

# **Comparación de las propiedades que influyen en la combustión entre el fly ash, carbón y diferentes derivados del petróleo**

**Anali Machado<sup>1</sup>, Cezar García<sup>2</sup>, Yolanda Rincón<sup>1</sup>, Neyma García<sup>1</sup>, José González<sup>3</sup> y Juan Hernández<sup>3</sup>**

<sup>1</sup>Centro CEDEGAS, Facultad de Ingeniería, La Universidad del Zulia  
Apartado postal 526, Maracaibo 4001-A, Venezuela  
e-mail: analimachado@yahoo.com

<sup>2</sup>Escuela de Ingeniería Química, Universidad Rafael Urdaneta

<sup>3</sup>Escuela de Ingeniería Química. Universidad del Zulia

Recibido: 29-07-11 Aceptado: 16-09-11

## **Resumen**

En el presente trabajo se realiza un estudio comparativo de las propiedades físico – químicas que tienen una mayor influencia en los procesos de combustión, con el propósito de evaluar la calidad combustible de las cenizas volantes o “fly ash” producto de la combustión primaria del “Fuel Oil” residual No. 6, el cual es empleado en la generación de vapor de agua en las plantas termoeléctricas. Para tal fin se comparan las propiedades de este combustible con las que presentan varios yacimientos de carbón venezolano y algunos hidrocarburos tales como kerosén, gasoil (liviano, mediano y pesado, “Fuel Oil”). Entre las propiedades analizadas se encuentran para el carbón y “fly ash”: el contenido de azufre, cenizas, materia volátil, fusibilidad, análisis mineralógico, mientras que el análisis de los hidrocarburos incluye: sedimento, agua, poder calorífico, viscosidad, gravedad específica, punto de inflamación y relación carbono-hidrógeno. Los resultados permiten constatar que el “fly ash” resulta una alternativa viable como sustituto o en mezclas con los derivados del petróleo en los procesos de combustión.

**Palabras clave:** fly ash, combustibles sólidos, hidrocarburos, combustión.

## **Comparison of the properties that influence in the combustion among the fly ash, coal and different derived of the petroleum**

### **Abstract**

This study compared the fly ash’s physical and chemical properties that have mayor influence in the combustion process, with other fuels like coal from several Venezuelan reservoir, and hydrocarbons like kerosene, gasoil (light, intermediate and heavy). The objective is to evaluate the quality of residual fuel oil No. 6 (Fly Ash), used for steam generation in thermoelectric power plants. Among the analyzed properties for coal and fly ash are: sulfur content, ashes, volatile matter, fusibility, mineralogical analysis; and for the hydrocarbons were included: sediments, water content, heating value, specific gravity, flammability and carbon-hydrogen ratio. The results allow

to verify that the fly ash is a feasible alternative as a substitute or as an additive for hydrocarbon fuels to improve the combustion process.

**Key words:** fly ash, solid fuels, hydrocarbons, combustion.

## Introducción

Estudios realizados por el Instituto para el Control y la Conservación de la Cuenca del Lago de Maracaibo (1) para los Municipios Maracaibo y San Francisco en un plan integral de monitoreo de Partículas Totales Suspendidas (PTS) y contaminantes específicos (como plomo, vanadio, níquel, mercurio, sulfato, nitrato), en áreas representativas de las fuentes industriales, residenciales y comerciales, muestran que existe un promedio de  $103 \mu\text{g}/\text{m}^3$  PTS en Maracaibo y  $105 \mu\text{g}/\text{m}^3$  PTS en San Francisco. Estas cantidades de partículas flotantes en el aire marabino sobrepasan el promedio indicado en el decreto 638, que especifican las Normas sobre la Calidad de Aire y Calidad Atmosférica, clasificando la atmósfera de la ciudad de Maracaibo como “ligeramente contaminada”. Luego, el problema no es sólo la cantidad de partículas, sino su naturaleza y composición, es decir, los elementos químicos que se derivan de empresas tales como la Petroquímica, la planta termoeléctrica ubicada en la ciudad de Maracaibo, la planta cementera y el puerto carbonífero ubicados en el municipio de San Francisco, entre otras (2,3,4,5,6).

