

## DISEÑO DE UNA LÍNEA DE MOLIENDA DE CARBÓN MINERAL COMO ALTERNATIVA DE COMBUSTIBLE

### DESIGN OF A MINERAL COAL GRINDING LINE AS A FUEL ALTERNATIVE

Ph.D. Albert Miyer Suarez Castrillon<sup>a</sup>, Ing. Gabriel Eduardo Osorio Contreras<sup>b</sup>, Ph.D. Sir  
Alexci Suarez Castrillon<sup>c</sup>

<sup>a</sup> Universidad de Pamplona, Grupo de investigación GIMUP  
Ciudad Universitaria, Pamplona, Colombia, [albertmiyer@unipamplona.edu.co](mailto:albertmiyer@unipamplona.edu.co)

<sup>b</sup> Universidad de Pamplona, Grupo de investigación GIMUP  
Ciudad Universitaria, Pamplona, Colombia, [gabo.3112@gmail.com](mailto:gabo.3112@gmail.com)

<sup>c</sup> Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña, Grupo de investigación GRUCITE  
Via Acolsure, Sede el Algodonal, Ocaña, Colombia, [sasuarzc@ufpso.edu.co](mailto:sasuarezc@ufpso.edu.co)

**Fecha de recepción:** 18-07-2014

**Fecha de aprobación:** 30-11-2014

**Resumen:** El propósito de este artículo es presentar el diseño de una línea encargada de pulverizar el carbón para alimentar quemadores de los hornos de cerámica. Esta línea completa realiza la adecuada pulverización del carbón (tolva de carga, cajón alimentador, banda de transporte, molino de martillos, elevador de cangilones y silo de almacenamiento), así como también se propone un sistema para el transporte desde el silo de almacenamiento hasta una tolva receptora cerca a los hornos, la cual alimentara constantemente los equipos de quema (carbojets). Los resultados del diseño permiten mejorar la eficiencia de quemado del carbón, mejorar la salida de potencia y reducir las emisiones de gases peligrosos, con lo cual puede ser implantando en las plantas generadoras de energía eléctrica, plantas siderúrgicas, plantas cementeras y cualquier otra industria que aplique hornos de carbón.

**Palabras clave:** Molienda, automatización, carbón, instrumentación.

**Abstract:** The purpose of this article is to present the design of a line in charge of pulverizing the coal in order to feed the burners of the ceramics furnaces. This complete line performs the adequate coal pulverizing (loading hopper, feeding crate, transportation strip, hammers mill, buckets elevator and storage silo), as well as its purpose is a furnace, which will feed constantly the burning equipments (carbojets). The results of the design allow improving the coal burning efficiency, improving the exit of potency and decrease the emissions of dangerous gases, with which can be implanted in the electric energy generator plants, iron and steel plants, cement plants and any other industry that applies coal furnaces.

**Keywords:** Milling, automation, coal, instrumentation.

## 1. INTRODUCCIÓN

El 39,7% de la energía primaria se obtiene del petróleo, el 23,1% del gas natural y el 27,2% del carbón. Esto implica que el 90% de las necesidades mundiales de producción de energía se cubren a partir de transformaciones energéticas basadas en los combustibles fósiles. La energía nuclear cubre el 7,3% de la demanda mundial y la hidroeléctrica el 2,7%.

Estos datos de partida nos indican que el conocimiento de los procesos de transformación (generalmente por combustión) (Scott, 1995; Bradley & Andrew, 2010) de la energía química de los combustibles en calor y posteriormente en trabajo (generalmente a partir de ciclos termodinámicos) son procesos fundamentales para entender las necesidades energéticas del mundo actual y la tecnología energética en todos sus aspectos: diseño, mejora y evaluación económica de procesos y su impacto medioambiental (Dwiputra, Felani, Syahlan & Darmanto, 2012).

