

VARIABLES INFLUYENTES EN EL SECADO DISCONTINUO DEL CARBÓN ASISTIDO CON MICROONDAS

Influential variables in coal batch microwave drying

María Alvarado¹, Julio Mejía¹, Marley Vanegas-Chamorro¹, Richelieu Barranco², Luis Hernández³

¹ Universidad del Atlántico, Grupo de Investigación del Carbón, (GIC).

² Universidad de Nottingham

³ Carbones del Caribe S.A.

maryalvaradoiqad@gmail.com, iqjcmejia123@hotmail.com,

marleyvanegas@yahoo.com

Recibido 04/05/12, Aceptado 30/10/2012

RESUMEN

En este estudio se evalúa la influencia del tamaño de partícula, el tipo de carbón, el tiempo de operación y la energía microondas suministrada como variables influyentes en el proceso de secado del carbón mineral. Posteriormente, se compara el secado con microondas con el secado térmico del carbón en estufa convencional. Los resultados evidencian que con el secado en horno microonda se remueve hasta el 50% de la humedad contenida en el carbón en el 10% del tiempo requerido por la técnica convencional. Se encontró que el proceso microondas no afecta las propiedades de Índice de Hard Grove, poder calorífico y contenido de ceniza del carbón bajo las condiciones empleadas en esta investigación.

Palabras clave: Carbón, Microondas, Secado, Humedad.

ABSTRACT

This study evaluates the variables effect of particle size, coal type, operating time and microwave power level during the coal dewatering in a batch microwave process. The batch microwave coal drying was obtained at 300 and 500W of power and was compared with the muffle thermal drying at 80°C. The results show that batch microwave drying is able to remove the 50% of the contain moisture within the coal delaying 10% of the required time by muffle technique. Was found that microwave process do not affect Hard Grove Index, the Calorific Value, and the Ash content coal properties.

Keywords: Coal, Microwave, Dewatering, Moisture.

1. INTRODUCCIÓN

Las microondas son ondas electromagnéticas entre 300MHz y 300GHz. La frecuencia microonda que se emplea industrialmente corresponde a 2.45GHz. La diferencia en el método de transporte de energía desde la fuente de radiación microondas a la muestra comparada con los procesos convencionales sustenta el interés en el uso de las microondas para un amplio espectro de aplicaciones [1]. El método directo de absorción de la energía transferida por las microondas al material reduce los largos periodos de calentamiento y la pérdida energética del sistema al ambiente debido a la capacidad de penetración que

genera un calentamiento volumétrico de la muestra [2,3]. Lo anterior supone un incremento en los rendimientos del proceso [4].

Las partículas de carbón de tamaños mayores a 20 mm pueden secarse por técnicas convencionales logrando los niveles deseados al remover el agua superficial. Sin embargo, el secado por técnicas convencionales a fracciones más finas de carbón usualmente de tamaños de partícula menores a 0.5 mm no es efectivo, debido a que éstas retienen mayor contenido de humedad al poseer mayor área superficial [5,6].

El comportamiento de los materiales en presencia de la radiación microonda depende de su naturaleza, es así como pueden ser transparentes, absorber o reflejar la onda [7]. En el carbón se encuentran presentes diferentes compuestos por lo cual el calentamiento interior puede llegar a no ser uniforme. Las moléculas polares como el agua presentes en los materiales expuestos a radiación microondas se orientan en la dirección del campo eléctrico presente y debido a que éste oscila a la frecuencia de 2.45 GHz las moléculas son forzadas a realinearse constantemente produciendo fricción entre ellas y por ende el calentamiento volumétrico [8, 9], llegando a ser de esta manera un calentamiento selectivo e instantáneo [10].

En el ámbito de los materiales carbonosos se han realizado estudios con microondas especialmente para la síntesis de nuevos materiales [12], nanoestructuras de carbono [13,14,15], carbones grafiticos [16], soportes carbonosos de catalizadores [17], xerogeles de carbono [18], entre otros; también para la preparación [16,19,20,21], modificación [22] y regeneración de carbones activos [23,24,21], con implementación comercial en algunos casos, como ocurre con la regeneración del carbón activo utilizado en la Industria de extracción de oro [25]. Por otro lado, los procesos asistidos con microondas han facilitado la molienda de carbones [11], así como su desulfuración [26].

