámetros racionales, además de trabajar con las gráficas de las características de transporte, es necesario considerar el consumo específico de energía.

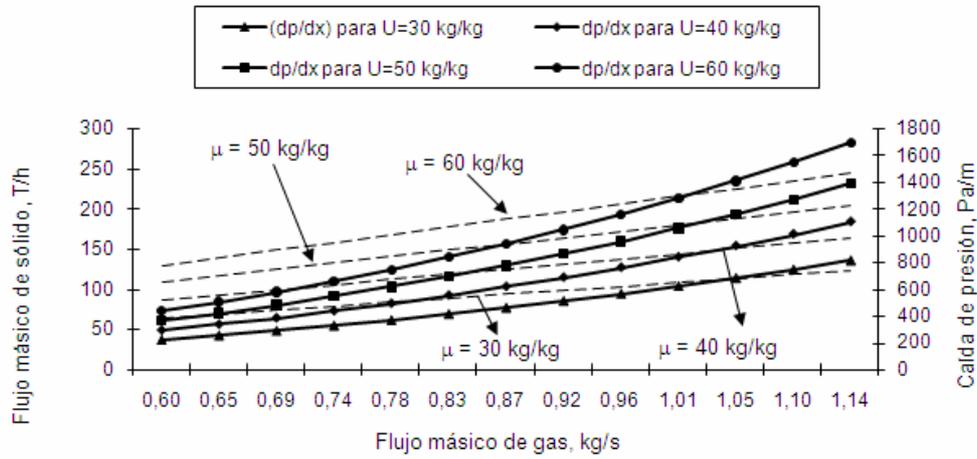


Figura 4. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en tuberías horizontales y D = 250 mm.

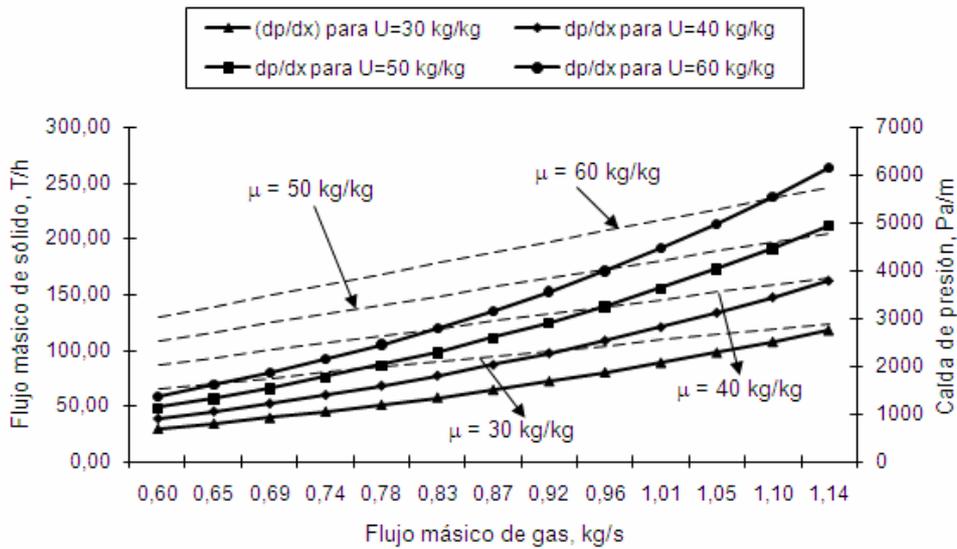


Figura 5. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en tuberías horizontales y D = 200 mm.

De forma similar, la simulación de las características de transporte para tuberías verticales y diferentes diámetros de la tubería se exponen en las Figuras 6 y 7.

