

# **Diseño de un sistema de molienda de carbón mineral para ser usado como combustible industrial**

Juan Real Hojas<sup>1</sup>, Federico Camacho Braussendorf<sup>2</sup>.

<sup>1</sup>Ingeniero Mecánico 2006

<sup>2</sup>Director de Tesis. Ingeniero Mecánico, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 1985; Maestría en Ciencias de la Ingeniería Mecánica, University of Illinois at Urbana Champaign, USA, 1987, Profesor Principal ESPOL desde 1987.

## **RESUMEN**

El presente trabajo establece las consideraciones y aspectos necesarios en el desarrollo de un sistema de implementación del carbón mineral como combustible industrial en la Etapa de Molienda. La pulverización del carbón, permite una combustión más eficiente, ya que dentro del proceso se consiguen dos efectos importantes sobre el carbón: la deshidratación y el aumento de la superficie específica; estos dos elementos permiten un consumo más eficiente de este recurso energético. Si bien es cierto el carbón mineral es un agente contaminante del medio ambiente (cuando se lo quema ineficientemente), en el presente proyecto se hacen las consideraciones ambientalmente necesarias, siguiendo normas y parámetros establecidos para así aprovechar al máximo la energía contenida en el carbón y minimizar los efectos contaminantes, productos de la mala combustión ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  y  $\text{CO}_x$ ) consumiendo así más lentamente las reservas del planeta.

## **EXTRACT**

The present work establishes the considerations and necessary aspects in the development of a system of implementation of the mineral coal as industrial fuel in the stage of Mill. The pulverization of coal allows more efficient combustion, because in the process two important effects are gotten on the coal: the dehydration and the increase of the specific surface; these two aspects allow a more efficient consumption of this energy resource. Although it is certain the mineral coal is a polluting agent of the environment (when is burnt it inefficiently), in the present project are made the considerations environmentally necessary, following norms and parameters established to take advantage of to the maximum energy contained in the coal and to minimize the polluting effects, products of the bad combustion ( $\text{SO}_x$ ,  $\text{NO}_x$  and  $\text{CO}_x$ ) consuming this way more slowly the sources of the planet.

## **INTRODUCCIÓN**

El carbón mineral es un combustible fósil presente en la naturaleza, con reservas que superan las de otras fuentes energéticas (petróleo, gas natural). Por lo que el objetivo de este trabajo es el de establecer los parámetros necesarios para implementar esta fuente energética como combustible industrial en su etapa de molienda, describiendo en cada etapa del proceso los equipos y sistemas mecánicos necesarios, siguiendo las normas y estándares especificados para este tipo de propósito. Además debido al grado de contaminación durante el manipuleo y combustión, y al riesgo de incendios y explosiones presentes en este tipo de polvos se mencionan las precauciones y métodos desarrollados para la prevención y control.

# CONTENIDO

## 1. El Proceso de Molienda del Carbón Mineral

La finalidad del proceso de molienda es pulverizar el carbón mineral hasta que una cantidad mayor o igual al 80% del material alimentado al molino tenga un tamaño menor a 75  $\mu\text{m}$ , es decir, que el 80 % de este, pase por una malla número 200, según la norma D-408 ASTM. Siguiendo el proceso, luego de pulverizado, el polvo es llevado fuera del molino a través de un sistema de transporte neumático, en una mezcla aire-polvo de carbón; hasta un sistema de colección de polvo, que se encarga de separar el material particulado del aire, este último es conducido hacia una chimenea para su liberación a la atmósfera; y el polvo colectado es transportado hacia la tolva de alimentación para su posterior uso en los quemadores.

## 2. Diagrama de Flujo del Proceso

En la Figura 1 se muestra el Flujograma del Proceso de Molienda, en este se muestra las partes principales que comprenden la planta desarrollada en el presente trabajo. Las partes principales de la planta de molienda son: El Sistema de Molienda, el Sistema de Colección de polvo y los Sistemas de Protección contra Incendios y Explosiones.

