

ESTUDIO EXPERIMENTAL DE LAS PARTÍCULAS SÓLIDAS CONTAMINANTES EMITIDAS DURANTE LA COMBUSTIÓN DEL BAGAZO DE CAÑA.

EXPERIMENTAL STUDY OF THE SOLID POLLUTANT PARTICLES EMITTED DURING THE COMBUSTION OF THE SUGAR CANE BAGASSE.

Reydel Batista Mateo, rbatista@uho.edu.cu , Universidad de Holguín, Cuba, Dr. C.
Borges Díaz Suárez, borges@uho.edu.cu , Universidad de Holguín, Cuba, M. Sc.

RESUMEN

El bagazo de caña es una biomasa muy atractiva para disímiles aplicaciones. En la actualidad continúa dedicándose el mayor porcentaje a la generación de vapor que sustenta la producción azucarera. Durante la descomposición térmica del bagazo se generan grandes volúmenes de gases que arrastran un conjunto de partículas sólidas hacia la atmósfera, compuestas por fracciones que no completaron el proceso de combustión, cenizas, hollín y otros arrastres. A este conglomerado de partículas se les conoce como material particulado.

Con el objetivo de determinar la distribución granulométrica y las propiedades físicas que inciden en la selección de las instalaciones para la captación y posterior manipulación del particulado, se tomaron muestras en condiciones reales de explotación. Se sometieron a un proceso de tamizado para conocer la distribución por tamaños, el diámetro medio y el porcentaje en peso de cada fracción y se utilizó el Método de Ergun para calcular experimentalmente la densidad real, la densidad aparente, la porosidad y el factor de forma.

Los resultados permiten definir las tecnologías de separación y la construcción de prototipos para minimizar el impacto de estas emisiones contaminantes y su nocividad sobre la salud humana y el ecosistema.

Palabras claves: contaminación ambiental, combustión, bagazo, particulados.

ABSTRACT

Sugarcane bagasse is a very attractive biomass for dissimilar applications. At present, the largest percentage continues to be dedicated to the generation of steam that sustains sugar production. During the thermal decomposition of bagasse, large volumes of gases are generated that drag a set of solid particles into the atmosphere, made up of fractions that did not complete the combustion process, ashes, soot and other carry-overs. This conglomerate of particles is known as material particulate.

In order to determine the particle size distribution and the physical properties that affect the selection of the facilities for the collection and subsequent handling of the particulate, samples were taken under real operating conditions. They were subjected to a sieving process to know the distribution by sizes, the mean diameter and the percent by weight of each fraction and the Ergun method was used to experimentally calculate the real density, the apparent density, the porosity and the form factor.

The results allow the definition of separation technologies and the construction of prototypes to minimize the impact of these polluting emissions and their harmfulness on human health and the ecosystem.

Keywords: environmental pollution, combustion, bagasse, particulates.

INTRODUCCIÓN

Cuba pretende cubrir el 14 % de la generación de electricidad a partir de la biomasa en el 2030. Esta cifra permitirá alcanzar en el futuro la soberanía energética y más aún si se considera que la misma está basada solo en el programa de bioeléctricas en el sector azucarero, sin tener en cuenta el aprovechamiento de otros subproductos de alto valor agregado para la producción de potencia (Jiménez et al., 2020).

En la política de desarrollo prospectivo de las fuentes renovables y el uso eficiente de la energía aprobada en junio de 2014 se estableció, entre otros propósitos, la instalación de bioeléctricas para generar 755 MW, niveles de generación que coinciden con las potencialidades anuales reportadas por algunos autores (González, 2015).

Desde el punto de vista económico existen estudios que demuestran la factibilidad del empleo de los subproductos de la caña de azúcar como el bagazo y otros residuales de la cosecha en plantas bioeléctricas para la producción de energía (Torres et al., 2015).

Internacionalmente existe consenso en las potencialidades del bagazo para mitigar los efectos que provoca el empleo de combustibles fósiles en la generación de electricidad. (Shah et al., 2016), (Hernández et al., 2017).