La mayor parte de la electricidad producida en el mundo se genera mediante el proceso convencional de vapor, que consta, de tres etapas: la generación de calor a partir de la combustión de combustibles fósiles (carbón, gas natural o petróleo), la conversión del calor en vapor de alta presión capaz de realizar un trabajo mecánico y la conversión de trabajo mecánico en electricidad. El tipo y la cantidad de desechos generados en una planta de energía depende de la configuración, el tamaño y antigüedad de la planta, así como del tipo de combustible. Los desechos que pueden atribuirse directamente al proceso de generación de energía incluyen las emisiones a la atmósfera de óxidos nitrosos, óxidos sulfúricos y cenizas muy finas. Estas cenizas representan con frecuencia desde el 0,005% hasta el 0,05% del crudo original, todo concentrado en el residuo (7).

Aunque el sodio y el potasio son los constituyentes principales de las cenizas, son bastante comunes el níquel y el vanadio, particularmente en los residuos derivados de petróleo asfáltico (8,9). Los óxidos son corrosivos a temperaturas altas, como por ejemplo sobre los refractarios empleados para revestir los hogares de los hornos industriales y sobre los soportes de tubos de las calderas modernas de alta presión.

El fly ash (o ceniza volante) a estudiar es un subproducto de la combustión primaria del “Fuel oil” residual No. 6, utilizado éste en la generación de vapor de agua en las plantas termoeléctricas. Cada año se producen alrededor de 1000 toneladas de fly ash que son depositados en un relleno sanitario, convirtiéndose en un problema de salud pública.

De lo antes expuesto deriva la importancia del estudio de la caracterización físico-química del “fly ash” para evaluar la calidad combustible y de combustión del mismo, para un aprovechamiento energético de éste como una alternativa de reutilización másica y total del referido subproducto. Adicionalmente, permitirá la eliminación parcial de un desecho tóxico que afecta la salud humana.

Para llevar a cabo este estudio se evalúan las propiedades de contenido de azufre, cenizas, materia volátil, sedimento, poder calorífico, punto de inflamabilidad, fusibilidad, C/H (relación carbono – hidrógeno); utilizando para ello equipos especiales y siguiendo normas ASTM en la mayoría de los análisis.

El estudio de estas propiedades revisten gran importancia ya que permite comparar y evaluar el tipo y calidad del “fly ash” con otros combustibles utilizados comúnmente en los procesos de combustión. Adicionalmente, brinda información que podría emplearse para mejorar las características de combustión y predecir en un momento determinado cual hidrocarburo o cual tipo de combustible sólido presenta mejor comportamiento ante un proceso de combustión.

## Sección Experimental

### Muestras utilizadas

La muestra de ceniza volante fue recolectada de los filtros electrostáticos producto de la combustión primaria del Fuel Oil Residual N°6 (o Bunker C), utilizado éste en la generación de vapor de agua en la planta termoeléctrica “Planta Ramón Laguna” en Maracaibo, Estado Zulia. Una muestra proveniente de cada una de las unidades de combustión fue recolectada en bolsas de alta densidad (20 kg c/u), y fueron designada como muestra 1, muestra 2 y muestra 3.

Las muestras de carbón provienen de los yacimientos de Guasare - Edo. Zulia, Santo Domingo y Las Adjuntas del Edo. Táchira pertenecen al Manto IV (Bituminoso de alto volátil), Manto 20 (lignito) y Manto 20 (Bituminoso de alto volátil) respectivamente.

Es importante destacar que dentro de las sucesivas etapas en la formación del carbón el lignito es un carbón blando de color pardusco o negro con un bajo contenido en carbono; mientras que el carbón bituminoso es un carbón blando con un contenido más alto en carbono y más bajo en humedad que el carbón subbituminoso. La antracita es el carbón más rico en carbono y con menor contenido de humedad, es el de más alto valor energético (10).

Los derivados del petróleo utilizados fueron: kerosén, gas-oil (liviano, mediano y pesado) y fuel-oil.