2. EXPERIMENTACIÓN

Con este estudio se intenta evaluar el efecto de la radiación microonda sobre el carbón de Bijao-Córdoba a escala de laboratorio y establecer condiciones razonables para sacarle el máximo provecho al poder calorífico de este combustible fósil. Para tal fin, se realizaron curvas de secado del carbón a diferentes potencias en un horno microondas por tandas y diferentes temperaturas en un horno por conducción o estufa. Se seleccionaron los mantos G, H y L de la mina de Bijao ubicada en el departamento de Córdoba, cuya caracterización en cuanto a porcentaje de humedad (%HT), de ceniza (%Ceniza) y azufre (%Azufre) así como el poder calorífico (PC) se presentan en la tabla 1.

Tabla 1. Propiedades de los carbones - análisis próximo
Table 1. Coal properties – proximate analyses

Manto	% HT	% Ceniza	% Azufre	PC (BTU/lb)
G	18,85	6,74	1,87	9.103
H	19,49	6,44	0,67	9.486
L	18,08	8,67	0,89	9.170

Para la ejecución de las pruebas se construyeron dos diseños de factoriales completos en el programa MINITAB®

cuyos órdenes experimentales fueron aleatorizados y corresponden a las corridas experimentales de modo discontinuo, en el horno por conducción o estufa y en horno microondas de 1000 W de potencia máxima a 2450 MHz de frecuencia. Para todos los experimentos se mantuvo como parámetro de operación 100 g de muestra y se realizaron en un recipiente de borosilicato cilíndrico de 90 mm de diámetro y 125 mm de altura. Las herramientas de medición de temperatura y masa se hicieron con un termómetro infrarrojo capaz de medir hasta 300°C y balanza analítica de dos cifras significativas.

3. RESULTADOS

En este apartado se presentan los resultados encontrados de remoción de humedad y temperatura alcanzada durante el secado asistido con microondas y en estufa teniendo en cuenta el tamaño de partícula y tiempo de operación.

3.1 Secado microondas

De los resultados obtenidos para los tres mantos no se encuentran diferencias estadísticamente representativas, por lo cual se construyeron las curvas de secado en función de los tamaños de partícula estudiados como se presenta en las figuras 1 y 2, para los niveles de potencia microondas del 30 y 50%, respectivamente.

En la figura 1 se presenta como para muestras de diferentes tamaños de partículas expuestas a una misma radiación durante un tiempo determinado, las partículas de mayor tamaño alcanzan porcentajes de humedad total menor que las de menor tamaño a lo largo del tiempo en que son expuestas a radiación microondas. Así mismo, las temperaturas más altas se obtienen en las muestras de tamaños de partícula mayores lo cual sustenta los efectos esperados en una aplicación de microondas como lo es la reducción del tiempo y calentamiento volumétrico. Lo anterior indica que existe una distancia de penetración donde se hace más efectivo el secado asistido por microondas y los fenómenos de transporte por difusión-conducción y convección de masa y energía, donde se espera que a mayor área superficial la transferencia sea más rápida, no gobiernan el proceso.

De la figura 1a se infiere que para la potencia del 30% es posible una pérdida de peso asociada a la remoción de humedad entre el 20 y 30% de la humedad total contenida en las partículas de carbón de diámetros mayores a 20 mm; para las partículas menores a 20mm se encontraron remociones de humedad menores al 20%. La temperatura alcanzada en promedio para los 8 minutos de operación es de 80±5°C (figura 1b).

Figura 1. Contorno para el secado con horno microondas por tandas al 30% de la potencia.
Figure 1. Contours for batch coal microwave drying at 30% power level.