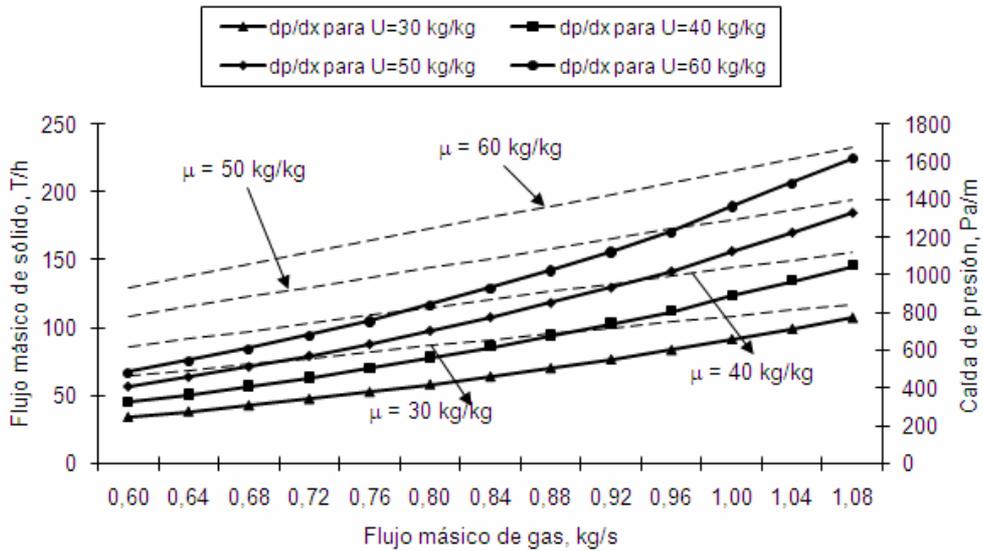


Figura 6. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en tuberías verticales y D = 250 mm.

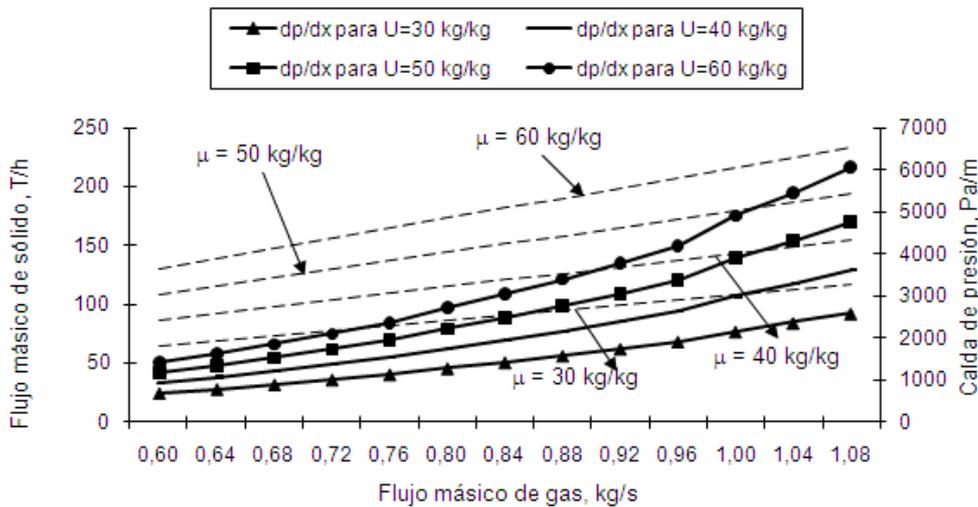


Figura 7. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en tuberías verticales y D = 200 mm.

Las características de transporte en tuberías horizontales y verticales se simulan para un amplio rango de flujo másico de sólido, desde 65 hasta 230 T/h. Los resultados (Figuras 4 a la 7) revelan que independientemente de la orientación de la tubería, con el incremento del flujo másico de gas se incrementa el gradiente de presión necesario para transportar el material. Esto sucede hasta la zona de

tránsito entre la fase densa y fluida donde ocurre lo contrario. Las menores caídas de presión ocurren para un diámetro de 250mm.

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

**Simulación de las pérdidas en codos**

Para el análisis de las pérdidas en codos en los sistemas de ECG se emplearon las ecuaciones obtenidas por Torres (2003) en su tesis doctoral, la simulación del comportamiento de estas pérdidas en tres posiciones diferentes: horizontal - horizontal (H – H), horizontal – vertical (H – V) y vertical – horizontal (V – H) se observan en las Figuras 8, 9 y 10.

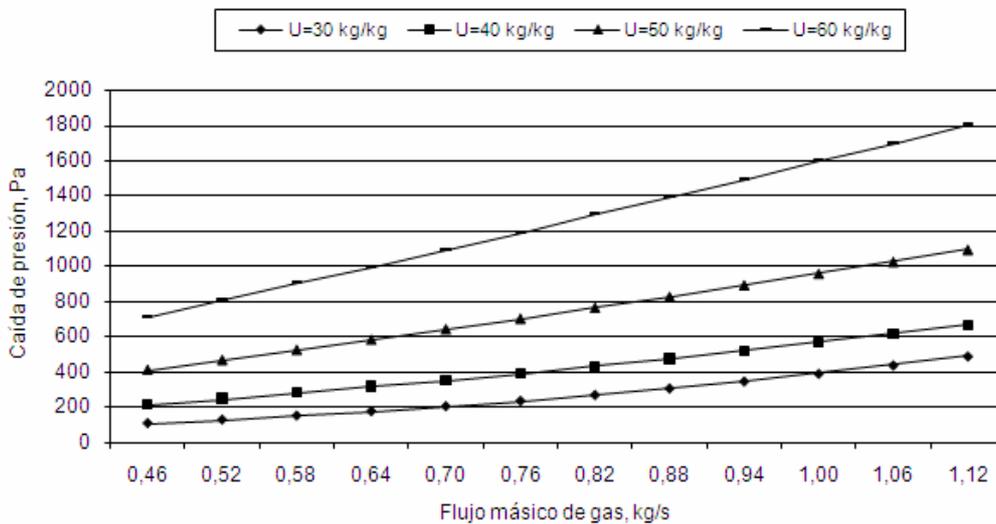


Figura 8. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en codo horizontal – horizontal.