### Metodología experimental

Para la determinación de la caracterización del carbón mineral y del fly ash se aplicaron los procedimientos experimentales señalados en las respectivas normas ASTM, así:

- La preparación del carbón y el fly ash se realizó según la norma A.S.T.M D-346 “Collection and preparing Coal Samples for Analysis”.
- Contenido de Humedad: se realiza de acuerdo a las condiciones especificadas por la norma ASTM D3173 – 87, “Standard Test Method for Moisture in the Analysis Sample of Coal and Coke”.
- Contenido de Cenizas: se realiza según la norma de ensayo A.S.T.M. D3174-97<sup>E1</sup> “Standard Method for ash in the Analysis Sample of Coal and Coke”.
- Contenido de Materia Volátil es realizado según la norma A.S.T.M D3175-89a “Test Method for Volatile Matter in the Analysis Sample of Coal and Coke”.
- Carbono fijo: se calcula por diferencia entre el 100% y los porcentajes de humedad, cenizas y materia volátil.
- Contenido de azufre se determina utilizando el método de la bomba calorimétrica A.S.T.M D3177-89, “Test Method for Total Sulfur in the Analysis Sample of Coal and Coke”.
- Poder Calorífico: el análisis se realiza de acuerdo a las condiciones establecidas en la norma A.S.T.M D-2015-96, “Test Method for Gross Calorific Value of Solid Fuel by Adiabatic Bomb Calorimeter”.
- Fusibilidad: realizada para el Fly Ash se efectúa de acuerdo a la norma A.S.T.M D1857-87 (1994), “Standard Test Method for Fusibility of Coal and Coke Ash”.
- Relación Carbono – Hidrógeno: se realiza para el carbón mediante la normativa A.S.T.M D-3178-89, “Carbon and Hydrogen in the Analysis Sample of Coal and Coke” y para el fly ash mediante el uso de la fórmula de SEYLER modificada la cual se presenta a continuación (11):

$$\%C = 1348,9978 + 15,3530*(VH) - 41,3550*(PC/100) - 0,3120*(VH)^2 + 0,2398*(PC/100)^2 + 0,1225*(PC/100)*(VH) \quad (1)$$

$$\%H = - 36,9520 - 3,2930*(VH) + 2,7351*(PC/100) + 0,03150*(VH)^2 - 0,0208*(PC/100)^2 + 0,0117*(VH)*(PC/100), \quad (2)$$

donde:

C: contenido de carbono calculado,  
H: contenido de hidrógeno calculado,  
VH: material volátil en base húmeda;  
PC: Poder calorífico experimental en cal/gr.

Para la determinación de las propiedades en los derivados del petróleo se aplicaron las siguientes normativas (12):

- Determinación de gravedad específica ASTM D1298.
- Poder calorífico se determina mediante el uso de fórmulas empíricas, las cuales han sido desarrolladas por el Instituto de Investigaciones Petroleras de La Universidad del Zulia (INPE-LUZ). Para la aplicación de dichas fórmulas se debe disponer de la Gravedad API y el % azufre en peso de las muestras. Las fórmulas para la determinación del poder calorífico se muestran a continuación:

$$Q_B = (17213 + 51,22D - 0,0506D^2) * (1 - 0,01S) + 43.75 \quad (3)$$

$$Q_p = 0,7195 * Q_B + 4310 \quad (4)$$

donde:

$Q_p$  : Poder calorífico (BTU/lb);  
 $Q_B$  : Poder calorífico bruto (BTU/lb);  
D: gravedad API;  
S: contenido de azufre en % en peso.

- Contenido de agua por destilación: se determina mediante la aplicación del método ASTM D95.
- Contenido de sedimento: mediante el método ASTM. D1796.
- Contenido de cenizas: aplicando el método ASTM. D482.
- Viscosidad cinemática: para este fin se aplica la normativa ASTM. D445/65.
- Punto de inflamación: por el método ASTM D93 “Método de Pensky – Martens Copa Cerrada).
- Relación carbono-hidrógeno: se determina mediante el método desarrollado en el Manual del Ingeniero Químico en el Capítulo V(13), el cual permite determinar el tanto por ciento de carbono e hidrógeno de los petróleos y de los productos que no han sido obtenidos por cracking, así como la relación carbono e hidrógeno en función de pesos específicos a 60°F.

## Resultados y discusión

A continuación se presentan las propiedades estudiadas en los tipos de combustibles, de las diferentes muestras analizadas. Las Tablas 1, 2 y 3 muestran las propiedades, la fusibilidad y el análisis mineralógico del combustible sólido, mientras que la Tabla 4 presenta las propiedades para los derivados del petróleo. Es importante destacar que todas las pruebas son repetidas para cada una de las muestras, como lo establece la norma aplicada en cada caso.