Uno de los problemas es el almacenamiento del carbón el cual con objeto de poseer reservas suficientes que permitan el funcionamiento normal de la instalación, ya que es difícil, por no decir imposible que el combustible llegue al mismo ritmo con que se consume, a este inconveniente debe añadirse, que si la instalación trabaja en forma continua, es necesario prever el consumo nocturno y el del fin de semana, así como las variaciones que se producen en el consumo a lo largo del periodo de funcionamiento. Debe analizarse también la seguridad de suministro y su uniformidad que depende fundamentalmente de la distancia y el medio de transporte, (ferrocarril, camión, cintas transportadoras, etc.), a lo que en ocasiones debe añadirse la

distribución local (Corripio & Smith, 2000; Baquero, Blandón & Molina, 2012; Carrasco, Grether, Suarez & Beltranini, 2006).

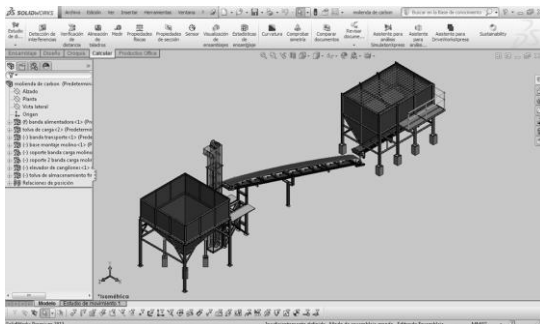
Es evidente que el coste del transporte puede llegar a ser una parte importante del coste total del combustible, motivo por el cual las grandes instalaciones consumidoras de carbón se ubican en las proximidades de las minas, con medios de comunicación adecuados, con lo que se consigue paliar en parte los efectos de las posibles irregularidades y costos del transporte. El tamaño de la planta, junto a razones económicas, define el grado de mecanización de la instalación. El movimiento de carbón, en plantas pequeñas se realiza mediante cintas transportadoras ó tornillos sin fin, tanto para la descarga de vehículos, como para el llenado de silos, con auxilio de la mano de obra necesaria. En plantas que consumen más de 10 t/día, es necesaria la mecanización total, constituida por una tolva de entrada, un elevador hacia el silo, y un alimentador del hogar; si además existe un molino de combustible, es necesario colocar un separador magnético. Considerando que el sistema de molienda es muy importante en una central y el polvo de carbón puede mejorar la eficiencia de quemado del carbón (Domingo, Arauzo, Gil & Iranzo, 2001; Sbarbaro, Ascencio, Espinoza, Mujica & Cortes, 2007), la salida de potencia y reducir las emisiones de gases peligrosos, etc. Como resultado, el molino de carbón y las tecnologías de procesamiento de polvo de carbón han ganado importancia en las plantas generadoras de energía eléctrica, plantas siderúrgicas, plantas cementeras y cualquier otra industria que aplique hornos de carbón tipo inyección (Alarcón & Ospina, 2009; Chica, Ospina & Bustamante, 2009; Iranzo, Domingo, Cortés & Arauzo, 2001).

El siguiente artículo contempla una línea completa para realizar la adecuada pulverización del carbón (tolva de carga, cajón alimentador, banda de transporte, molino de martillos, elevador de cangilones y silo de almacenamiento), así como también propone un sistema para el transporte de carbón desde el silo de almacenamiento hasta una tolva receptora cerca a los hornos, la cual alimentará constantemente los equipos de quema (carbojets).

## 2. METODOLOGÍA

### 2.1. Descripción del sistema de molienda

El sistema de molienda a diseñar está constituido por múltiples elementos (Figura 1), los cuales forman la línea completa; entre los cuales tenemos dos andas transportadoras, dos silos o tolvas de almacenamiento, un elevador de cangilones y un molino de martillos. A parte de los anteriores elementos, también se propone un sistema de transporte neumático en fase densa, el cual tendrá la función de llevar el carbón pulverizado desde el área de molienda hasta el área de los hornos y depositarlos en una tolva para su posterior alimentación a los hornos (Figura 2 y 3).