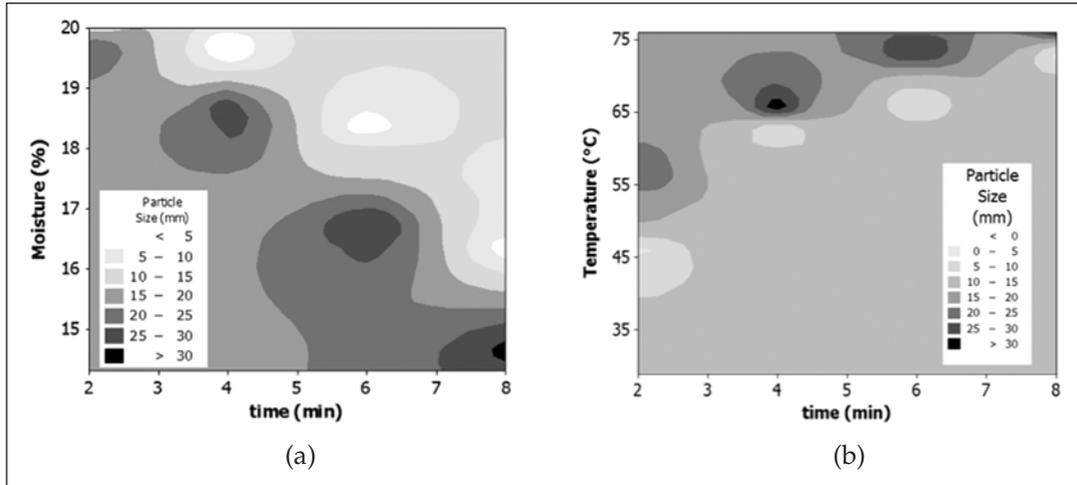
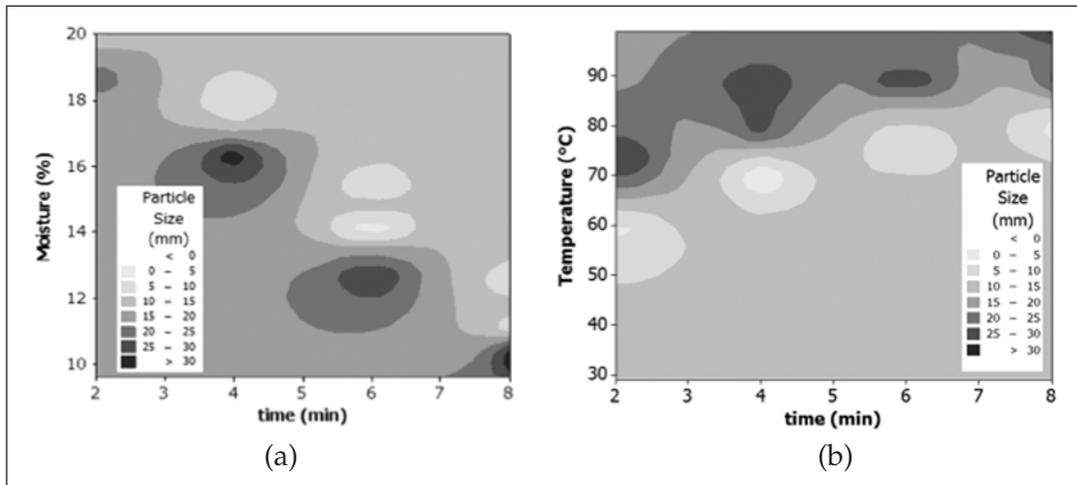


Figura 2. Contorno para el secado con horno microondas por tandas al 50% de la potencia
Figure 2. Contours for batch coal microwave drying at 50% power level



En la figura 2 se presenta la misma tendencia observada en la figura 1. Sin embargo, con el nivel de potencia del 50% es posible remover entre el 45 y 50% de la humedad contenida en el carbón alcanzando temperaturas de hasta $85 \pm 5^\circ\text{C}$. En ambos niveles de potencia se encontró que la mayor cantidad de humedad se remueve en las muestras que presentan los tamaños de partícula más grandes. Lo anterior concuerda con los resultados reportados por Tahmasebi (2011) donde el incremento de la velocidad de secado se da en las muestras de mayor tamaño, con mayor contenido de ceniza y los niveles más altos de potencia [27].