En este escenario la fabricación de azúcar cede espacio como objetivo primordial de la industria y adquiere relevancia el aprovechamiento energético de los subproductos, con énfasis especial en el bagazo de la caña. A futuro puede esperarse un incremento en el empleo del bagazo como combustible, con lo cual urge estudiar tecnologías para mitigar el impacto ambiental que se produce durante su conversión energética.

Contaminación atmosférica provocada por la combustión del bagazo.

(Jiménez et al., 2020) afirma que este ritmo de desarrollo en la agroindustria azucarera se acompaña inevitablemente de severos daños al medio ambiente. Estudios realizados en Cuba por (Gil, 2005) identifican impactos negativos sobre la calidad atmosférica e incidencia en la salud de las comunidades.

Una fuente importante de contaminación atmosférica local es la combustión del bagazo (Gil, 2005), que origina emisiones de gases nocivos y partículas en suspensión.

En el caso de la contaminación provocada por la emisión de gases nocivos se reportan valores superiores a los de instalaciones convencionales que emplean hidrocarburos como combustible (Hernández et al., 2019).

El material particulado se considera como el contaminante más significativo en la generación de vapor en calderas bagaceras (Gutiérrez et al., 2014).

La mayor producción de material particulado está asociado a un aumento en la cantidad de combustible utilizado, al contenido de materia extraña y humedad en el bagazo (Orellana et al., 2009).

Este conglomerado es capaz de provocar una gran contaminación que puede ser incluso más dañina que la contaminación producida por la quema de combustibles fósiles (Esquerre, 2016). Las fracciones más ligeras son expulsadas a la atmósfera por la chimenea, transportándose a grandes distancias y pueden ser absorbidas por los sistemas respiratorios de humanos y animales, causando graves enfermedades.

Aún en estas circunstancias, en la generación de vapor en calderas para bagazo no abunda el empleo de separadores de partículas y la limpieza de gases.

Es una práctica común que los generadores de vapor no posean sistema de colección de partículas a la salida de los conductos de gases producto de la combustión y por tanto la emisión de material particulado por la chimenea es algo cotidiano (Gil, 2005).

Captación del particulado arrastrado en calderas bagaceras.

Los factores determinantes en la elección de un equipo de depuración dependen del contaminante, de la corriente gaseosa que lo soporta y de las características del producto. La separación mecánica tiene las mayores potencialidades. Las técnicas se basan en diferencias físicas entre las partículas, tales como el tamaño, la forma o la densidad. (UNAM, 2020).

El equipo de separación más barato y relativamente eficiente es el ciclón, encontrado frecuentemente en industrias y considerado como el captador más apropiado para el particulado emitido por las calderas bagaceras.

Los ciclones se usan, además de muchas aplicaciones de proceso, para la disminución de material particulado en calderas. (Bahamondes, 2008). Son adecuados para separar partículas con diámetros mayores a 5 micrómetros aunque en ciertos casos pueden atrapar partículas mucho más pequeñas. (González et al., 2019).

La eficiencia de colección de material particulado puede determinarse basándose en las propiedades físicas del material particulado y el gas de arrastre, y en las relaciones entre proporciones del ciclón (Echeverri, 2006).

Propiedades relevantes para el diseño de la instalación de separación.

Cualquier estudio para dimensionar el equipo de separación implica la determinación de la cantidad de material de diferentes tamaños presente en el conglomerado. Para ello, el único método general y práctico es la clasificación por tamices.

La densidad aparente será necesaria para conocer el desempeño del separador (Morales, 2016).

El diseño de la instalación precisa, además de la distribución granulométrica y la densidad aparente, el diámetro medio, el porcentaje en peso de cada fracción y las propiedades físicas del conglomerado, esencialmente, densidad real, porosidad y factor de forma.

Determinar estas características y propiedades físicas es el objetivo de la investigación.