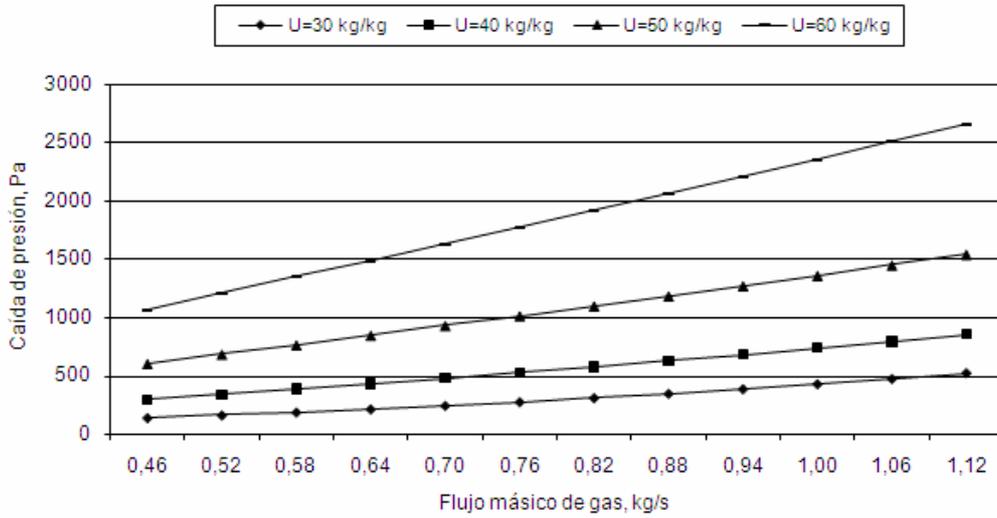


Figura 9. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en codo vertical – horizontal

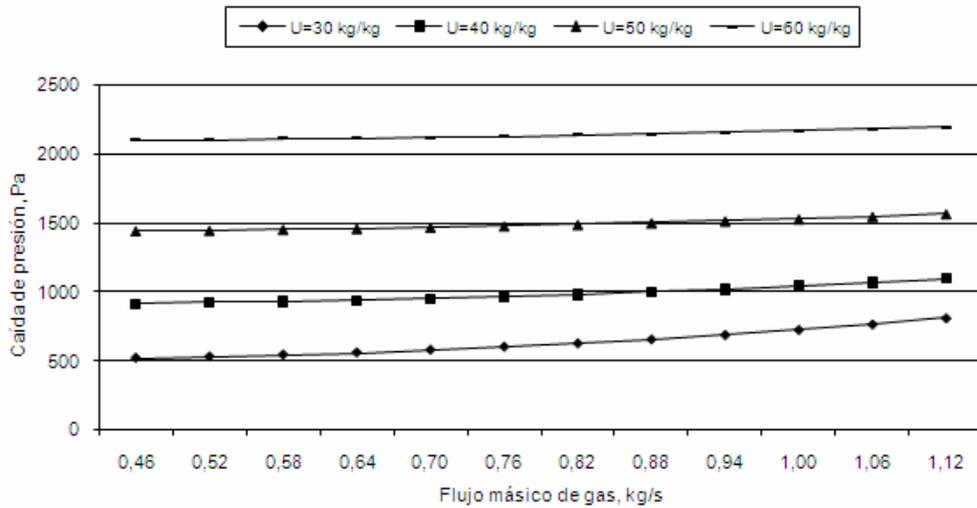


Figura 10. Comportamiento de la caída de presión en función de la velocidad del gas en codo horizontal – vertical.

Los resultados graficados (Figuras 8 a 10) muestran un incremento de las pérdidas en función del flujo másico de gas y la concentración de la mezcla; los valores de concentración se encuentran en los rangos en que se transporta el material a escala industrial.