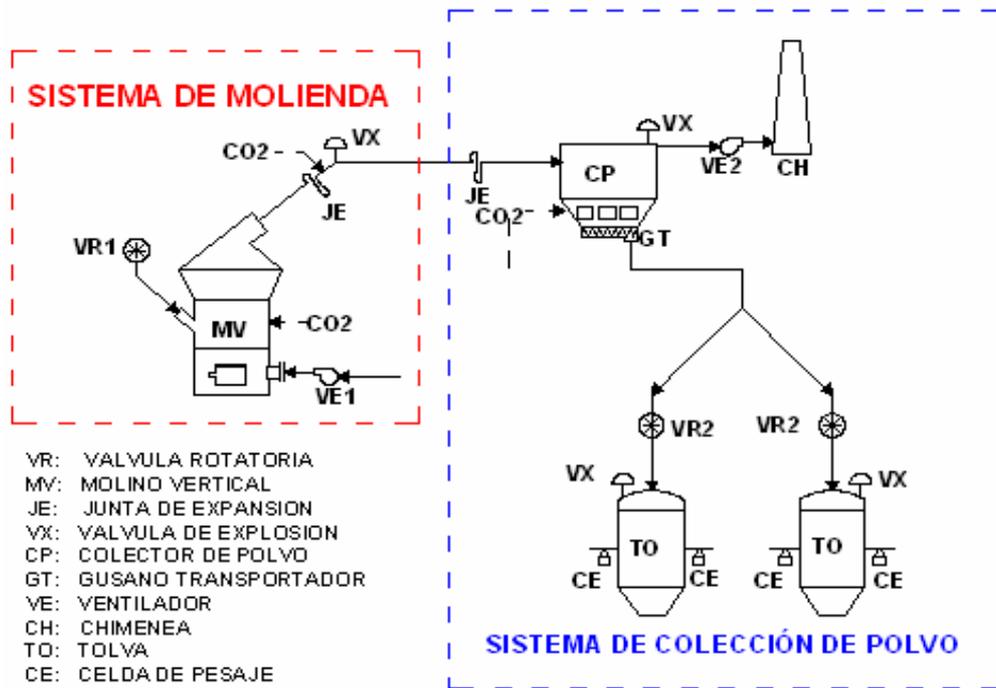


Figura 1. Flujograma de la Planta de Molienda.

El sistema de molienda inicia con la alimentación al molino, a través de una válvula rotatoria denominada VR1 ya que este tipo de elementos es adecuada para este tipo de materiales, debido a que provee de un flujo constante de material al molino, y previene el ingreso de aire exterior, siendo esto una consideración muy importante debido al riesgo perenne de explosiones; además se usan gases de combustión del precalentador en el caso de una planta cementera, para el transporte y deshidratación del carbón desde el molino hasta el colector de polvo, estos gases ingresarán al molino MV a través del ventilador principal VE1, cuyo dimensionamiento es referente a la caída de presión en el interior del

molino, a la cantidad de flujo y a la temperatura de operación. El molino seleccionado tiene una capacidad de 30 toneladas por hora, que es el tonelaje proyectado en este trabajo, debiendo este ser el adecuado para las propiedades del carbón que se procesará. Debido a que el carbón contiene un porcentaje de humedad, el molino dentro del proceso de molienda contempla la deshidratación del mismo.