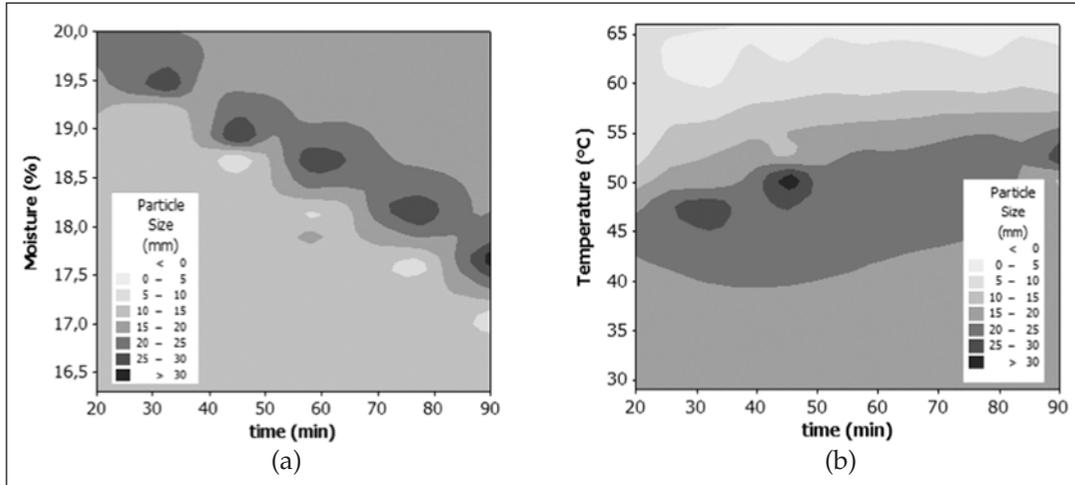
En esta investigación se encontró que en el proceso de secado con microonda se obtienen grandes beneficios de ahorro en tiempo, alcanzando una elevada eliminación de humedad. Es importante mencionar que el proceso de

radiación microonda requiere de mayor control ya que cuando se excede de tiempo de exposición de la muestra o potencia, el carbón sufre cambios desfavorables tales como oxidación, volatilización o ignición.

3.2 Secado en estufa

El secado en estufa se realizó programando previamente la temperatura del horno a 80°C . En la figura 3 se presentan las gráficas de contorno de la humedad y temperatura en función de los tamaños de partícula durante el tiempo de secado. En el secado en estufa se logra remover el 15% de la humedad contenida en el carbón y en 90 minutos se logra una temperatura máxima de 65°C en la superficie de la muestra, cuando la temperatura del hogar del horno se encuentra a 80°C , obtenido en las partículas más finas.

Figura 3. Contornos del porcentaje de humedad perdida para el secado en estufa
Figure 3. Contours of the percentage of moisture lost for drying in muffle



De la figura 3 se observa el comportamiento inverso al hallado en el secado microondas, es decir que las partículas de mayor tamaño presentan una menor remoción de humedad a través del tiempo con respecto a los tamaños menores. Lo anterior se explica debido a que el calentamiento en estufa se lleva a cabo por medio de fenómenos conductivos desde la superficie al interior de las partículas, requiriendo un mayor tiempo para alcanzar la temperatura adecuada para que el agua contenida se remueva [28]. Así mismo, las partículas de menor tamaño presentan mayor área de transferencia, por tanto alcanzan mayores temperaturas acelerando así la velocidad de secado.

3.3 Caracterización del carbón tratado en horno microondas

Se realizaron los análisis de humedad residual, poder calorífico y ceniza a las muestras tratadas en el horno microonda para los diferentes tamaños, en la tabla 2 se presentan los promedios obtenidos de los tres mantos y tamaños de partículas estudiadas. De esta se concluye que las muestras no presentan cambios significativos en cuanto al contenido de ceniza y poder calorífico, por lo cual la radiación microondas no alteró estas propiedades.