**Figura 1.** Sistema de molienda de carbón.  
**Fuente:** Elaboración propia.

**Figura 2.** Montaje.



**Fuente:** C.I. Cerámica La Española LTDA.

### 2.2. Descripción del sistema de molienda

Los materiales disponibles en ingeniería son muy numerosos y se distinguen fundamentalmente por su composición química, su estado (sólido, líquido, gas), su estructura (cristalina, amorfa), sus distintas fases, sus impurezas y la distribución de estos componentes. El diseño de máquinas se interesa fundamentalmente por los materiales sólidos que realizan funciones estructurales (soportar adecuadamente las tensiones y experimentar deformaciones controladas), funciones de guiado (deslizamiento y adherencia, resistencia a la abrasión) y otras funciones (contención de líquidos, protección, aspectos estéticos y relación con el usuario).



**Figura 3.** Montaje.  
**Fuente:** C.I. Cerámica La Española LTDA.

## Estudio de aceros:

- Tracción

Los cuáles se le realizaron a los siguientes aceros:

- Acero ASTM A36 Acero Estructural

Se realizó la selección de este acero gracias a su fácil adquisición en el sector fronterizo de Colombia y Venezuela su maquinabilidad, y costo, como también las óptimas propiedades al soldar.

## Análisis de tracción:

La máquina para el ensayo de tensión se debe mantener en buenas condiciones de operación, usarse sólo en el rango correcto de carga y calibrarse periódicamente de acuerdo con lo establecido en la última actualización de la norma ASTM E4.

Dimensiones de la probeta (Perfiles Estructurales): las dimensiones utilizadas para esta prueba son las estipuladas por la ASTM E8 para la probeta normalizada de dimensiones como podemos observar en la tabla 1:

Tabla 1. Dimensiones probeta 40 mm según norma ASTM E8.

Abreviatura	Dimensiones Estándar
G- Gage Length	200.0 ± 0.2 mm
W - Ancho (Width)	40.0 ± 2.0 mm
T- Espesor (Thickness)	
R - Radio (Radius)	25 mm
L - Longitud total (Overall Length)	450 mm
A - Longitud de la sección reducida (Length of reduced section)	225 mm
B - Longitud de la sección red (Length of grip section)	75 mm
C - Ancho de la zona de sujeción (Width of grip section)	50 mm

Fuente: Norma ASTM E8.

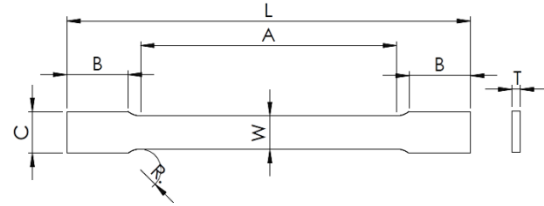


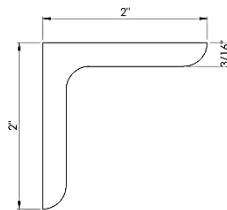
Figura 4. Probeta de sección rectangular.

Fuente: Norma ASTM E8.

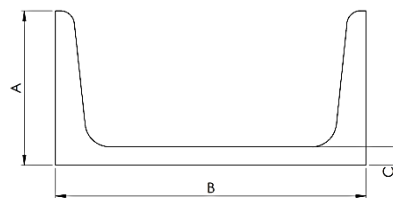
En el diseño de maquinaria se debe tener en cuenta un estudio de ingeniería detallado de las propiedades mecánicas de los materiales con los cuáles va ser construida, para este proyecto se realizaron pruebas de Tracción en aceros con bajo porcentaje de carbono.

Los perfiles estudiados fueron angular, IPN y UPN (Figura 4 y 5).