**Simulación de las características de transporte de los sistemas generales**

Para examinar el comportamiento total del sistema mediante la interrelación de los parámetros de cada uno de los elementos, se construyeron las características de transporte que incluyen de forma integrada las pérdidas en tramos horizontales, verticales y codos. En estos últimos se tiene en cuenta la zona dispersa y de dispersión del material, se incluye además las pérdidas en la alimentación del material. Los efectos del estudio para un diámetro de tuberías de 250 mm se exponen en las Figuras 11, 12 y 13. En las características de transporte se interrelacionan los parámetros fundamentales de un sistema, ellos son: Flujo másico de gas, flujo másico de sólidos, caída de presión y concentración de la mezcla. Se revela el incremento de la caída de presión con la concentración de la mezcla y el flujo másico de gas. En las zonas inferiores a 0,7 kg/s se producen las menores pérdidas de presión, estando éstas por debajo de los  $3 \cdot 10^5$  Pa. Los valores de flujo másico de sólidos alcanzan las 120 T/h, lo que permite transportar la cantidad de material necesaria en cada etapa del proceso.

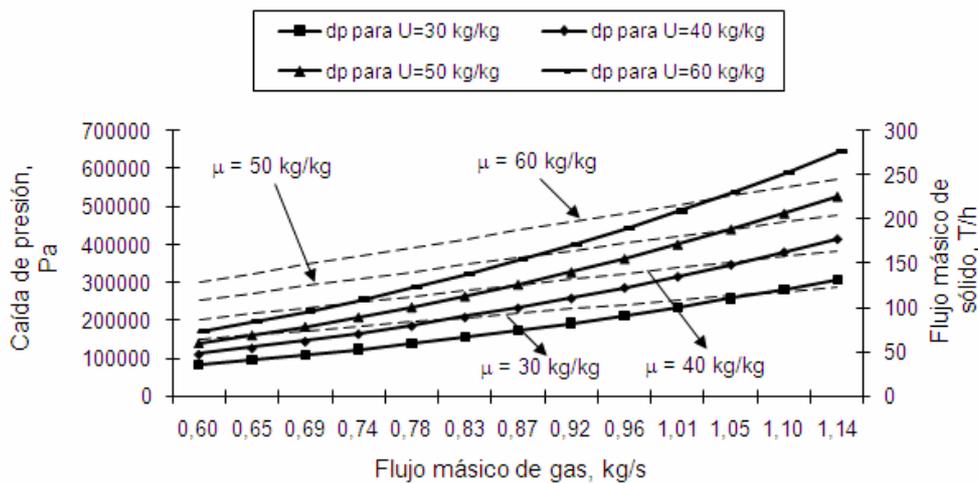


Figura 11. Característica de transporte neumático del mineral laterítico para el sistema 1 y D=250 mm.

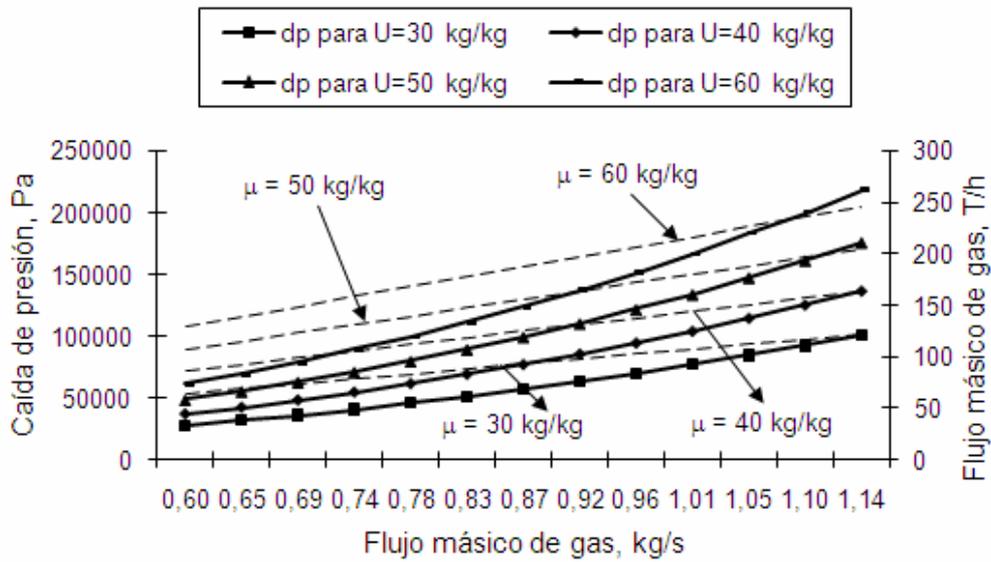


Figura 12. Característica de transporte neumático del mineral laterítico para el sistema 2 y D=250 mm.