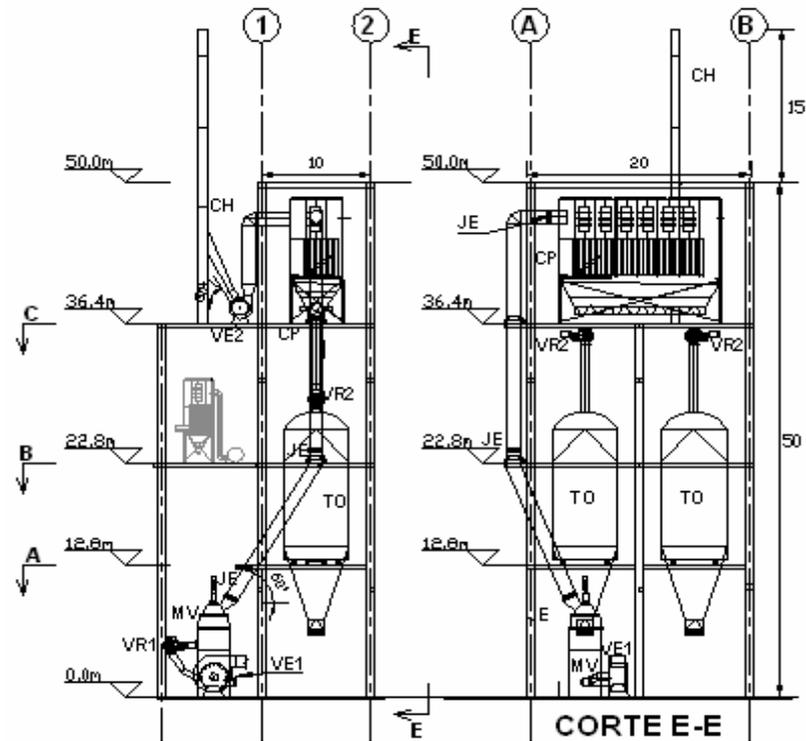
El sistema de colección de polvo está compuesto por un número de elementos encaminados a tomar el polvo de carbón que sale del molino y destinarlos a las tolvas de almacenamiento previo al sistema de dosificación al horno, para esto, el molino usa como medio de transporte y deshidratación una corriente de gases de combustión tomada desde el precalentador. El carbón sale desde el molino a un tamaño determinado en una mezcla de gases a través de un ducto de transporte neumático, este se conecta al colector de polvo CP que separa la mezcla, orienta los gases hacia la chimenea CH para su posterior evacuación a la atmósfera y transporta las partículas de polvo hacia las tolvas de almacenamiento TO a través de una válvula doble vía VDV y las válvulas rotatorias VR2. El transporte desde la salida del molino, hasta la descarga de los gases es llevada a cabo por un Ventilador Secundario cuya labor es la de vencer la caída de presión en el colector de polvo y en los ductos de transporte.

Además de los elementos mencionados en el proceso hay que recalcar que en este proyecto se consideró los aspectos pertinentes en cuanto a la seguridad de la planta, debido a que el polvo de carbón bajo determinadas condiciones es un ente altamente explosivo, por lo que se preverá la colocación de dispositivos de supresión, control y alivio de explosiones. De la misma manera, debido al nivel de contaminación que pueda producir el carbón, se puso énfasis en las normas y procedimientos que minimicen o controlen a niveles aceptables la mala incidencia de la quema del carbón en el medio ambiente.

### **3. Planta Desarrollada**

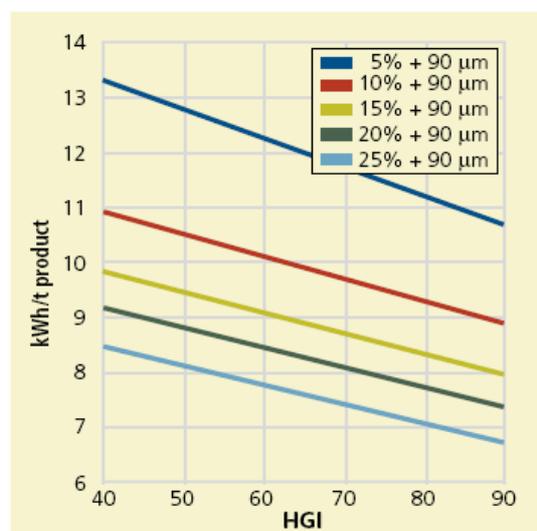
En la Figura 2 se observa la Planta de Molienda desarrollada, los equipos y sistemas fueron ubicados en un edificio de 50 metros de alto, ubicándose en el primer nivel (parte inferior) el molino vertical MV y el ventilador principal VE1, en los niveles dos y tres, las tolvas de alimentación TO y el sistema de transporte neumático, en el nivel cuatro, el colector de polvos CP, el ventilador secundario VE2 y la chimenea CH, además de los demás elementos y accesorios del sistema que se ubicarán en los niveles correspondientes. De los elementos mencionados anteriormente, se planificó diseñar los siguientes: las Tolvas de Alimentación To, la Chimenea Ch, y el Sistema de Transporte Neumático TM. Así mismo fueron seleccionados: el Molino Vertical MV, el Colector de Polvo CP, los Ventiladores Primario y Secundario, VE1 y VE2 respectivamente.