METODOLOGÍA

Se tomaron 50 muestras en condiciones reales de explotación en un generador de vapor Reto CV-4518 de la Empresa Azucarera “Fernando de Dios” en la provincia de Holguín.

Para el **análisis granulométrico** las muestras se dividieron en fracciones de 50 gramos y se sometieron a un proceso de clasificación por tamaños en un juego de tamices de 10 platos, a una frecuencia de 20 vibraciones por segundo durante 10 minutos.

Se utilizó el Método de Ergun para calcular experimentalmente la densidad real, la densidad aparente, la porosidad y el factor de forma.

El **diámetro medio de la muestra** se determina a través de la ecuación (1):

$$d_{med} = \frac{\sum_{i=1}^n (d_i P_i)}{\sum_{i=1}^n P_i} \quad (1)$$

Donde:

d_{med} – Diámetro medio del particulado.

d_i – Diámetro medio de la fracción i .

P_i – Peso de la fracción i .

La **densidad aparente** del particulado se determina calculando la relación entre el volumen ocupado y su peso: la muestra sin clasificación, de un peso dado, se deja caer libremente en una probeta graduada y se mide el volumen ocupado.

La determinación de la **densidad real** se realiza en varios pasos. El primero de ellos consiste en la realización de la experiencia de Ergun: sobre la base del procesamiento de los datos experimentales se relaciona la caída de presión que se produce en una cama porosa con el flujo que la atraviesa (2).

$$\frac{\Delta P g}{L V_m} = a + b \cdot G \quad (2)$$

Donde:

ΔP - Caída de presión a través de la cama (N/m²),

L - Altura de la cama (m),

V_m - Velocidad media del gas en la sección transversal de la columna vacía (m/s),

G - Velocidad másica (Kg/m² seg)

a y b - Coeficientes.

Los valores de los coeficientes a y b se determinan a través del ajuste de curvas. La ecuación (2) corresponde a una recta donde a es el intercepto y b su pendiente.

Finalmente la densidad real se determina a partir de (3).

$$\rho_a = \rho_r - C_1 \left(\frac{\rho_a}{a} \right)^{\frac{1}{3}} \quad (3)$$

Donde:

ρ_a : Densidad aparente.

ρ_r : Densidad real.

C_1 y a : Coeficientes.

La **porosidad** de la cama de partículas de un mismo tamaño medio está dada por la relación entre el volumen del espacio libre y el volumen de la cama (4).

$$e = 1 - \frac{\rho_a}{\rho_r} \quad (4)$$

Donde:

ρ_a : densidad aparente de las partículas (Kg/m³)

ρ_r : densidad real de la partícula (Kg/m³)

La **esfericidad o factor de forma** define la relación entre la superficie de la esfera que tiene igual volumen que la partícula y la superficie de la partícula. Se determina utilizando el método de Ergun mediante (5).

$$f_s = \frac{150 \cdot (1-e)^2}{e^3} \frac{\mu}{a d_p^2} \quad (5)$$

Donde:

f_s - Factor de forma o esfericidad, e - Porosidad,

d_p - Diámetro medio de la partícula, a - Coeficiente,

μ - Viscosidad del gas utilizado en la experimentación.

RESULTADOS

Distribución granulométrica.

En la Tabla 1 aparecen las fracciones distribuidas por tamaño y peso en la muestra.

Tabla 1. Resultados del análisis al tamiz.

| Diámetro medio de cada fracción (mm) | Peso Promedio (g) | Por ciento |
|--------------------------------------|-------------------|------------|
| 4.25 | 0.4 | 0.80 |
| 2.05 | 0.7 | 1.40 |
| 1.50 | 0.6 | 1.30 |
| 1.33 | 1.2 | 2.40 |
| 1.13 | 1.6 | 3.20 |
| 0.92 | 2.1 | 4.10 |
| 0.74 | 4.7 | 9.40 |
| 0.49 | 15.1 | 30.4 |
| 0.28 | 10.4 | 20.9 |
| 0.15 | 4.8 | 9.70 |
| 0.05 | 8.1 | 16.4 |

Diámetro medio de la muestra.