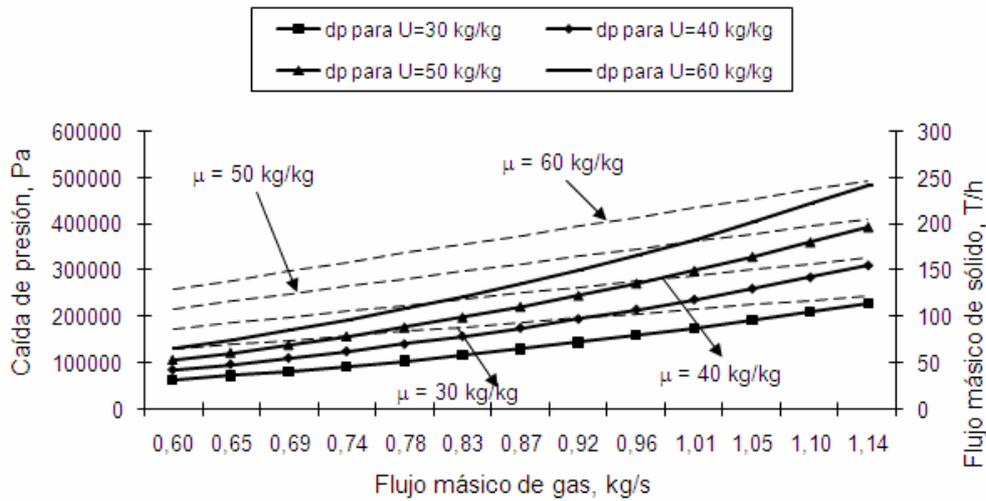


Figura 13. Característica de transporte neumático del mineral laterítico para el sistema 3 y D=250 mm

Las Figuras 14, 15 y 16 muestran la simulación de las características de transporte de los sistemas para un diámetro de tuberías de 200mm. Se revela la tendencia a la reducción de la caída de presión en las zonas de flujo másico de gas inferior a los 0,7 kg/s donde el material comienza la tendencia a trasladarse en fase densa continua. Los valores de flujo másico en la zona de menores consumos es posible escogerlos dentro

de los requeridos por el proceso de reducción del mineral (100 – 120 T/h por cada sistema).

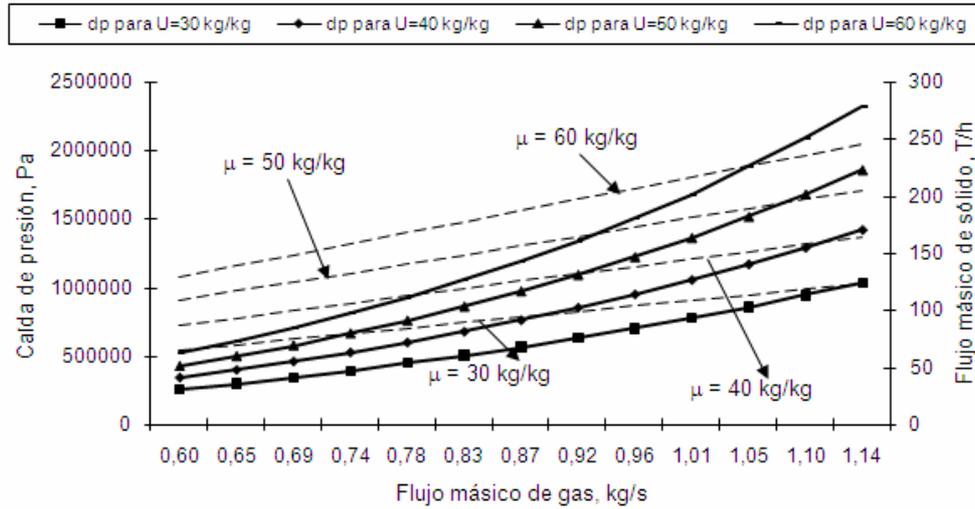


Figura 14. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en la empresa ECG para el sistema 1 y D = 200 mm.