De los diferentes molinos desarrollados en la industria, existen dos, el molino de bolas y el molino vertical de rodillos, que son aplicables a la molienda del carbón mineral. Para el sistema desarrollado se seleccionó un molino vertical de rodillos debido a que este consume entre un 15 y 25% menos energía eléctrica en relación a un molino de bolas siendo esto una ventaja muy importante desde el punto de vista del ahorro energético. Para seleccionar un molino, se considera la molturabilidad del carbón ó Índice de Hardgroove HGI, este parámetro es obtenido de manera experimental y describe la dureza del material, que para un carbón mineral tiene un valor que está alrededor de 50.



**Figura 2. Planta de Molienda Desarrollada**

En la Figura 3 se muestran las curvas que relacionan los kilovatios-hora por tonelada de producto procesada, con el índice de molturabilidad del material. Para las curvas superiores se observa que para un menor tamaño de partícula obtenido se requiere mayor cantidad de energía. Para la selección del molino se empleó la curva de color verde, debido a que según la norma D-408 ASTM, cuando más un 80% del producto obtenido sea de un tamaño menor a los 90µm. Si bien es cierto se puede obtener un producto de menor tamaño, el costo de energía requerido es mucho mayor, como se observa en las curvas superiores en la figura 3. El molino seleccionado tiene una potencia de 266 kilovatios y las dimensiones principales son 12m de altura por 3m de diámetro.



**Figura 3. Potencia del Molino según Índice de Molturabilidad HGI [1]**

El ducto de transporte neumático tiene un diámetro de 1.2m, cuyo diámetro fue calculado según el caudal a la temperatura de operación, la velocidad del flujo, como se muestra en la ecuación 1.

$$D_{(m)} = \sqrt{\frac{\dot{Q}_{(m^3/hr)}}{V_{(m/s)} \times \frac{\pi}{4} \times 3.600_{(s/hr)}}$$

**Ecuación 1. Diámetro del Ducto de Transporte en función de la Velocidad y del Caudal [4]**

Así mismo, el ducto consta de un ventilador que mueve el flujo del material desde el molino vertical hacia el colector de polvos. Este fue calculado con la ayuda del software Loren Cook, siendo el ventilador seleccionado, de 102.2 Hp y 7.5 pulg. H<sub>2</sub>O de caída de presión para un caudal de 38,531 pie cúbicos por minuto. Además fue necesario la implementación de juntas de expansión a determinados tramos, para evitar problemas de vibración en el ducto y los esquijos.