**Tabla 1. Comparación de propiedades de las muestras de fly ash y de diferentes yacimientos de carbón**

Muestra	Humedad	%Ceniza	%Material Volátil	% Azufre	Poder calorífico (kcal/kg)	Relación C-H
Promedio Fly ash	7,17	10,44	6,58	4,15	6.957	6.03
Guasare Manto IV Santo	7,00	7,50	34,50	0,60	7.030	14,79
Domingo Manto 20	15,20	10,06	46,02	0,68	6.324	14,61
Las Adjuntas Manto 20	3,35	4,42	39,66	0,63	8.191	13,39

Propiedades calculadas en Base Seca (bs)

**Tabla 2. Comparación de la fusibilidad de las muestras de fly ash y de diferentes yacimientos de carbón**

Muestra	Fusibilidad					
	Atmósfera reducida			Atmósfera oxidante		
	Temp. Deformación inicial (K)	Temp. Ablandamiento (K)	Temp. Fluidéz (K)	Temp. Deformación (K)	Temp. Ablandamiento (K)	Temp. Fluidéz (K)
Promedio Fly Ash	1755	1755	1755	1451	1482	1652
Guasare Manto IV Santo	1826	1866	1916	1856	1886	1946
Domingo Manto 20	1606	1747	1946	1606	1747	1946
Las Adjuntas Manto 20	1603	1613	1763	1643	1643	1773

**Tabla 3. Comparación del análisis mineralógico de las muestras de fly ash y de diferentes yacimientos de carbón**

Muestra	Análisis Mineralógico (%)									
	SiO <sub>2</sub>	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	TiO <sub>2</sub>	Fe <sub>2</sub> O <sub>3</sub>	CaO	MgO	K <sub>2</sub> O	Na <sub>2</sub> O	SO <sub>3</sub>	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>
Promedio Fly ash	0,95	---	---	1,12	0,35	5,50	---	---	---	---
Guasare Manto IV Santo	59,20	21,20	0,90	6,00	2,50	2,30	1,90	0,70	4,00	0,30
Domingo Manto 20	35,36	27,91	1,09	5,20	15,78	1,40	0,34	0,22	10,29	0,015
Las Adjuntas Manto 20	41,50	31,50	0,04	18,40	1,80	1,20	0,67	3,24	0,40	0,50

**Tabla 4. Comparación de propiedades promedio de los derivados hidrocarburos**

Propiedad	Kerosen	Gas-Oil Liviano	Gas-Oil Mediano	Gas-Oil Pesado	Fuel-Oil	Promedio
Gravedad Especifica	0,82	0,85	0,86	0,88	0,93	0,87
%Azufre	0,30	1,02	1,02	1,49	3,07	1,38
Poder Calorífico Kcal/Kg	11.503	11.170	11.152	10.914	10.431	11.034
% Agua	---	Trazas	Trazas	Trazas	0,50	---
%Sedimento	---	Trazas	Trazas	Trazas	0,50	---
% Ceniza	0,28	0,43	0,56	0,71	3,06	1,01
%\Pto.						
Inflamación K	318,56	345,17	347,17	353,83	355,22	343,99
Viscosidad a 310,78 K , en cSt	1,44	3,37	4,43	8,63	142,14	32,00
Viscosidad a 338,56 K, en cSt	1,05	2,15	2,45	4,21	38,55	9,68
Relación C-H	6,33	6,70	6,73	7,00	7,53	6,86

**Poder calorífico.** El criterio de valoración para un combustible desde el punto de vista económico, y por tanto industrial se fundamenta en el poder calorífico, que se define como la cantidad de calor que se produce en la combustión de una masa unitaria de combustible. Este en los combustibles sólidos esta directamente relacionado con el contenido de ceniza y permite determinar el rango del carbón. Los valores del poder calorífico van desde 900 Kcal./m<sup>3</sup> para el gas mas pobre hasta 11.000 Kcal./Kg. para la gasolina de automóvil e incluso más.

Como puede observarse en la Tabla 1, si se comparan los valores obtenidos del poder calorífico para el fly ash y el carbón se diferencian en aproximadamente 224,67 Kcal./Kg (es decir, en un 3,13 %), la cual puede considerarse realmente baja.