Aplicando la ecuación (1), se determinó el diámetro medio de la muestra: 0.49 mm.

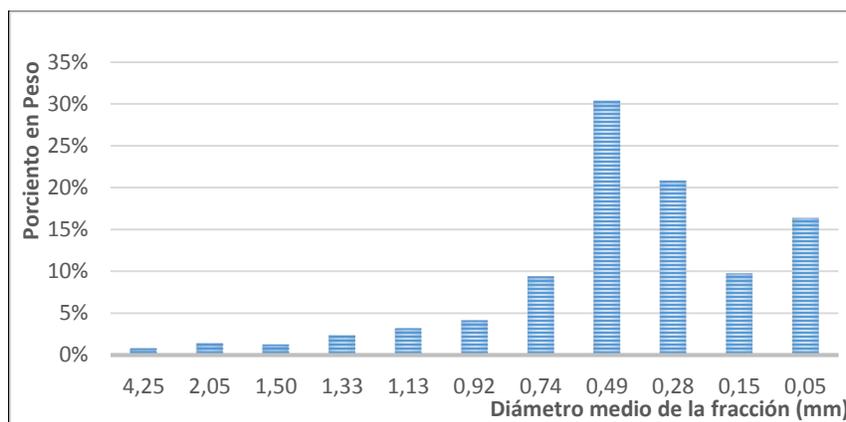


Figura 1. Distribución por tamaños de la muestra del particulado.

Densidad aparente del particulado.

Los resultados se ofrecen en la Tabla 2. Resaltan los bajos valores de este parámetro.

Tabla 2. Densidad aparente del particulado.

| Muestra | Peso (g) | Volumen (ml) | Densidad Aparente (Kg/m ³) |
|----------|----------|--------------|----------------------------------------|
| 1 | 8 | 130 | 61.54 |
| 2 | 8 | 139 | 57.55 |
| 3 | 8 | 112 | 71.43 |
| 4 | 8 | 128 | 62.50 |
| 5 | 8 | 141 | 56.74 |
| Promedio | 8 | 130 | 61.95 |

Densidad real.

En la Tabla 3 se muestran los resultados de las mediciones realizadas en la instalación experimental para el grupo de partículas con diámetro medio de 0.49 mm.

Tabla 3. Resultados del Método de Ergun para el diámetro medio de 0.49mm.

| Rotámetro para aire a 25 °C | | | Densidad del aire = 1.205 kg/m ³ a la presión = 1 atm | | | | | |
|-----------------------------|----------------------------------------|--------------------------|------------------------------------------------------------------|--------------------------------------------------------------|---------------------------------------------------------|-------|---------------------------|--------------------------|
| Diámetro Medio = 0.49 mm | | Peso de la Muestra = 8 g | | Sección del percolador 1.13 x10 ⁻⁴ m ² | | | | |
| Altura de la Cama L (mm) | Densidad Aparente (Kg/m ³) | Gasto (l/h) | Velocidad V _m (m/s) | Flujo Másico G _m (Kg/m s) | Caída de presión en el percolador (mm H ₂ O) | | | $\frac{\Delta P}{L V_m}$ |
| | | | | | Vacía | Llena | Diferencia (ΔP) | |
| 84 | 71.75 | 60 | 0.125 | 0.1513 | 2.5 | 10 | 7.5 | 68387.96 |
| 84 | 71.75 | 50 | 0.104 | 0.1260 | 2 | 8.9 | 6.9 | 75500.31 |
| 84 | 71.75 | 40 | 0.083 | 0.1008 | 1.5 | 7.5 | 6 | 82065.56 |
| 84 | 71.75 | 30 | 0.062 | 0.07565 | 1 | 5.9 | 4.9 | 89360.27 |
| 84 | 71.75 | 20 | 0.0418 | 0.05043 | 0.5 | 4 | 3.5 | 95743.15 |

La correlación de los parámetros fundamentales se ilustra en la Figura 2.