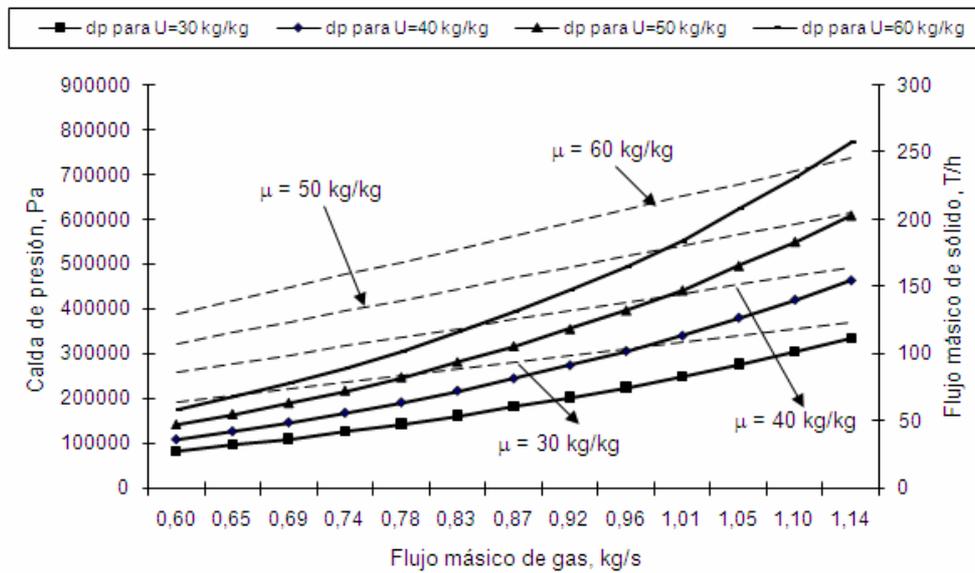


Figura 15. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en la empresa ECG para el sistema 2 y D = 200 mm.

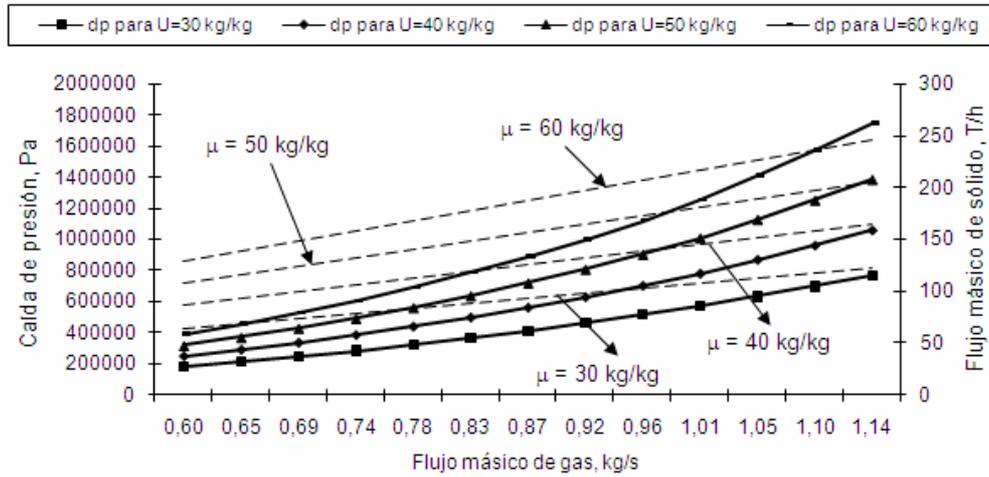


Figura 16. Característica de transporte neumático del mineral laterítico en la empresa ECG para el sistema 3 y D = 200 mm.

**Costo energético**

Los consumos energéticos se concentran fundamentalmente en el alimentador de aire y en el alimentador sinfín. Si se consideran las pérdidas de presión en la cámara de alimentación y en el separador, la demanda de potencia se estima a partir de la siguiente expresión (Rodes, 2001):

$$N = 177 \cdot M_g \cdot Ln\left(\frac{P_1}{P_2}\right) \tag{4}$$

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 neumático del mineral laterítico en la ECG.

Los resultados de la simulación del comportamiento del consumo específico de energía en función de la concentración de la mezcla para los tres sistemas se muestra en las Figuras 17, 18 y 19. Se observa la tendencia a la reducción del consumo con el aumento de la concentración de la mezcla y por tanto de la cantidad de material transportado. Este crecimiento de la concentración se limita por las características de transporte en dependencia de los parámetros conjuntos del alimentador de aire y el sistema. Los valores de consumo se encuentran entre 2,23 MJ/T y 14,55 MJ/T, este último para los menores valores de concentración de la mezcla bifásica gas - sólido (10 – 20 kg /kg ).

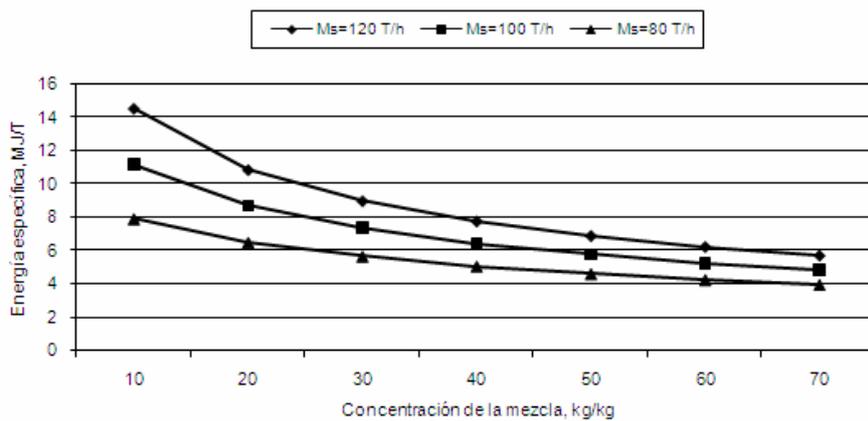


Figura 17. Simulación del comportamiento del consumo de energía específica en función de la concentración de la mezcla para el sistema 1.