Los resultados obtenidos del poder calorífico para los diferentes derivados del petróleo están estrechamente relacionados con la gravedad específica, tal como puede observarse en la Tabla 4 donde el valor mas alto de poder calorífico (11.503 Kcal./Kg) corresponde al kerosén, el cual presenta el valor mas bajo de gravedad específica (0,82); y el valor más bajo de poder calorífico lo presenta el Fuel-Oil (10.431 Kcal./Kg) con alto valor de gravedad específica (0,93). Adicionalmente, la importancia de la gravedad específica de los productos petroleros, es debido a que la misma es ampliamente usada en el calculo de cantidades de masas, tasa de bombeo y similares, dando una indicación aproximada sobre las características del producto. En el carbón, la densidad varia entre 1,20 y 1,43, aumentando con el rango y el contenido de cenizas de éste; aproximadamente 0,01 por cada 1% de aumento de ceniza.

**Humedad.** La presencia de agua determina circunstancias especiales en la mayoría de los procesos a que se somete el carbón. En la gasificación actúa como elemento activo en las reacciones. Durante la combustión espontánea la presencia de agua tiene una influencia positiva, ya que al evaporarse ésta provoca un aumento de temperatura que favorece la combustión. Al analizar la Tabla 1 se observa que el carbón presenta un bajo contenido de humedad cuyo promedio es de 8,52% y en el caso del fly ash se tiene un contenido de humedad muy cercano al del carbón, el cual es de 7,17%.

En los derivados del petróleo es sumamente importante conocer el contenido de agua porque ella forma emulsiones con éstos, alterando su verdadero volumen. Por otra parte, el agua contiene generalmente materias inorgánicas disueltas o en suspensión, que pueden producir cenizas, en particular cloruro de sodio y magnesio. Estos podrían causar graves corrosiones en los equipos que se utilicen. En la Tabla 4 puede apreciarse que el contenido de agua en los derivados del petróleo solamente es apreciable para el Fuel-Oil (0,5%), lo que es bastante satisfactorio ya que por una parte el agua en exceso de 1,0%v contribuye a disminuir el poder calorífico y encarece el transporte del combustible. Este resultado era el esperado ya que las muestras son obtenidas después del proceso de deshidratación.

**Cenizas.** El contenido de cenizas, tanto en los combustibles sólidos como líquidos, es el residuo inorgánico remanente después de su combustión completa. Esto no puede ser identificado en composición y en cantidad, antes de la combustión. El porcentaje de ceniza refleja la cantidad de poder calorífico que un carbón (en el caso de combustible sólido) puede poseer e indirectamente la cantidad de material mineral del carbón. Las cenizas dan una indicación del índice de “suciedad” del carbón, es decir, si requiere algún tratamiento o beneficio. En los combustibles sólidos el porcentaje de ceniza en combinación con su temperatura de fusión y el análisis mineralógico permite establecer la calidad del mismo como combustible. Entre los elementos más comunes en las cenizas se encuentran: compuestos de silicio, hierro, calcio, sodio, vanadio y otros.

Como puede observarse en la Tabla 1, el contenido de ceniza en el Fly Ash es alto (10,44%), valor esperado debido a que el mismo es producto de un proceso previo de combustión del Fuel Oil, el cual adicionalmente dentro de los derivados hidrocarburos estudiados es el que presenta mayor cantidad de cenizas. En los carbones analizados, el contenido de ceniza (7,32%) es alto, sin embargo esto es debido a que presenta una gran variabilidad dependiendo de su origen, obteniendo el valor mas bajo para el yacimiento de Las Adjuntas (4,42%) y el más alto para Santo Domingo (10,06%). Comparando el carbón con el fly ash se observa que este último presenta un valor promedio de 10,44%, lo que representa una diferencia de aproximadamente un 30% más de ceniza.

Al analizar los derivados del petróleo, los resultados indican que el contenido de cenizas presente en los derivados del petróleo (1,01%), es relativamente bajo excepto el fuel oil, cuyo contenido de cenizas es de 3,07%.

**Materia volátil.** La determinación de materia volátil es importante en un análisis de carbón, ya que este se usa como un parámetro en ciertos sistemas de clasificación y en la evaluación de carbones para combustión y coquización, por lo cual se ha aceptado frecuentemente como índice de la categoría y clase del carbón. Adicionalmente, se relaciona con el poder calorífico del carbón.