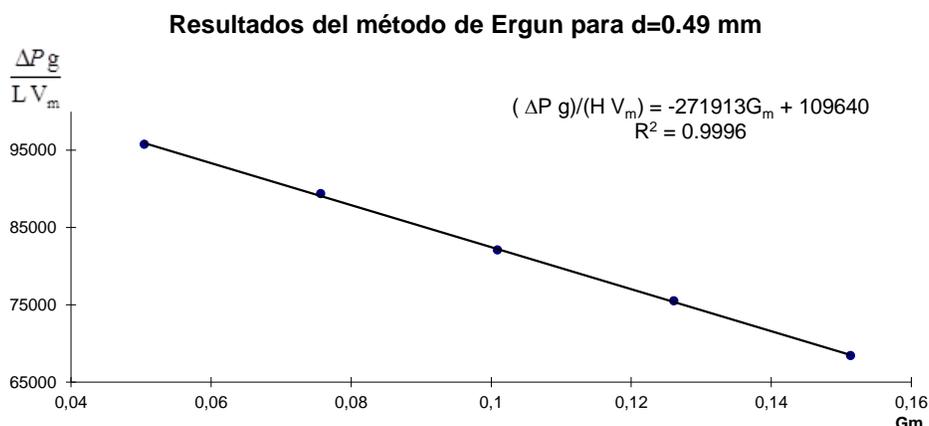


Figura 2. Determinación de la pendiente (b) y el intercepto (a) para el diámetro 0.49 mm.

Del trabajo experimental se determina el valor de densidad aparente para cada fracción de partículas de un mismo tamaño medio (Tabla 4).

Tabla 4. Densidad aparente y coeficientes a y b para diferentes diámetros.

| Diámetro Medio (mm) | Coficiente (a) | Coficiente (b) | Densidad Aparente (kg/m ³) |
|---------------------|----------------|----------------|----------------------------------------|
| 2.050 | 5811.1 | -12402 | 31.39 |
| 1.500 | 20584.0 | -113325 | 43.32 |
| 1.125 | 33743.0 | -197015 | 54.29 |
| 0.920 | 58326.0 | -201626 | 60.11 |
| 0.735 | 77336.0 | -293934 | 64.80 |
| 0.493 | 109640.0 | -271913 | 71.75 |
| 0.270 | 340905.0 | -633943 | 86.93 |
| 0.150 | 634418.0 | -825772 | 94.17 |

La correlación entre el diámetro medio y la densidad aparente se muestra en la Figura 3.

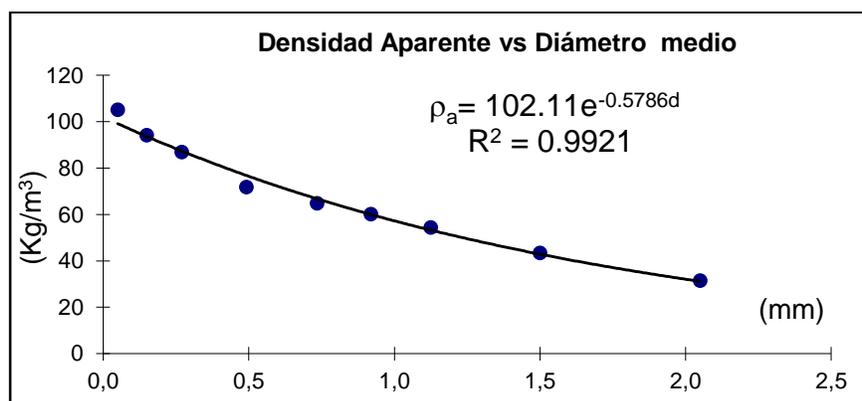


Figura 3. Correlación de la densidad aparente y el diámetro medio de las partículas.