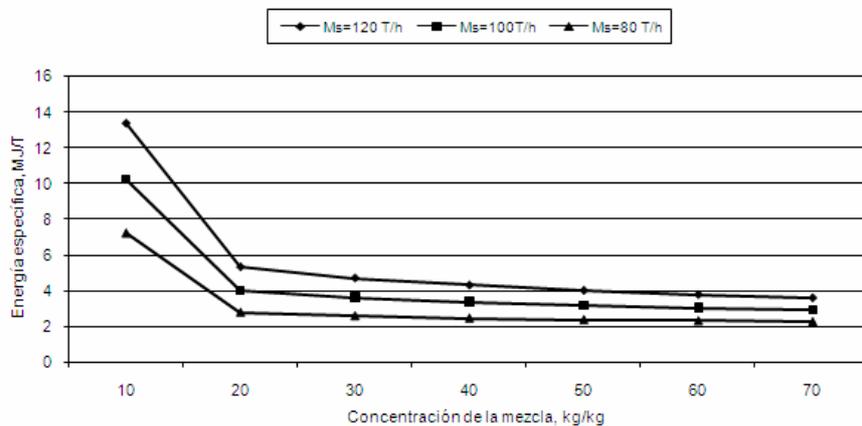


Figura 18. Simulación del comportamiento del consumo de energía específica en función de la concentración de la mezcla para el sistema 2.

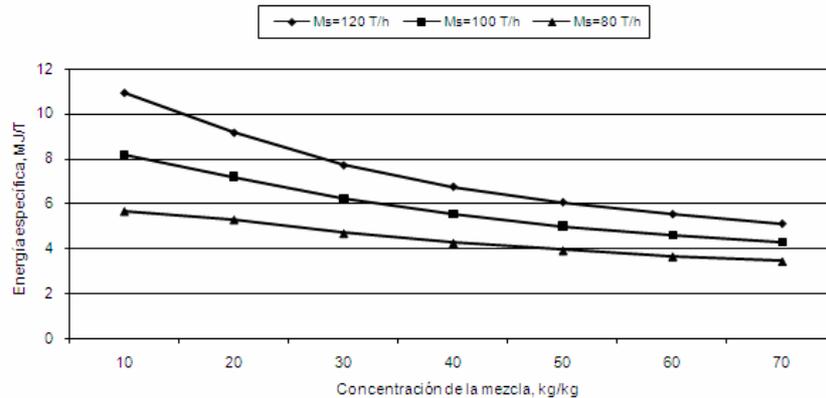


Figura 19. Simulación del comportamiento del consumo de energía específica en función de la concentración de la mezcla para el sistema 3.

**Comparación entre los parámetros actuales y los simulados de los sistemas de transporte neumático**

La Tabla 3 muestra los parámetros actuales de trabajo de los sistemas de transporte neumático de la ECG, estos se obtuvieron a través de mediciones directas en diferentes períodos de tiempo en varios trabajos de diploma. Se indica que para transportar las 1 160 T/h se utilizan como promedio 15 sistemas independientes de transporte neumático con un consumo de potencia de 5 520 kW. El consumo de aire es de 72 956 m<sup>3</sup>/h efectuándose el transporte a una concentración de 15,9 kg/m<sup>3</sup> de aire.

Tabla 3. Parámetros actuales de trabajo de los sistemas de transporte neumático

Parámetros y dimensiones	Sistema 1	Sistema 2	Sistema 3
Velocidad de transporte	24,92 m/s	26,11 m/s	26,11 m/s
Concentración de la mezcla	12,8 kg/kg	12,8 kg/ kg	12,8 kg/kg
Diámetro interior de la tubería	250 mm	250 mm	250 mm
Presión a la entrada del sistema (abs)	3.3 x 105 Pa	3.5 x 105 Pa	3.5 x 105 Pa
Consumo de potencia para mover el aire y accionar los alimentadores sinfín.	5 520 kW		
Cantidad de material transportado	280 T/h	440 T/h	440 T/h
Consumo de aire	17 610 m3/h	27 673 m3/h	27 673 m3/h
Consumo específico de energía	18,82 MJ/T		