En este caso, permite comparar el fly ash con este combustible, el cual presenta un contenido de materia volátil de 6,58% (Base seca). Con este contenido de material volátil puede compararse el fly ash con el carbón antracita (8% materias volátiles) (14). Este valor del fly ash era de esperarse ya que se trata de un producto de un proceso de combustión primaria. Las muestras de carbón analizadas presentan un alto contenido de materia volátil, comprendido entre 34,50 y 39,66 %, lo que clasifica a este carbón venezolano como lignito y bituminoso.

**Contenido de azufre.** Este parámetro es de gran importancia, debido a que en la actualidad, existen restricciones en cuanto a su contenido por normativas legales anticontaminación vigentes en los países industrializados. El contenido de azufre es una de las propiedades de las cuales dependen más directamente el valor o precio de los combustibles residuales. Por lo antes expuesto, es importante conocer con exactitud el contenido de azufre en el carbón, así como también en los derivados del petróleo.

Si se analiza el porcentaje de azufre promedio en el carbón presente en los mantos estudiados (0,50%), se observa que el valor es bajo, lo cual los hace poseedores de una alta pureza. En el caso del fly ash, éste presenta un promedio de 4,15% (base seca), el cual es muy cercano al presente en el Fuel Oil (3,07%), combustible del cual se produce el fly ash.

**Análisis mineralógico.** Este análisis permite determinar los elementos presentes en las cenizas del carbón, utilizando la técnica de espectrofotometría de absorción atómica. Los elementos determinados como óxidos son:  $\text{SiO}_2$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$  y  $\text{TiO}_2$  que constituyen los elementos de carácter ácidos;  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ,  $\text{CaO}$ ,  $\text{MgO}$ ,  $\text{Na}_2\text{O}$ ,  $\text{K}_2\text{O}$ , representan el contenido básico de las cenizas y  $\text{P}_2\text{O}_5$  y  $\text{SO}_3$ .

Los resultados obtenidos (Tabla 3), muestran que las cenizas de los carbones tienen carácter ácido con valores entre (73,04 y 64,36). De éstos, Guasare tuvo el mayor valor, por ser un bituminoso de alto volátil con mayor grado de evolución, mientras que el fly ash cuenta con un muy bajo contenido de  $\text{SiO}_2$ . La concentración de álcalis ( $\text{Na}_2\text{O} + \text{K}_2\text{O}$ ) es baja y aún menor en el fly ash, por lo cual no se esperaría problemas de atascamiento de las cenizas, excepto en Las Adjuntas ( $\text{Na}_2\text{O} = 3,24$ ). El porcentaje de óxido férrico y fósforo es también bajo para el fly ash y para las muestras de carbón a excepción del carbón de Las Adjuntas ( $\text{Fe}_2\text{O}_3 = 18,40$ ) y (fósforo = 0,50), lo cual podría ocasionar incrustaciones en los en los sistemas de combustión cuando se emplee este último.

En relación al  $\text{CaO}$  se observa que Guasare, Las Adjuntas y el fly ash presentan valores bajos; sin embargo, el carbón de Santo Domingo se observó un alto contenido, el cual contribuye al problema de la formación de  $\text{CaSO}_4$  que sirve como agente enlazante o de unión de las partículas de cenizas volantes (15).

La muestra de fly ash tiene alto contenido de  $\text{MgO}$  (9,355), lo cual disminuye la formación de  $\text{SO}_3$ , previniendo la formación de depósitos corrosivos (15).

**Temperatura de fusión:** La determinación de las temperaturas de fusión de las cenizas es un parámetro de gran importancia para la clasificación como material energético y para la ingeniería de combustión (16). Estas temperaturas son determinadas en ambiente oxidante y en medio reductor.

Generalmente las temperaturas de fusibilidad en atmósfera oxidante son más elevadas, que las temperaturas en ambiente reductor, sin embargo para el fly ash se observó el efecto contrario, esto debido probablemente al bajo contenido de silicio (promedio 0,95%).

Comparando el contenido mineralógico de las cenizas y las temperaturas de fusibilidad de cenizas se comprobó una estrecha relación, así el carbón de Guasare presenta las mayores temperaturas de fusión y el mayor contenido de  $\text{SiO}_2$ .