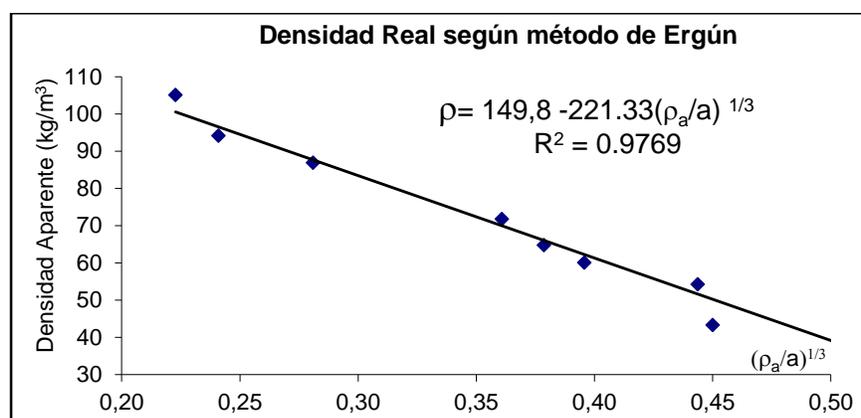


Figura 4. Determinación de la densidad real a partir de los valores de ρ_a y a

El ajuste de curva en la Figura 4 tiende a una recta, con un coeficiente de regresión elevado, por lo que el valor del intercepto 149.8 corresponde con la densidad real.

Porosidad.

Los valores de la porosidad de la cama de partículas se observan en la Tabla 5 y su relación con el diámetro medio de las partículas se muestra en la Figura 5.

Tabla 5. Valores de porosidad para camas de distintos tamaños medios de partículas.

| Diámetro Medio (mm) | Densidad Aparente (kg/m³) | Densidad Real (kg/m³) | Porosidad |
|---------------------|---------------------------|-----------------------|-----------|
| 2.050 | 31.39 | 153.8 | 0.7960 |
| 1.500 | 43.32 | 142.9 | 0.6969 |
| 1.125 | 54.29 | 152.4 | 0.6440 |
| 0.920 | 60.11 | 147.6 | 0.5930 |
| 0.735 | 64.80 | 148.6 | 0.5640 |
| 0.493 | 71.75 | 151.5 | 0.5267 |
| 0.270 | 86.93 | 149.1 | 0.4170 |
| 0.150 | 94.17 | 147.4 | 0.3615 |
| 0.050 | 105.12 | 154.4 | 0.3193 |

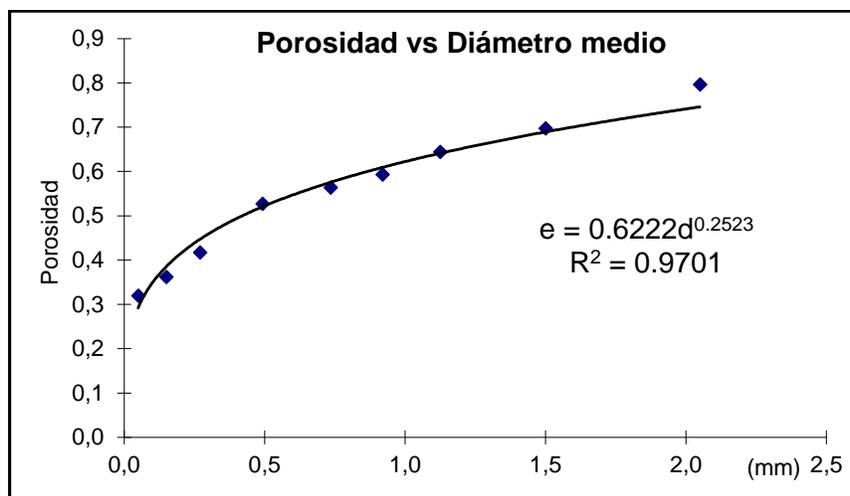


Figura 5. Correlación la porosidad y el diámetro medio de las partículas

Esfericidad o factor de forma.