El colector de polvos es un elemento que está compuesto por mangas de algún material filtrante, destinado a separar el material pulverizado de los gases de transporte, para su posterior almacenamiento. En esta parte del proceso se separan 30 toneladas de carbón por hora del flujo de gases de transporte. Para la selección se establecieron los parámetros necesarios que se debe cumplir, que son la tasa de filtración y la permeabilidad del material, establecidos en la norma D737-69 ASTM[4]. Al relacionar el caudal del carbón (m<sup>3</sup>/hr) con la tasa de filtración (m/hr) se obtiene el área necesaria de cada manga, y el número de mangas se obtiene relacionando la tasa de filtración, la permeabilidad, el caudal de carbón y el caudal de gases de la siguiente manera:

$$\frac{\frac{\text{Caudal de Gases}}{\text{Permeabilidad}} (m^2)}{\frac{\text{Caudal de Carbón}}{\text{Tasa Filtración}} (m^2)} = \text{Número de Mangas}$$

**Ecuación 2. Relación de Permeabilidad, Tasa de Filtración y Caudales con el Número de Mangas del Colector de Polvo**

Para el diseño de las tolvas de alimentación se usó el Método desarrollado por A.W.Jenike[7] y la norma DIN 1055[8]. El proceso de diseño de una tolva consta de dos partes, el diseño geométrico y el diseño por esfuerzos. En el diseño geométrico se determina la inclinación de la parte cónica, el diámetro mínimo de salida y las dimensiones generales de la tolva, todo esto en función de las propiedades del material a almacenar. En el diseño por esfuerzos se determinan todas las cargas que actúan sobre la tolva, y permiten determinar la parte estructural de la misma. Los esfuerzos que se ejercen sobre la tolva son del tipo cortante y normal, pero ambos son función de la presión vertical que ejerce el material sobre las paredes de la tolva. El esfuerzo vertical está dado por:

$$\sigma_y = \frac{\rho \cdot g \cdot D}{4 \cdot \mu \cdot k_j} \cdot \left( 1 - e^{-4 \mu k_j z / D} \right)$$

**Ecuación 3. Presión Vertical en la parte Cilíndrica de la Tolva [7]**

Las variables asociadas en la ecuación 3 son la densidad del material ( $\rho$ ), la aceleración de la gravedad ( $g$ ), la constante de Janssen ( $k_j$ ), el coeficiente de fricción entre el material y la pared ( $\mu$ ), la altura del cilindro ( $Z$ ) y el diámetro ( $D$ ). De la misma manera, existe una relación para la parte cónica de la tolva, que está dada por:

$$\sigma_{yc} = \rho \cdot g \cdot \left[ \frac{h-z}{n_i} + \left( \frac{\sigma_y|_{\max}}{\rho \cdot g} - \frac{h}{n_i} \right) \cdot \left( 1 - \frac{z}{h} \right)^{n_i+1} \right]$$

#### **Ecuación 4. Presión Vertical en la parte Cónica de la Tolva[1]**

Las dimensiones principales de la tolva son: 5m de diámetro, 11m de altura en la parte cilíndrica, 6.24m de altura en la parte cónica, con un espesor máximo de 22mm en el cono y de 12mm en el cilindro. Estos últimos fueron calculados mediante el empleo del software de elementos finitos SAP 2000 V10

En el dimensionamiento de la chimenea, se determinó el diámetro, la altura y el tiro o diferencia presión. El diámetro depende fundamentalmente de las condiciones de la corriente residual y fue determinado a través del empleo de la ecuación 3, siendo este de 88 centímetros. Las variables implicadas en la ecuación 3 son el caudal  $Q_c$  y la velocidad de salida de la chimenea  $u_c$ .

$$D_s = 1,128 \left( \frac{Q_c}{u_c} \right)^{1/2}$$

#### **Ecuación 3. Diámetro de la Chimenea[6].**

La altura de la chimenea depende de varias variables: la altura de la fuente; la velocidad de salida de la chimenea; las temperaturas de la chimenea y ambiental; la altura, forma y arreglo de las estructuras cercanas y el terreno; y la composición del gas de salida de la chimenea.