**Contenido de sedimento.** En los derivados del petróleo el contenido de sedimento encarece el transporte y contribuye en el aumento del contenido de sólidos que se forman durante la combustión. Los sedimentos contribuyen notablemente a obstruir los quemadores y ensuciar los tanques de almacenamiento. Es uno de los factores de mayor importancia para el bombeo pues se presencia contribuye al daño de dicho equipos. Es importante destacar que el contenido de sedimento en los derivados del petróleo fue bajo, solo existiendo un 0,5% en el fuel oil, valor que era de esperarse debido al proceso de producción del mismo.

**Viscosidad.** En los combustibles, la viscosidad es de gran importancia porque de ella depende la factibilidad de bombeo y de la mayor o menor facilidad con que se atomiza en los quemadores. La viscosidad, adicionalmente, se utiliza como referencia para fijar el valor de exportación de los combustibles destilados y residuales. El fuel oil fue el combustible con mayor viscosidad, tal como era de esperarse.

**Punto de inflamación.** En general, cuanto más bajo sea dicho punto de inflamación, mayor será la posibilidad de incendio durante el almacenamiento en tanque por efecto de una chispa o de una llama. Los puntos de inflamación de los derivados del petróleo varía considerablemente. Los puntos normales de inflamación del kerosén, varían de 42 a 45°C. El aceite combustible y el gasoil tienen punto de inflamación que varía desde 65 hasta 801°C. En el caso del carbón, el término más comúnmente empleado es "inflamabilidad", la cual tiene gran importancia en la combustión de éste. La inflamabilidad en la hulla aumenta con su cantidad de materia volátil en la turba y el lignito disminuye por su gran cantidad de agua. En el caso del fly ash se ha determinado que su punto de inflamabilidad es mayor de los 100°C. Los

valores del punto inflamación obtenidos en los derivados del petróleo: kerosén (114 F), gas-oil (liviano 161.9 F; mediano 165.5 F, pesado 177,5 F) y el fuel- oil (180F), son aceptables de acuerdo a las especificaciones del Ministerio del Poder Popular para la Energía y el Petróleo.

## Conclusiones

Al realizar el estudio de las diferentes propiedades puede llegarse a las siguientes conclusiones:

1. Si se compara el poder calorífico del fly ash con el generado por el carbón se observa que existe una diferencia del 3,13%, por lo que podría definirse el fly ash como un combustible. Adicionalmente si se compara el poder calorífico con los derivados del petróleo se puede apreciar que su diferencia es de aproximadamente 4077 Kcal/Kg, la cual es relativamente baja; como consecuencia se les puede utilizar indistintamente en los procesos de combustión (como fuerza motriz, para calentar o producir vapor), el fly ash como combustible.
2. Los carbones tienen alto contenido de volátiles comprendidos entre (34,50 - 46,02% b.s.). El contenido de cenizas es baja para Guasare y Las Adjuntas que pueden considerarse como carbones limpios. Santo Domingo presenta un mayor contenido (10,06%), considerándose como moderado-alto.
3. El bajo contenido de azufre (0.64%) que presenta el carbón le confiere gran ventaja en cuanto a los procesos de combustión se refiere, ya que la presencia de éste conlleva a la formación de anhídrido sulfuroso durante la combustión y eventualmente de ácido sulfúrico lo cual puede dar lugar a graves problemas de corrosión y de contaminación.
4. Las cenizas son de carácter ácido con predominio del silicio y el aluminio en el carbón; mientras que en el fly ash se observan bajos contenidos de sílice, hierro y calcio, por lo que disminuiría los problemas de incrustaciones en los sistemas de combustión y unión de las partículas de cenizas volantes, ya que no favorece la formación de  $\text{CaSO}_4$ . Los carbones de Santo Domingo y Guasare tienen una composición mineralógica más adecuada para uso energético que Las Adjuntas, el cual presentó mayor contenido de sodio y fósforo que podrían favorecer las incrustaciones sobre la superficie de las tuberías de los sistemas de combustión. Mientras que debido al alto contenido de MgO del fly ash, este puede prevenir la formación de depósitos corrosivos.
5. Las temperaturas de fusión de las cenizas son altas, lo cual cabe esperar dado los contenidos de silicio y aluminio y permite tener una idea sobre el proceso de remoción de cenizas como escoria sólida o fluida.
6. La gravedad específica juega un papel importante en el control de calidad de los combustibles, puesto que existe cierta correlación entre la gravedad específica y otras características de los productos derivados del petróleo. Así mientras más baja es la gravedad específica de un combustible más alto será su poder calorífico; esto se puede comprobar al comparar los resultados para los diferentes derivados del petróleo.
7. En general el contenido de cenizas presente en el carbón y en el fly ash es mayor que en los derivados del petróleo, tal como era de esperarse, ya que estos últimos son obtenidos a partir de una serie de procesos en los cuales se eliminan gran parte de los residuos minerales. Este alto contenido de cenizas presente en los combustibles sólidos trae como consecuencia que se depositen éstas en los equipos utilizados para su combustión.