Los valores del factor de forma en función del diámetro medio de las partículas y su correlación aparecen en la Tabla 6 y la Figura 6.

Tabla 6. Valores de esfericidad para cada diámetro medio de partículas.

| Diámetro Medio (mm) | Porosidad | Valores de (a) | Factor de Forma |
|---------------------|-----------|----------------|-----------------|
| 2.050 | 0.7960 | 5811.1 | 0.000811 |
| 1.500 | 0.6969 | 20584.0 | 0.001406 |
| 1.125 | 0.6440 | 33743.0 | 0.002667 |
| 0.920 | 0.5930 | 58326.0 | 0.003862 |
| 0.735 | 0.5640 | 77336.0 | 0.006089 |
| 0.493 | 0.5267 | 109640.0 | 0.013835 |
| 0.270 | 0.4170 | 340905.0 | 0.045274 |
| 0.150 | 0.3615 | 634418.0 | 0.145097 |

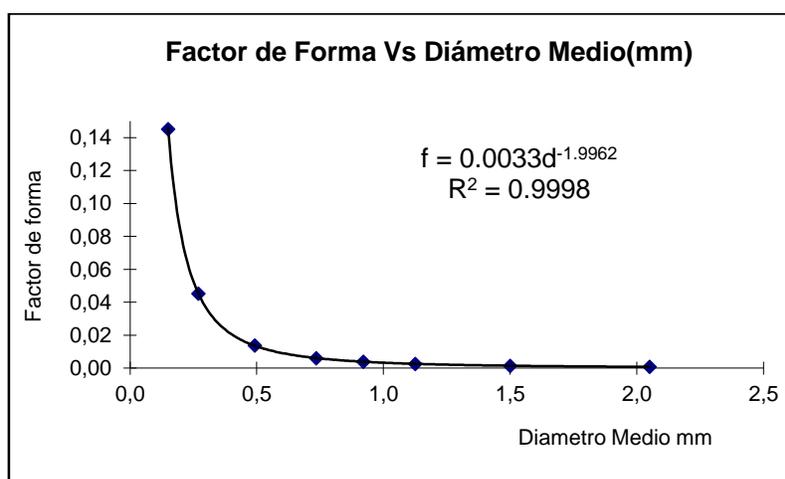


Figura 6. Correlación del factor de forma con el diámetro de la partícula.

DISCUSIÓN

La **distribución granulométrica** evidencia el predominio de las partículas de menor tamaño. Más del 47 % tienen un diámetro inferior al **diámetro medio de la muestra**. Si se incluyen estas últimas puede afirmarse que más 77 % del particulado no superan los 0.49 mm lo que incrementa su potencial como contaminante e imponen mayor eficiencia al equipo de captación.

La **densidad aparente** es muy baja, por lo que se necesitan mayores capacidades de almacenamiento y sugiere su empleo cercano a la fuente de captación.

El valor de la **densidad real** determinado experimentalmente por el método de Ergun es confiable dada la calidad del ajuste de la recta y corresponde a 149.8 kg/m^3 .

El comportamiento de la **porosidad** al variar el diámetro medio de las partículas es coherente y muestra una disminución para pequeños tamaños.

Al observar el comportamiento de la esfericidad o factor de forma se corrobora que el material particulado mantiene el polimorfismo del bagazo. El hecho de que cerca del 50 % de las partículas tienen diámetros medios inferiores a 0,5 mm hace que la esfericidad obtenga sus mejores valores y facilite el dimensionamiento de los separadores.