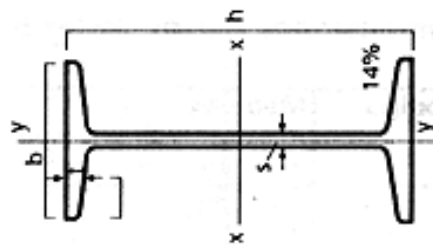
a) Perfil Angular



b) Perfil UPN



c) Perfil IPN



**Figura 5.** Perfiles de Acero ASTM A36 Estructural.

Fuente: Elaboración propia.

## CALCULOS PERTINENTES AL ENSAYO DE TRACCIÓN:

### Longitud calibrada (Li) y (Lf):

$$Li = 2 \text{ mm}$$

$$Lf = 5 \text{ mm}$$

- Calcular el  $\Delta L = Lf - Li$

### Porcentaje de alargamiento (L%)

Al tener calculada la longitud calibrada original antes del ensayo (Li), y luego del ensayo de tracción para obtener la longitud calibrada final (Lf) dada en la ecuación (1), se plantea el cálculo del porcentaje de alargamiento de la siguiente forma:

$$L\% = \left| \frac{Lf - Li}{Lf} * 100 \right| \quad (1)$$

### Reducción de Área y porcentaje de reducción de área

Se calcula el área de la sección transversal de la longitud calibrada antes del ensayo (Ao) dado en la ecuación (2) y luego de la fractura se unen ambas piezas como indica la norma, y se mide el área final en la fractura dentro de la longitud calibrada (Af) dada en la ecuación (3).

$$\Delta A = Ao - Af \quad (2)$$

Con estos valores se calcula el porcentaje de reducción de área (%RA)

$$\% RA = \frac{Ao - Af}{Ao} * 100 \quad (3)$$

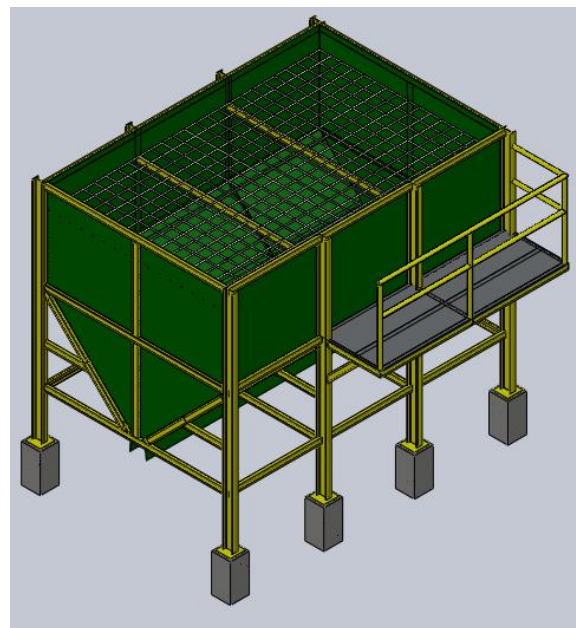
**Tabla 2.** Resultados Obtenidos de la prueba de tracción.

ASTM A36	Norma		Prueba
Grado	-		-
Limite Elástico (N/mm)	250	Mpa	265
Resistencia a la Tracción	400-550 Mpa		327
Alargamiento (Min)	8"	20 %	21.2%
	2"	23 %	22%

Fuente: Resultados Obtenidos Con el ensayo de Tracción Vs características Normalizadas ASTM A-36, Laboratorio de Materiales, Universidad de Pamplona.

## 3. RESULTADOS

### 3.1. Análisis estructural de la tolva de carga:



**Figura 6.** Tolva de carga de carbón.

Fuente: Elaboración propia.