## Agradecimiento

Los autores agradecen al Ing. Humberto Joleane de la SGS Venezuela S.A., por la colaboración prestada en la realización de esta investigación.

## Referencias bibliográficas

1. ICLAM. Evaluación de la calidad del aire en los municipios Maracaibo y San Francisco. Estado Zulia, Venezuela Niveles y Tendencias, 1991-1997, (1998), p. 77.
2. García N., Machado A., García C., Socorro E., Fernández H. y Granda N., Concentraciones atmosféricas de PTS y su contenido de metales en una zona adyacente a una planta de cemento, *Interciencia*, Vol. 27, N.º. 9, (2002), 476-481.
3. García C., Machado A., García N., Cárdenas C., González W., Martínez J. y Yabroudi S., Evaluación comparativa de la concentración de SO<sub>2</sub> vientos arriba de una planta termoeléctrica, *Rev. Tec. Ing. Univ.Zulia*, Vol. 26, N.º. 2, (2003), 78-92.
4. Machado A., García N., Cordova A., Linares M., Alaña J., Montiel V. y Huertas J., Determinación y estudio de dispersión de las Concentraciones de Monóxido de Carbono en la zona oeste de la ciudad de Maracaibo, Venezuela, *Multiciencias*, Vol. 7, N.º. 2, (2007), 115-125.
5. Machado A., García N., García C., Acosta L., Cordova A., Linares M., Giradoth D. y Velásquez H., Contaminación por metales (Pb, Zn, Ni y Cr) en aire, sedimentos viales y suelo en una zona de alto tráfico vehicular, *Revista Internacional de Contaminación Ambiental*, Vol. 24, N.º. 4, (2008), 171-182.
6. Orozco M., Distribución de partículas solidas en espacios abiertos por modelos de transferencia de masa, Trabajo de Grado, MSc. en Ingeniería Química, LUZ, Maracaibo, (2009), p. 99
7. Greise W y Stevens D., *Tecnología Química de Petróleo*, Ediciones Omega S.A., Barcelona, España, D64, Capitulo XII.
8. Piña L., Dorante E., García C., González J. y Martínez K., Efecto de las variables operacionales en la lixiviación acida de metales pesados en el Fly Ash, *Rev. Tec. Ing. Univ. Zulia*, Vol. 27, N.º. 1, (2004), 33-40.
9. González J., García C., Machado A., Rincón C., Villalobos E. y Martínez K., Concentración de vanadio y níquel en cenizas volantes por combustión controlada, *Interciencia*, Vol. 29, N.º. 9, (2009), 504-509.
10. Magnussen S., *Los Combustibles Fósiles. Rastros del pasado y problemas del futuro*, Boletín Paleontológico, Año 7, Vol. 39, (2009),35-39.
11. Añez B. y Gutiérrez H., Comprobación de la formula de Seyler para su aplicación en carbones zulianos, Trabajo Especial de Grado, LUZ, Maracaibo, (1981), p. 70.
12. Bermúdez M. y Romero J., Comparación de propiedades que influyen en la combustión entre el carbón zuliano y diferentes derivados del petróleo, Trabajo Especial de Grado, LUZ, Maracaibo, (1982), p.100.
13. *Manual del Ingeniero*. Academia Hutte de Berlín, Editorial Gustavo Gili S.A., Tercera Edición, Barcelona, (1980).
14. Severns W., Degler H. y Miles J., *La producción de energía mediante el vapor de agua, el aire y los gases*, Editorial Reverte S.A., Quinta Edición, Barcelona; España, (1975), 88-120.
15. Elliott M. (Editor), *Chemistry of Coal Utilization*, John Wiley and Sons, New York, (1981), 1389-1436.
16. Baumeister T., Avallone E.A. and Baumeister III T. (Editors), *Mark's standard handbook for mechanical engineers*. 10 th Edition. McGraw-Hill, New York, (1996), Chapter 7, 1-54.