Para chimeneas construidas después del 12 de enero de 1979, la altura GEP de chimenea debe ser la mayor de [9]:

1. 65 metros (213 pies)
2. La altura demostrada por un modelo fluido aprobado o por un estudio de campo que asegure que las emisiones de la chimenea no causan excesivas concentraciones de contaminantes por precipitaciones ambientales, ventarrones, efectos de remolinos, etc.
3. La altura determinada por la siguiente ecuación:

$$H_s = H_b + 1,5L$$

#### **Ecuación 4. Altura de la Chimenea [6]**

Las variables empleadas en la ecuación 4 representan: la altura de chimenea, medida desde el nivel de la elevación del suelo ( $H_s$ ), la altura de las estructuras cercanas, medida desde este nivel del suelo ( $H_b$ ) y la dimensión menor (altura o ancho proyectado de las estructuras cercanas ( $L$ )). Con el empleo de la ecuación 4 se determinó una altura desde el nivel del suelo de 51.5m, por lo que se adoptó la altura de 65m

#### 4. Consideraciones de Seguridad

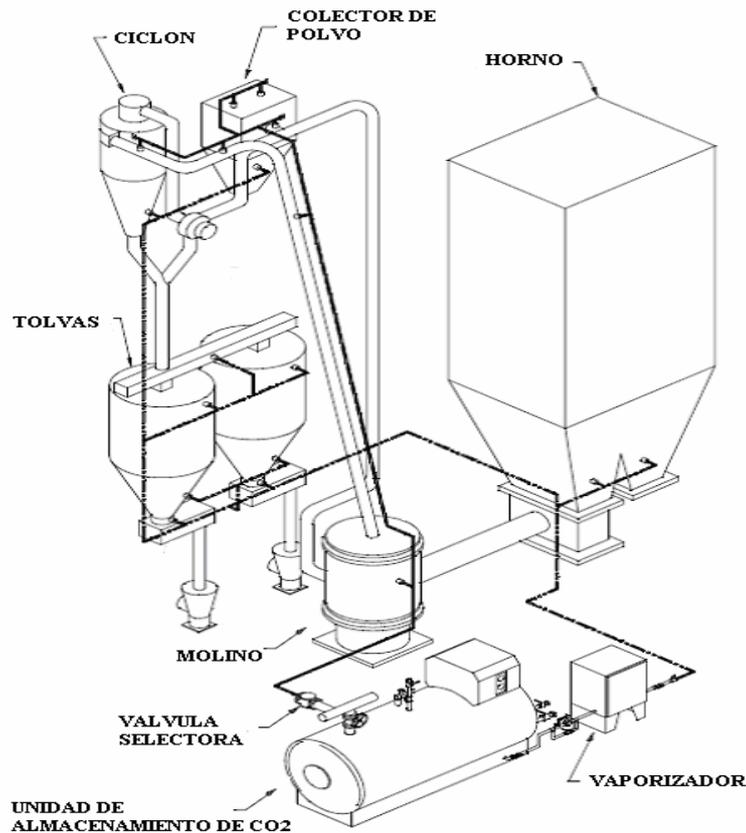
En los procesos de molienda, las consideraciones de seguridad, representan un factor muy importante, debido a los peligros de explosión que presentan los materiales pulverizados y confinados. Las explosiones y los incendios se pueden iniciar debido a descargas de electricidad estática, chispas de las llamas, superficies calientes y por combustión espontánea. El peligro de combustión aumenta notablemente durante las operaciones de molienda en los que se emplean molinos de bolas, de martillos, de anillo y rodillos, durante los cuales se pueden alcanzar altas temperaturas.

Muchos polvos en suspensión en aire presentan riesgo potencial de explosión y las causas de ignición de estas nubes de polvo son muchas. La concentración de polvo en el aire y su tamaño de partícula son factores importantes, que describen el grado de explosión. Por debajo de cierto límite inferior de concentración (100 gramos por metro cúbico) [1], no se puede producir la explosión, ya que el calor de combustión es insuficiente para propagarla. Sin embargo, por encima de la concentración máxima limitante (que es un valor que aún no está bien definido) , la explosión tampoco se produce porque no se dispone del suficiente oxígeno. Cuanto más finas sean las partículas, tanto mas fácilmente se incendian, tanto mayor es la velocidad de combustión.