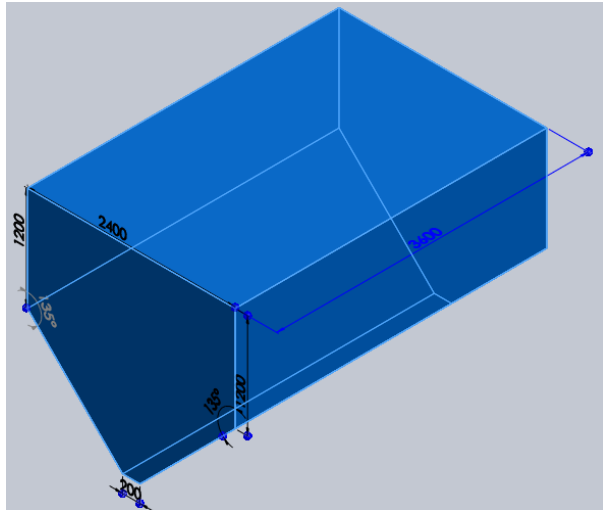
Para realizar el análisis de las fuerzas que actúan sobre la estructura de la tolva, determinamos la capacidad volumétrica de la misma con base en su geometría Figura 6. Una vez sabiendo su volumen y conociendo la densidad aparente del material a

almacenar procedemos a calcular la fuerza ejercida por este sobre la misma.

masa total del material que se va a almacenar.

**Cálculo de volumen tolva de carga:**

Masa de almacenamiento = Densidad carbón mineral \* Volumen tolva de carga. Dada en la ecuación (4).



$$m = Dc * Vt \tag{4}$$

$$m = 1000 \text{ Kg/m}^3 * 15,52 \text{ m}^3$$

$$m = 15520 \text{ Kg}$$

Fuerza (Peso) ejercido sobre la estructura = Masa de almacenamiento \* Gravedad. Dada en la ecuación (5)

$$f = m * g \tag{5}$$

$$f = 15520 \text{ Kg} * 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$f = 152000 \text{ N}$$

Como la estructura está conformada por cuatro cerchas (dos centrales y dos laterales), se divide esta fuerza entre 3 ya que las laterales soportan cada una la mitad del peso en comparación a las centrales:

Fuerza cercha = Fuerza ejercida sobre la estructura / 3. Dada en la ecuación (6).

$$F_c = f / 3 \tag{6}$$

$$F_c = 152000 \text{ N} / 3$$

$$F_c = 50666 \text{ N}$$

Figura 7. Geometría tolva de carga.

Fuente: Elaboración Propia.

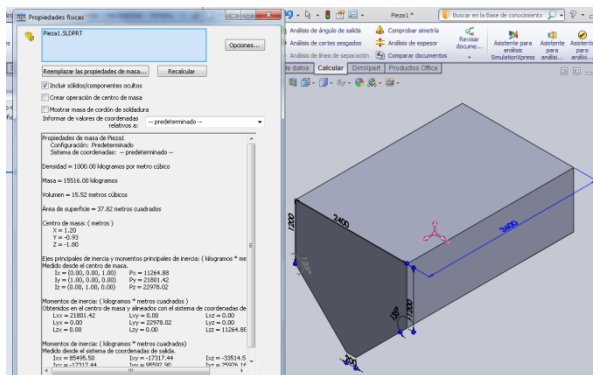


Figura 8. Herramienta propiedades físicas.

Fuente: Elaboración Propia.

Utilizando la herramienta propiedades físicas de Solidworks figura 7 y 8, se obtiene un cálculo del volumen de la tolva= **15,52 m³**.

Una vez conocido el volumen de almacenamiento, procedemos a calcular la

Con los datos anteriores y teniendo la geometría de las secciones procedemos a realizar el análisis de esfuerzos presentes en la estructura, para ello se utilizara el asistente para análisis de tensiones SimulationXpress de Solidworks:

## Calculo Elevador De Cangilones

Para realizar el cálculo del elevador de cangilones se tendrá en cuenta las siguientes características:

- Capacidad: 5 toneladas/hora
- Altura de elevación: 6,4 metros.
- Tipo de carga: dragado.
- Tipo de descarga: centrifuga.
- Granulometría: <3mm

Determinación del coeficiente de llenado: se entiende por coeficiente de llenado la relación entre el volumen ocupado por el material en el cangilón durante su transporte y el volumen total del cangilón. Para nuestro caso y según la tabla al carbón que es un material abrasivo se le asigna un coeficiente entre 0,7 y 0,8 (tabla 4).