CONCLUSIONES

1. El análisis de la distribución granulométrica muestra que el material particulado arrastrado por los gases de la combustión en las calderas bagaceras está compuesto mayoritariamente por partículas de tamaño pequeño, con diámetro medio inferior a 0.5 mm. Ello confirma su nocividad para la salud, su potencial como contaminante atmosférico y las exigencias que deberá superar el equipo de captación.
2. Al ser un material de muy baja densidad pierde atractivo la posibilidad de transportarlo para su empleo a grandes distancias, salvo que se use algún método de compactación: pelets, briquetas. Su almacenamiento necesita mayores espacios y sugiere la necesidad de medios de protección para su manipulación.
3. La precisión que se logra al aplicar el método de Ergun para determinar experimentalmente la densidad real del material particulado compensa su complejidad. La calidad del ajuste de curvas permite afirmar que el valor 149.8 kg/m^3 corresponde a la densidad real del conglomerado de partículas arrastradas por los gases producto de la combustión del bagazo en las calderas estudiadas.
4. La porosidad de la cama de partículas disminuye a medida que se reduce el diámetro medio de las fracciones que la integran.
5. El comportamiento de la esfericidad o factor de forma muestra que el material particulado conserva en gran medida el polimorfismo del bagazo. Cerca del 50 % de las partículas estudiadas tienen diámetros medios inferiores a 0,5 mm y la esfericidad alcanza sus mejores valores.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Bahamondes, J. (2008). Diseño y construcción de un separador ciclónico para la industria naval. (Trabajo de Diploma). Universidad Austral de Chile. Chile.
2. Echeverri, C. (2006). Diseño óptimo de ciclones. Revista Ingenierías Universidad de Medellín, 5 (9), 123-139
3. Esquerre, J. (2016). Reducción del impacto ambiental de calderas bagaceras. Untelsciencia-Perú,1 (1), 69-78.

4. Gil, Z. (2005). Estudio del impacto ambiental del uso del bagazo como fuente de energía en centrales azucareros en Cuba. Estudio de caso "Melanio Hernández". (Tesis Doctoral). Universidad de Girona. España
5. González, C., Durán, S., Sánchez, J., Coronado, A., Martínez, J. (2019). Separación sólido - gas. Universidad Nacional Autónoma de México. México.
6. González, M. (2015). La agroindustria cañera cubana: transformaciones recientes. New York Bildner Center. USA
7. Gutiérrez-López, M., Perea, N., Rodríguez, J. (2014). Adaptación de herramientas de gestión para la estimación y seguimiento del material particulado en una caldera bagacera. *Energética*, 43, 59-65.
8. Hernández, A., Reynosa, M., Hernández, F., Canciano, J. (2019). Emisión de contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros santiagueros. *Tecnología Química*, 39 (2), 390-402.
9. Hernández, A., Reynosa, M., Hernández, F., (2017). Contaminantes atmosféricos procedentes de centrales azucareros avileños. *Universidad&Ciencia*, 6 (2), 17-26.
10. Jiménez, R., Valdés, A., Díaz, D., Rabassa, D. (2020). Análisis energético para la combustión de bagazo en un central azucarero. *Revista Cubana de Ingeniería*, 11 (3), 43-53.
11. Morales Tobón, C. (2016). Diseño de sistema de extracción de partículas en suspensión en el área de procesamiento de grasas. (Trabajo de Diploma). Universidad de San Carlos de Guatemala. Guatemala.
12. Orellana, J., Rivas, J., Vélez, J. (2009). Aplicación de un modelo de dispersión de material particulado generado en calderas bagaceras. Facultad de Ingeniería y Arquitectura. Universidad Centroamericana "José Simeón Canas". El Salvador.
13. Shah, S., Soomar, M., Hussain, A. (2016) Comparative Emission Analysis of Bituminous Coal, Sugarcane Bagasse and Rice Husk. *Sindh University Research Journal-SURJ (Science Series)*, 48 (3), 685-688.
14. Torres, A., Almazán, O. y Hernández, B. (2015) Estudio de factibilidad económica de un proyecto de generación eléctrica, a partir de la gasificación de bagazo en un central azucarero cubano. *Revista Centro Azúcar*, 42 (1), 1-8.
15. UNAM (2020). Procesos de separación. Universidad Nacional Autónoma de México. México.