Entre las precauciones útiles están el aislamiento de los molinos, el uso de materiales de construcción que no generen chispas, el empleo de separadores magnéticos para evitar el ingreso de elementos de acero en la alimentación. El acero inoxidable tiene una menor tendencia a la producción de chispa que el acero ordinario o los forjados.

La reducción de contenido de oxígeno en el aire presente en los sistemas de molienda constituye un medio para evitar las explosiones de polvo dentro de los equipos. El mantenimiento del contenido de oxígeno por debajo del 12% debería representar un nivel de seguridad para casi todos los materiales. El empleo de gases inertes tiene una adaptación especial en pulverizadores equipados con clasificadores de aire; el gas de combustión se utiliza para este fin y se mezcla con el aire que normalmente está presente en el sistema. A pesar de la protección que se tiene al emplearse gases inertes, el equipo debe contar con respiraderos contra explosiones y deben diseñarse estructuras con ventilación adecuada.

El estándar No. 12 de la norma NFPA se refiere al diseño de sistemas de inertización con el uso de dióxido de carbono[1]. Para molinos y ductos se requiere una concentración de CO<sub>2</sub> de 65%, con un 30 a 34% de concentración en los primeros dos minutos. Para colectores de polvo, se requiere un 75% de concentración de CO<sub>2</sub>. Los sistemas de inertización de carbón mineral son operados manualmente. El calor requerido para vaporizar el CO<sub>2</sub> es suministrado por una vaporizador externo. Para introducir el vapor de CO<sub>2</sub> existen unas boquillas especiales. La norma NFPA No.12 Tabla 2-4.2.1 establece los porcentajes de CO<sub>2</sub> para diferentes riesgos específicos



**Figura 4. Esquema del Sistema de Inertización por CO<sub>2</sub> para un Sistema de Molienda de Carbón Mineral**

## 5. Aspectos Ambientales

La contaminación del Medio Ambiente es el resultado de la alteración de sus condiciones normales, por fenómenos naturales o de producción y transformación de recursos. La generación térmica a partir del consumo del carbón implica su explotación, transporte, producción, preparación y combustión; por lo tanto, cada una de estas etapas afectará en mayor o menor escala el Medio Ambiente, a nivel de aire, agua, suelos, “lluvia ácida” y efecto invernadero”, entre otros. Por lo que es imperativo asegurar el uso racional de este recurso no renovable en forma limpia y eficiente, a fin de minimizar su impacto sobre el Medio Ambiente.

Las emisiones en la combustión están ligadas a las propiedades del carbón (humedad, contenido en compuestos sulfurados volátiles, resistividad, etc) y a la tipología de sistema de horno empleada.

La medición de las emisiones en fuentes localizadas es necesaria por diversos motivos, especialmente para controlar el cumplimiento de los límites de emisión tales como los descritos en la Tabla 1. La elección de un método de medición u otro depende principalmente del tipo de sustancia y de diversos factores que pueden afectar a la exactitud y a la precisión de los resultados.

**TABLA 1**  
**Limites Máximos Permisibles de Emisiones al aire**  
**para fuentes Fijas de Combustión [9]**

<b>Contaminante Emitido</b>	<b>Combustible Utilizado</b>	<b>Valor g/m<sup>3</sup></b>
Partículas Totales	Sólido	150
Óxidos de Nitrógeno	Sólido	850
Dióxido de Azufre	Sólido	1650

Existen diversos métodos y normas empleadas en la prevención y control de la contaminación del aire; de estos, los relativos a la combustión del carbón son la norma EPA Método No. 5, No. 6 y No. 7, empleados en la determinación de emisiones de material particulado, óxidos de nitrógeno, óxidos de azufre, óxidos de carbono; desde fuentes estacionarias; la norma ISO 10849 (1996) que trata sobre las concentraciones de masa, y las características de los sistemas de medición.