Tabla 2. Análisis próximos al carbón de Bijao – Córdoba
Table 2. Bijao - Cordoba coal proximate analyses

Tiempo (min)	0	4	8
Humedad (%)	19.60	15.85	12.34
P.Calórico (Cal/g)	5136	5173	5193
Cenizas (%)	7.28	7.62	7.01

El Índice Hard Grove (HGI) fue analizado para los mantos G, H y L de la mina de Bijao encontrando los valores de 33, 42 y 41±3 respectivamente, los cuales no varían para los rangos de tamaño de partícula estudiadas. Los resultados para las muestras expuestas al proceso de secado microondas no evidenciaron modificaciones en la facilidad relativa de pulverización de los carbones (HGI). Lo anterior probablemente se debe a que la intensidad de la radiación suministrada no logra producir cambios estructurales por reagrupaciones de los compuestos carbonosos durante la evaporación del agua contenida, ni por la polarización molecular de los compuestos absorbentes presentes en el carbón, como ya ha sido publicado en la literatura. Durante el proceso de secado, se ha reportado que las modificaciones estructurales se fundamentan en la rotura física del carbón lo cual reduce en un 50% la molturabilidad relativa al ser expuestos a 5 minutos de radiación microondas [11] y la desulfurización de las muestras [26].

4. CONCLUSIONES

- Se encontró que el secado discontinuo en estufa requiere de 90 minutos para lograr una remoción del 15% de la humedad contenida en el carbón de Bijao – Córdoba. Con el secado discontinuo en horno microondas, en 8 minutos se logra remover el 30 y 50% de la humedad operando a los niveles de potencia 30 y 50, respectivamente. Lo anterior evidencia que el secado microondas reduce 10 veces el tiempo de operación y logra rendimientos mayores al doble que el secado convencional.
- Por otra parte, se encontró que el tamaño de partícula es una variable influyente. Para el secado convencional las partículas de menor tamaño alcanzan mayo-

res temperaturas y remociones de humedad. Para el secado microondas el fenómeno es completamente inverso, las partículas de mayor tamaño remueven mayor contenido de humedad alcanzando las mayores temperaturas en la superficie.

- En las condiciones de operación estudiadas no se presentan cambios en el Índice de Hard Grove, poder calorífico y contenido de ceniza, por lo cual se presume que la mayor parte de radiación microondas la absorbe el agua contenida en la muestra y la densidad de ésta no posee la intensidad suficiente para modificar estas propiedades.