### 3.2. Silo de almacenamiento

Calculo del volumen del silo:

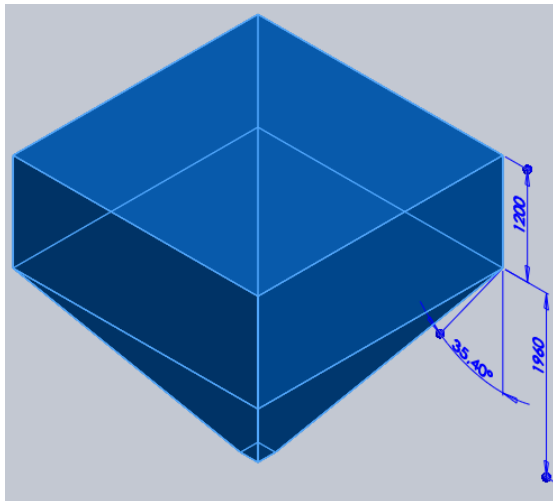


Figura 9. Herramienta propiedades físicas.

Fuente: Elaboración Propia.

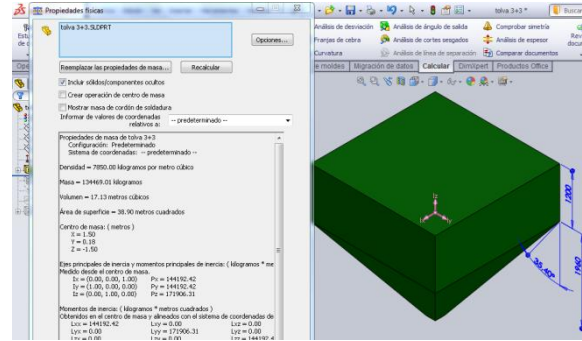


Figura 10. Geometría silo de almacenamiento.

Fuente: Elaboración Propia.

VOLUMEN DEL SILO:  $17,13 \text{ m}^3$

Masa de almacenamiento = Densidad carbón mineral \* Volumen tolva de carga

$$m = Dc * Vt$$

$$m = 1000 \text{ Kg/m}^3 * 17,13 \text{ m}^3$$

$$m = 17130 \text{ Kg}$$

Fuerza (Peso) ejercido sobre la estructura = Masa de almacenamiento \* Gravedad

$$f = m * g$$

$$f = 17130 \text{ Kg} * 9,81 \text{ m/s}^2$$

$$f = 171300 \text{ N}$$

Como la estructura está soportada por 8 vigas (4 centrales y 4 exteriores), se divide esta fuerza entre 8 ya que las laterales soportan cada una la mitad del peso en comparación a las centrales:

Fuerza viga = Fuerza ejercida sobre la estructura / 8. Dada en la ecuación (7)

$$Fs = f / 8 \quad (7)$$

$$Fs = 171300 \text{ N} / 8$$

$$Fs = 21412 \text{ N}$$

Con los datos anteriores y teniendo la geometría de las secciones procedemos a

realizar el análisis de esfuerzos presentes en la estructura, para ello se utilizara el asistente para análisis de tensiones SimulationXpress de Solidworks y le aplicamos la carga a un perfil IPN 140 de 3 metros de longitud (Figura 9 y 10).

### 3.3. El transporte neumático

Los sistemas de transporte neumático son básicamente muy simples y adecuados para el manejo de materiales en polvo o granulares en la industria. Los requisitos del sistema son una fuente de gas comprimido, normalmente aire, un dispositivo de alimentación, una tubería de transporte y un receptor para separar el material del aire de transporte.

