

## TERMOGRAFÍA ACÚSTICA COMO APOYO COMPLEMENTARIO A LA TERMOGRAFÍA INFRAROJA

### AN ACOUSTIC THERMOGRAPHY AS AN ADDITIONAL SUPPORT TO INFRARED THERMOGRAPHY

*Rodney Ernesto Reyna Regnault*

Lic., Profesor Instructor del Departamento de Formación General y Ciencias Básicas.  
Universidad Simón Bolívar, Venezuela.  
rodneyr@usb.ve

*Carlos Eduardo González*

M.Sc. Profesor agregado Departamento de Física, Facultad de Ingeniería,  
Universidad Central de Venezuela, Venezuela.  
carlosgonzalezgg@gmail.com

**Fecha de recepción:** 3 de noviembre de 2010

**Fecha de aprobación:** 19 de mayo de 2011

### RESUMEN

El contraste en la termografía, se relaciona con diferencias de temperatura y de emisividad de las superficies estudiadas. Por lo general, el interés está en determinar las temperaturas y poder compensar parcialmente el efecto de la emisividad. Las reflexiones en la superficie de partes del sistema de las radiaciones que provienen de otra parte del mismo, así como el efecto de flujos convectivos, representan inconvenientes que dificultan la interpretación de las imágenes termográficas de los Ensayos no Destructivos. En el presente trabajo, se desarrolló un sistema de adquisición de datos para generar imágenes de termografía acústica en el plano bidimensional, de manera que se pueda identificar los efectos de reflexión de flujos convectivos, como también complementar la interpretación de las imágenes obtenidas mediante la termografía infrarroja. Para capturar datos acústicos, se utilizaron transductores ultrasónicos de 40kHz y fue posible obtener la distribución de temperatura, en condiciones estacionarias de la convección del aire caliente (gas), que se generan de los elementos calefactores cerca de la superficie.

**Palabras clave:** termografía acústica, termografía infrarroja, flujo de gas.

### ABSTRACT

A contrast in thermography is related to variations in temperature and emissions of surfaces analyzed. Typically, the interest focuses on temperature profiles, but they

may be partly biased by the emissivity effect. Reflections on surface of system parts with radiation coming from other inner places as well as the effect of convective flows represent problems hindering a reading of thermal images in *non-destructive tests*. In this paper we developed a data acquisition system for 2D acoustic thermography to identify the effect of a convective flow reflection and complement the reading of images got by infrared thermography. So 40-kHz ultrasonic transducers were used to capture acoustic data, and we could obtain the temperature distribution in stationary conditions by hot air –gas– convection generated from heating components near surface.

**Key words:** acoustic thermography, infrared thermography, gas flow.

## INTRODUCCIÓN

La termografía es una técnica que permite medir temperaturas a distancia y sin necesidad de contacto físico con el objeto por estudiar. Con la captación de la radiación infrarroja del espectro electromagnético, utilizando cámaras termográficas, se puede convertir la energía irradiada en información sobre temperatura y emisividad.

Con respecto de la termografía acústica, se han realizado trabajos como el de la técnica Acusto Eco-Ultrasónica (AU-E), desarrollada con base en los principios de reflexión de ondas de tensión [1]. El sistema corrige el efecto de la temperatura en la velocidad de las ondas a través del sólido para calcular en forma precisa, el espesor del refractario de un horno. La técnica AU-E también permite determinar la ubicación de ciertas anomalías, tales como el desgaste del revestimiento, fisuras y otras que se producen al interior de la estructura del refractario [2].

Hay investigaciones en las cuales la Termografía infrarroja se ha empleado en trabajos que se necesitan varias aplicaciones, especialmente aquellos que requieren determinar la distribución de temperatura y una imagen cualitativa, por ejemplo: los procesos de control de producción o la inspección de aislamiento térmico [3].

Ning Zhu [4], empleó el ultrasonido para aplicaciones termográficas, utilizando los cambios de temperatura para generar imágenes tridimensionales tomográficas. Así mismo, entre las aplicaciones de la termografía infrarroja y ultrasónica, está la evaluación de riesgo de caída de los árboles en pie (estudios fitosanitarios de alineaciones urbanas). Esta técnica permite determinar y localizar con gran exactitud, defectos y huecos internos en el árbol [5].