REFERENCIAS

- [1] Bélanger, J. M., Jocelyn Paré, J.R., Poon, O., Fairbridge, C., Ng, S., Mutyala, S., Hawkins, R., Remarks on Various Applications of Microwave Energy, *J. Microw. Power Electromagn. Energy*, 42(4), 24-44, 2008.
- [2] Mutyala, S., Fairbridge, C., Jocelyn Paré, J.R., Bélanger, J.M., Ng, S., Hawkins, R., Microwave applications to oil sands and petroleum: A review, *Fuel Process. Technol*, 91(2), 127-135, 2010.
- [3] Lester, E., and Kingman, S., The effect of microwave pre-heating on five different coals, *Fuel* 83,1941-1947, 2004.
- [4] Seehra, M.S., Kalra, A., Manivannan, A., Dewatering of fine coal slurries by selective heating with microwaves, *Fuel*, 86(5-6), 829-834, 2007.
- [5] Wilson, J.W., and Ding, Y., Ultra fine coal single-stage dewatering and briquetting process, *Society for Mining, Metallurgy and Exploration Transactions*, 298, 1921-1924, 1994.
- [6] Yang, J., Wang, X.H., Parekh, B.K., Improved techniques for dewatering of fine clean coal, *Mineral processing: Recent Advances and future trends*, 694-699, 1998.
- [7] Church, R.H., Webb, W.E., Salsman, J.B., Dielectric properties of low-loss minerals; U.S. Bureau of Mines, *Report of Investigations. Report 9*, 194, 1-13, 1988.
- [8] Beary, E.S., Comparison of microwave drying and conventional drying techniques for reference materials, *Anal. Chem.* 60, 742-746, 1988.
- [9] Metaxas, A.C., and Meredith, R.J., Industrial Microwave Heating. Peter Peregrinus Ltd., London, UK. 1983.
- [10] Perkin, R.M., The heat and mass transfer characteristics of boiling point drying using radio frequency and microwave electromagnetic fields, *Intl. J. of heat & mass transfer*, 23, 687-695. 1980.
- [11] Marland, S., Han, B., Merchant, A., Rowson, N. The effect of microwave radiation on coal grindability, *Fuel*, 79, 1283-1288, 2000.
- [12] Menéndez, J.A., Arenillas, A., Fidalgo, B., Fernández, Y., Zubizarreta, L., Calvo, E.G., Bermúdez, J.M., Microwave heating processes involving carbon materials, *Fuel Process. Technol*, 91, 1-8, 2010.
- [13] Méndez, U.O., Kharissova, O.V., Rodríguez, M., Synthesis and morphology of nanostructures via microwave heating, *Reviews on Advances Materials Science*, 5, 398-402, 2003.
- [14] Kharissova, O.V., Vertically aligned carbon nanotubes fabricated by microwaves. *Reviews on Advanced Materials Science*, 7, 50-54, 2004.
- [15] Fidalgo, B., Fernández, Y., Zubizarreta, L., Arenillas, A., Dominguez, A., Pis, J.J., Menéndez, J.A., Growth of nanofilaments on carbon based materials from microwave-assisted decomposition of CH₄. *Appl. Surf. Sci.*, 254, 3553-3557, 2008.
- [16] Harris, A.T., Deshpande, S., Kefeng, X., Synthesis of graphitic carbon particle chains at low temperature under microwave irradiation, *Mater. Lett.*, 63, 1390-1392, 2009.
- [17] Liu, Z., Guo, B., Hong, L., Lim, T.H., Microwave heated polyol synthesis of carbon-supported PtSn nanoparticles for methanol electrooxidation, *Electrochem. Commun.*, 8, 83-90, 2006.
- [18] Zubizarreta, L., Arenillas, A., Menéndez, J.A., Pis, J.J., Pirard, J.P., Job, N., Microwave drying as an effective method to obtain porous carbon xerogels. *J. Non-Cryst. Solids.*, 354, 4024-4026, 2008.
- [19] Lee, H.I., Kim, J.H., Joo, S.H., Chang, H., Seung, D., Joo, O.S., Suh, D.J., Ahn, W.S., Pak, C., Kim, J.M., Ultrafast production of ordered mesoporous carbons via microwave irradiation, *Carbon*, 45,2851-2854, 2007.
- [20] Li, W., Peng, J., Zhng, L., Yang, K., Xia, H., Zhang, S. *et al.*, Preparation of activated carbon from coconut shell chars in pilot-scale microwave heating equipment at 60 kW, *Waste Manage*, 29,756-760, 2009.
- [21] Yuen, F.K., Hameed, B.H., Recent developments in the preparation and regeneration of activated carbons by microwaves, *Adv. Colloid Interface Sci.*, 149, 19-27, 2009.
- [22] Menéndez, J.A., Menéndez, E.M., Iglesias, M.J., García, A., Pis, J.J., Modification of the surface chemistry of active carbons by means of microwave-induced treatments, *Carbon*, 37, 1115-1121, 1999.

- [23] Ania, C.O., Parra, J.B., Menéndez, J.A., Pis, J.J., Microwave-assisted regeneration of activated carbons loaded with pharmaceuticals, *Water Res.*, 41, 3299-3306, 2007.
- [24] Cherbanski, R., Molga, E., Intensification of desorption processes by use of microwaves – An overview of possible applications and industrial perspectives, *Chem. Eng. Process.*, 48, 48-58, 2009.
- [25] Bradshaw, S.M., Van Wyk, E.J., De Swardt, J.B., Microwave heating principles and the application to the regeneration of granular activated carbon, *J. S. Afr. Inst. Min. Metall.*, 98, 201-210, 1998.
- [26] Uslu, T., Atalay, Ü., Microwave heating of coal for enhanced magnetic removal of pyrite, *Fuel Process. Technol.*, 85, 21-29, 2004.
- [27] Tahmasebi, A., *et al.*, “Experimental study on microwave drying of Chinese and Indonesian low-rank coals,” *Fuel Process. Technol.*, 92, 1821-1829, 2011.
- [28] Treybal. Operaciones de Transferencia de Masa. Mc.Graw-Hill, 2a. Edición. México (1989).