El sistema es totalmente cerrado, y si se requiere, el sistema puede funcionar completamente sin partes móviles que estén en contacto con el material transportado. Es ideal para transportar materiales potencialmente explosivos utilizando gases inertes como el nitrógeno.

### 3.4. Flexibilidad

Con una elección adecuada y la disposición de los equipos, los materiales pueden ser transportados desde una tolva o silo en una ubicación a otra que este a determinada distancia. Puede ser alimentado desde uno o varios puntos o descargado en una o varias ubicaciones utilizando una sola línea de transporte.

Las tuberías pueden correr horizontalmente, así como verticalmente hacia arriba o hacia abajo. Las tasas de flujo de material se pueden controlar y monitorear fácilmente. Los sistemas de transporte neumático son

particularmente versátiles; ya que pueden manejar una amplia gama de materiales.

### 3.5. Equipos

Todos los sistemas de transporte neumático en fase densa usan un “blow tank”. Estos son equipos intermitentes que están sometidos a un ciclo de llenado de sólidos, presurización del recipiente y descarga; secuencia que generalmente está automatizada. Esto hace que el transporte en fase densa sea una operación discontinua debido a las grandes presiones que requiere, mientras que en fase diluida el transporte puede ser continuo gracias a las bajas presiones utilizadas y el uso de válvulas rotatorias.

Una alternativa para los sistemas en fase densa es la operación semi continua que se logra con el uso de dos “blow tank” en paralelo. Estos equipos pueden tener volúmenes que van desde los 30 litros hasta los 12 m3. Además pueden tener sistemas de fluidización para facilitar el flujo (Figura 11), aunque esto no es necesario (Figura 12).

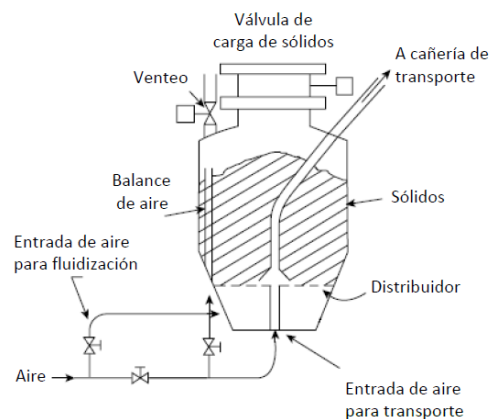


Figura 11. Blow tank con fluidización.



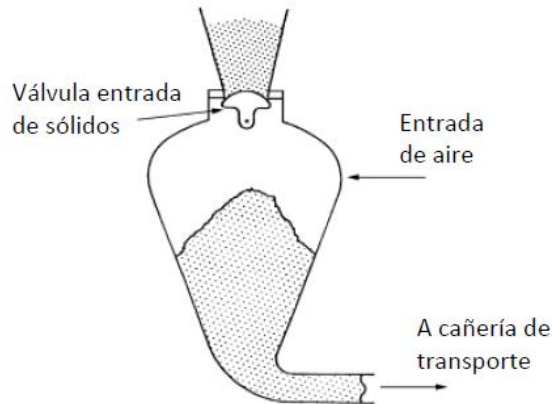


Figura 12. Blow tank sin fluidización

Fuente: ingeniería de operaciones físicas I.

En condiciones de fase densa los principales problemas son los ocasionados por el flujo tapón, los cuales pueden ser evitados de tres maneras diferentes: Detectando el tapón en el momento que se forma y actuando de una de las siguientes formas: Usando un sistema de by-pass en el cual la presión desarrollada detrás de un tapón cause que un mayor flujo de aire a través de la línea del by-pass y rompa el tampón desde su frente. Detectando el aumento de presión con una válvula activada por presión que permite el ingreso en la cañería de aire auxiliar para disminuir la longitud de los taponos. Formando taponos estables. Los materiales granulados forman taponos estables bajo ciertas condiciones, sin embargo para formar taponos estables de otros tipos de materiales es necesario inducir

Usando un cuchillo de aire para cortar la alimentación de sólidos en fase densa continua proveniente de un "blow tank"

### 3.6. Diseño para el transporte en fase densa

Mientras que los sistemas en fase diluida pueden ser diseñados a partir de principios teóricos (balance de cantidad de movimiento) junto con la ayuda de algunas correlaciones empíricas, el diseño de

sistemas en fase densa es básicamente empírico.