En la termografía basada en radiaciones infrarrojas, la radiación emitida por la capa de aire contigua a la superficie del objeto estudiado, aunque afecta la imagen

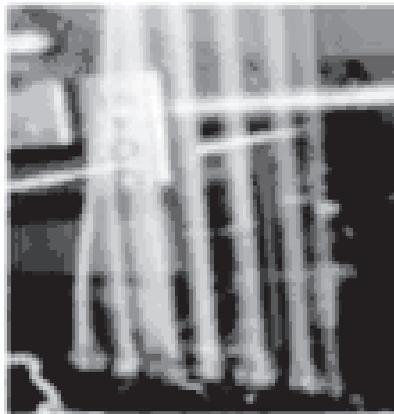
termográfica por la baja densidad del aire, en la termografía infrarroja no se puede apreciar la temperatura del aire mismo. Al utilizar ondas acústicas en el aire, es posible realizar la imagen de las capas de aire en la proximidad del objeto, aplicando las modificaciones del tiempo que demora un pulso acústico en atravesar un "camino acústico" particular, para lo cual se utiliza la técnica pulso - eco, que se combina con el corrimiento de fase.

La finalidad del sistema desarrollado se aplica al efecto físico de reflexión del haz ultrasónico en superficies con contraste de temperatura, para generar sonogramas o termografía acústica, para obtener imágenes correspondientes a barridos cartesianos X – Y, para flujo convectivo laminar de gas en un elementos calefactor. Lo anterior como apoyo complementario de la termografía convencional en ensayos no destructivos.

## 1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL.

### 1.1 Elemento calefactor

A continuación, se muestra el elemento calefactor de Constantán que se utilizó para las inspecciones térmicas, y es una aleación formada por un 55% de cobre y un 45% de níquel (Cu55Ni45), con un trazador para inspección visual de humo con aceite lubricante mineral para comprobar el trazo del gas (aire caliente), que se muestra en flujo laminar en la Figura 1.



**Figura 1.** Prueba de flujo laminar con trazadores de aceite lubricante mineral

**Número de Reynolds.** Para determinar el número de Reynolds se estableció la velocidad con la expresión del flujo de gas que sale de una chimenea (elemento calefactor), con la siguiente expresión 1 [6]:

$$v = \left[ 2gH \left( \left( \frac{T_g}{T_a} \right) - 1 \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad (1)$$

Donde:

$v$ : Velocidad teórica de los gases en m/s

$g$ :  $9.81 \text{ m/s}^2$

$H$ : Altura de la chimenea, en m.

$T_g$ : Temperatura absoluta de los gases en la entrada de la chimenea, °K.

$T_a$ : Temperatura absoluta del aire exterior °K

Y luego se utilizó la ecuación  $R_e = \frac{v_s D}{\nu}$  (2) para determinar el número de Reynolds

donde se tomó una celda convectiva para cada caso de las imágenes de termografía acústica, y que tomada una bobina por cada elemento calefactor (tabla 1), como chimenea ya que estas se componen de múltiples bobinas (figura 1).

**Tabla 1.** Especificación de una de las bobinas de los elementos calefactores

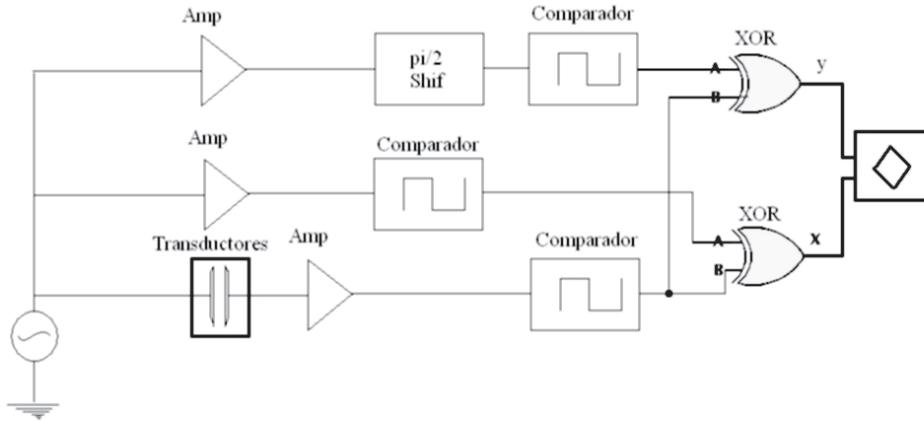
Altura (m)	Diámetro(m)	Espesor(m)	Velocidad promedio del fluido (m/s)
$5,00 \times 10^{-3}$	$4,00 \times 10^{-3}$	0,25	0,31

## 1.2 Transductores y Sistema de Barridos

Los transductores empleados en este trabajo de investigación, fueron del tipo piezoeléctrico de  $f$ : 40 KHz, diámetro efectivo de 8 mm y una zona de campo cercano a 2 mm; la resolución espacial, determinada en base a la interacción con objetos densos, de bordes definidos, es de 5 mm.