Con el propósito de proteger el ecosistema se han desarrollado tecnologías para el uso de carbón de manera limpia y eficiente, tales como: quemador de bajo NO<sub>x</sub>, combustión por etapas y reducción no-catalítica selectiva (SNCR) para el caso de las emisiones de (NO<sub>x</sub>); adición de absorbentes para el caso de los SO<sub>x</sub>, y de colectores de polvo, para el caso de emisión de partículas. Como resultado del mejoramiento continuo de estas tecnologías, el carbón se utilizará cada vez más eficientemente. Estas tecnologías permitirán también que las plantas que generan energía con carbón cumplan con las regulaciones ambientales a nivel mundial.

### CONCLUSIONES

- ⇒ La pulverización del carbón, permite una mejor utilización de este recurso energético, ya que dentro del proceso se consiguen dos efectos importantes: La deshidratación, puesto que la reducción del contenido de humedad tiene un efecto positivo en la tasa de transferencia de calor; y el aumento de la superficie específica.
- ⇒ El carbón mineral es una importante fuente de energía, ya que la gran cantidad de reservas existentes están geográficamente esparcidas en más de 100 países en todos los continentes. A los actuales niveles de producción, las reservas mundiales son suficientes para los próximos 250 años y superan a las reservas de petróleo en un 400%.
- ⇒ Una de las principales desventajas del carbón mineral son las emisiones al medio ambiente producto de la combustión, tales como: NO<sub>x</sub>, SO<sub>x</sub> y CO<sub>x</sub>. Con el propósito de proteger el ecosistema se han desarrollado tecnologías para el uso de carbón de manera limpia y eficiente. Como resultado del mejoramiento continuo de estas tecnologías, el carbón se utilizará cada vez más eficientemente. Estas tecnologías permitirán también que las plantas que generan energía con carbón cumplan con las regulaciones ambientales a nivel mundial.
- ⇒ Un aspecto importante en el uso del carbón mineral como combustible industrial es su costo por unidad de energía. Pero una de sus desventajas está en la inversión inicial que se requiere para implementar una planta de molienda para su preparación, por lo

que es usado en procesos en los que se requiere una gran demanda de energía, tales como: la generación eléctrica, la industria del cemento y la industria metalúrgica.

## REFERENCIAS

1. J. Real, "Diseño de un Sistema para el Proceso de Molienda de Carbón Mineral para ser usado como Combustible Industrial" (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2006)
2. P. Moreno, "Proyecto de un Sistema Mecánico para la Recepción, Almacenamiento y extracción de Carbón Mineral usado como Combustible Industrial" (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2005)
3. B. Neira, "Proyecto de un Sistema Mecánico para el Transporte y Alimentación al Proceso de Molienda de Carbón Mineral usado como Combustible Industrial" (Tesis, Facultad de Ingeniería Mecánica y Ciencias de la Producción, Escuela Superior Politécnica del Litoral, 2005)
4. Intensiv Filter, Pocket Book Dedusting Technology Filter Media, Alemania 1990.
5. EPA, APTI Course 413, Control of Particulate Emissions.
6. Tall Chimneys Chemical Engineering, Carlton-Jones, Dennis and Schneider, October 14, 1968, p. 167.
7. A. W. Jenike, Storage and Flow of Solids, University of Utah, 1964.
8. DIN 1055 PART 6, Design Loads for Buildings, Loads in Silo Bins, 1987
9. Guía para el Control y Prevención de la Contaminación Industrial, Comisión Nacional del Medio Ambiente – Región Metropolitana, Santiago de Chile, Chile, Marzo 1998.
10. Ministerio del Ambiente, "Texto Unificado de la Legislación Ambiental Secundaria", Quito – Ecuador, 2002

Responsables:

---

Juan Real Hojas

---

Federico Camacho Braussendorf