Aunque en teoría la ecuación para la caída de presión para flujo bifásico desarrollada anteriormente puede ser aplicada para fase densa, en la práctica esta es de poco uso.

Estos sistemas se diseñan en base a la experiencia previa junto con los resultados que se obtienen de estudios para cada material a transportar.

## 4. CONCLUSIONES

Colombia es uno de los países con más reservas de carbón en latinoamerica, sin embargo una de las desventajas es la contaminación, es por eso que el sistema brinda la posibilidad de cumplir con los estándares de regulación ambiental. Igualmente el costo es relativamente económico al compararlo con otros sistemas de energía, es por eso que el diseño de este sistema permite mejorar en ambos sentidos, con la posibilidad de ser implementado a nivel industrial.

## 5. FINANCIACIÓN

Los autores agradecen el apoyo financiero a la Universidad de Pamplona, por su valiosa colaboración; y a la Universidad Francisco de Paula Santander Ocaña y la División de Investigación y Extensión (DIE) por su apoyo económico.

## 6. BIBLIOGRAFÍA

Alarcón, O., & Ospina, A. M. (2009). Diseño de un Sistema de Control Multivariable para un Circuito de

- Molienda en Húmedo”. Universidad Nacional de Colombia.
- Scott, H. D. (1995). Coal pulverisers performance and safety. IAECR/79, London, UK. IEA Coal Research.
- Baquero, K., Blandón, A., Molina J. (2012). Analysis of the factors that affect in the explosibility of coal dust in underground mines. *Ingeniería y Competitividad*, Volumen 14, No. 2, p. 147 – 160.
- Bradley, A., & Andrew, F. (2010) Assessment of full-scale boiler oxycombustion retrofit using CFD modeling, presented at 2nd Oxyfuel Combustion Conference.
- Carrasco, M., Grether, R., Suarez, M & Beltranini, L. (2006). Residuos de la explotación de carbón como materia prima para la industria de la construcción Conamet/Sam.
- Corripio, A.B. & Smith, C.A. (2000). Control automático de procesos: Teoría y Práctica. Noriega Editores 2000.
- Chica, L., Ospina, M. A., & Bustamante, R. (2009) Optimization of circuits of humid grinding of polymineral suspensions: challenges in the analysis of variables, simulation and process control *Prospect*. Vol. 7, No. 2, Julio - Diciembre de 2009, págs. 43-51
- Domingo E., Arauzo I., Gil A., & Iranzo I. (2001). Caracterización del sistema de molienda de carbón pulverizado de una central térmica mediante simulación CFD. *Energía*. (Submitted).
- Dwiputra, A., Felani, I. Member, IAENG, Syahlan, A., & Darmanto, P. (2012). Proceedings of the World Congress on Engineering 2012 Vol III. WCE 2012, July 4 - 6, 2012, London, U.K.
- Iranzo, I., Domingo, E., Cortés, C., & Arauzo, I. (2001). Combustion characterisation of a pulverised coal utility boiler based on CFD Techniques, Centro de Investigación del Rendimiento de Centrales Eléctricas (CIRCE), Universidad de Zaragoza, Spain.
- Sbarbaro, D., Ascencio, P., Espinoza, P., Mujica, F & Cortes, G. (2007) Adaptive soft-sensors for on-line particle size estimation in wet grinding circuits. *Control Engineering Practice*.