La Tabla 4 expone los parámetros simulados a partir del modelo para una concentración de 30 kg /kg, en ella se observa que el consumo de potencia del alimentador de aire después de considerar el consumo para mantener la presión en toda la línea, el aire de control y de limpieza de filtros se ahorran 3 012 kW-h, para ello es necesario el cambio de tecnología mediante el uso de las cámaras de alimentación e incrementar la concentración de la mezcla desde 12,8 kg/kg hasta 30 kg/kg. El consumo específico de energía disminuye desde 18,82 MJ/T hasta 5,37 MJ/T para el sistema.

Tabla 4. Parámetros simulados a partir del modelo para una concentración de 30 kg /kg .

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

Según la propuesta simulada solo son necesarios 13 sistemas para garantizar la misma cantidad de material transportado, con la posibilidad de trabajar algunos de ellos en régimen intermitente solamente en los momentos de mayor demanda del proceso. Los restantes parámetros del sistema se obtienen a partir de las

características de transporte y las gráficas de consumo específico de energía.

### CONCLUSIONES

Las curvas de transporte del mineral laterítico exponen la tendencia a la reducción de la caída de presión con el incremento de la velocidad del fluido en zonas inferiores a los 6,12 m/s en el transporte horizontal y 5,21 m/s en el vertical. El transporte en fase densa continua se extiende hasta los 18 m/s, aproximadamente, en ambos casos.

La simulación realizada permitió predecir una variante racional de transporte con los siguientes parámetros: flujo másico de 94 T/h, concentración de la mezcla de 30 kg/kg y diámetro de tubería de 250mm en los tres sistemas fundamentales de la ECG. Los resultados obtenidos permiten predecir el comportamiento en cualquier otro régimen de explotación.

La simulación de los sistemas de transporte neumático confirma la posibilidad de reducir la demanda de energía específica y de potencia. Para un incremento de la concentración de la mezcla hasta 30 kg/kg y el cambio de tecnología en el sistema de alimentación, el consumo específico de energía se reduce en 13,45 MJ/T y el de potencia en 3 012 kW-h.

### REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- FARNISH, R. 2007. Wear in lean-phase pneumatic conveying pipelines. <http://www.powderanbuk.com>.
- HUI, L. & TOMITA, Y. 2000. Particle Velocity and Concentration characteristics in a Horizontal Dilute Swirling Flow Pneumatic Conveying. *Power Technology* 107 (2): 144–152.
- HUTTLE, T.; HERNANDO, J.; RIBEIRO, C. H. & WAGNER, C. 2007. 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>.

- LAMPINEN, M. 2005. 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.
- MASON, D; MARJANOVIC, P. & LEVY, A. 1998. A simulation system for pneumatic conveying Systems. *Powder Technology* 95 (1): 7–14.
- MIYOSHI, A; KAWAGUCHI, T.; TANAKA, T. & TSUJI, Y. 1999. Effect of Pulsation Frequency and Bed Height on Granular Flow Pattern in Two-Dimensional Pulsating Fluidized Bed. Proc. of Asian Symp. on Multiphase Flow 1999 (ASMF'99), Takatsuki, Japan: 13-18.
- PAUL, S. 2006. What is Dense Phase Conveying?. <http://www.powderandbulk.com>.
- RAHEMAN, H & JINDAL, V. K. 1993. Slip velocity in pneumatic conveying of agricultural grains. *Powder technology* 5 (1): 60-67.
- RODES, M. 2001. Pneumatic Transport of Powders. <http://www.erpt.org>.
- SINGER, T. 2007. You too can select a pneumatic conveying system. <http://www.powderanbulk.com>.
- TANAKA, T. & YAMAMOTO, Y. 1997. LES of Gas-Particle Turbulent Channel Flow. Proc. of the 1997 ASME Fluids Engineering Division Summer Meeting, Vancouver, Canada: 1-5.
- TORRES, E. 2003. Modelación matemática y simulación del transporte neumático del mineral laterítico. [Instituto Superior Minero Metalúrgico]. Moa (Tesis doctoral) 100 p.
- TORRES, E. & RETIRADO, Y. 2007 (on line). Modelación matemática del transporte neumático del mineral laterítico en fase densa. *Minería y Geología* 23 (1) [www.ismm.edu.cu/revistamg](http://www.ismm.edu.cu/revistamg)
- YAMAMOTO, Y.; TANAKA, T. & TSUJI, Y. 1998. Effect of Spatial Resolution of LES on Particle Motion. Proc. of FEDSM'98, Washington DC, USA: 1–8.