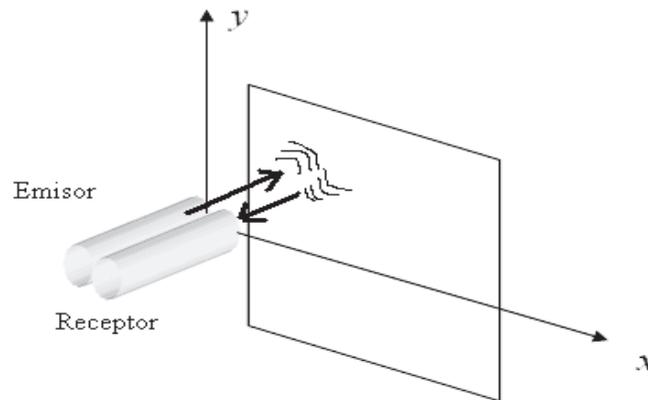
## 1.3 Corrimiento de Fase

Para obtener el desfase de una señal a otra, se empleó un circuito de corrimiento de fase como se muestra en la figura 2 del diagrama de bloques, que se compuso con un comparador quad (comparador BA10339), que contiene cuatro circuitos comparadores de voltaje independiente conectados a los terminales externos; cada comparador contó con entradas inversoras y no inversoras. El voltaje de alimentación de 5 voltios aplicado sobre el par de terminales, alimentó los tres comparadores que se utilizaron, una vez que la señal de entrada se elevó por encima de 0 voltios la salida conmutó a  $V^+$ , y cuando la entrada descendió por debajo de 0 V la salida cambió a  $V^-$ .



**Figura 2.** Diagrama de bloques del circuito de corrimiento de fase del ultrasonido

En el circuito también se empleó la compuerta lógica Or exclusiva o XOR (SN74L), para el comparador y los respectivos amplificadores operacionales UA741. Un generador de frecuencia se empleó para producir una señal en el piezoeléctrico, utilizándolo en el transductor, y se produjo una señal ultrasónica que va del emisor al receptor (figura 3), atravesando el gas (aire), en régimen estacionario. La señal eléctrica del generador de frecuencia se usó como señal de referencia por el comparador de fase.



**Figura 3.** Representación esquemática del montaje experimental de los dos grados de libertad

Las ondas sinusoidales detectadas por el receptor, son amplificadas por el amplificador operacional (UA741), y convertidas en ondas cuadradas por el (BA10339), que se usaron como señales de referencia. Las dos señales están en diferentes fases y entran en las compuertas lógicas (logic gate), XOR, del SN74LS86. Estas compuertas produjeron señales de pulso con una anchura correspondiente al cambio de fase a través de las dos señales, no en términos de

seno y coseno, sino en valores de mínimo y máximo voltaje, dando como resultado una señal de tipo rómbica.

La señal antes mencionada, es función lineal con respecto de media longitud de onda de los transductores. Al detectar cada valor de voltaje, se traduce en variaciones de longitud de onda, de donde se obtiene la velocidad del ultrasonido con la expresión 3 en el gas y luego, determina temperatura por su relación proporcional.

$$v = \sqrt{\frac{\gamma RT}{M}} \quad (3)$$

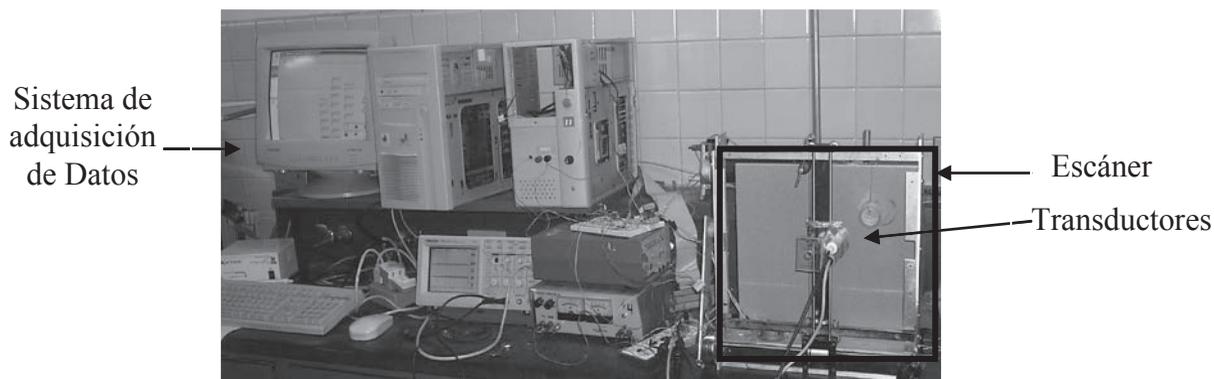
Donde:

$\gamma = 1,4$  coeficiente de dilatación adiabática

$R = 8,314 \text{ [J/Mol.K]} = 8,314 \text{ [kg.m}^2\text{/mol.K.s}^2\text{]}$

$M = 29 \text{ [g/mol]}$  para el aire

En la parte lateral derecha de la figura 4 se aprecia el escáner de barrido cartesiano en modo pulso – eco, perpendicular y paralela a una superficie plana con contraste de temperatura. La onda acústica se refleja en la superficie sólida, pero también se refleja y se refracta al pasar a través de las capas de aire que tienen diferentes temperaturas, y el objeto de referencia.



**Figura 4.** Montaje experimental

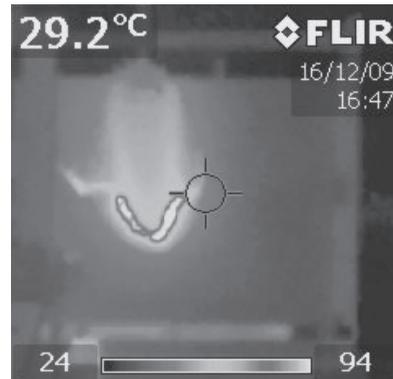
## 2. ANALISIS DE LOS RESULTADOS

Los barridos se realizaron como se presentó en el procedimiento experimental de manera cartesiana, con una incertidumbre implícita de  $0,5 \text{ }^\circ\text{K}$ . Las imágenes se presentan en diferentes tonalidades, el rango de temperatura de la termografía infrarroja no corresponde al régimen estacionario del gradiente de temperatura, sino

al calentamiento inicial motivado para que las altas temperaturas sobrepasen el rango de la cámara termográfica que existía.

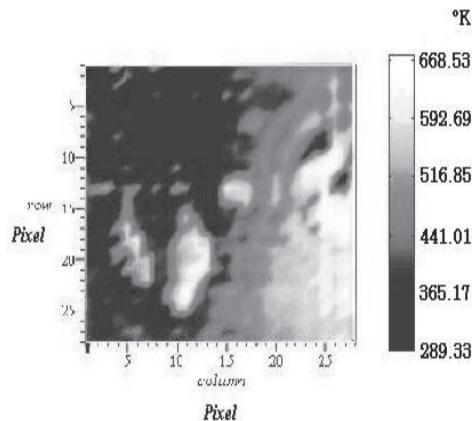


**Figura 5(a).** Probeta en forma de "v" colocada verticalmente.



**Figura 5(b).** Imagen termográfica convencional.

En la figura 5(c), el escáner se coloca de manera vertical, se utiliza otra vez el mismo elemento calefactor y se dobla en forma de "v"; en la termografía acústica se observa el gas (aire caliente) que se desprende; y el diámetro del elemento calefactor tiene la misma medida del diámetro de la longitud de onda del ultrasonido, y el flujo de gas que se desprende por convección de la superficie (tabla 2) es detectado por el sistema de adquisición datos por corrimiento de fase por reflexión.



**Figura 5(c).** Imagen de termografía acústica.

En la imagen de termografía acústica figura 5(c), se aprecia la distribución del gradiente de temperatura del gas con apariencia en forma de "v"; en la parte derecha de la termografía, está la deformidad del cerámico con la referencia, que da por eco ultrasónico, una diferencia de fase que parece ser temperatura, pero no lo es, lo cual se debe al haz que incide sobre la cinta adhesiva, genera un cambio de fase por la

disminución del tiempo de vuelo del haz ultrasónico, y la producción de ecos, las imágenes no guardan la misma escala.

**Tabla 2.** Valores de distribución de temperatura máxima y mínima.

Tmax (°K)	Tmin (°K)	Re para Tmax	Datos
669	289	27	784

Tmax: temperatura máxima en grados kelvin

Tmin: temperatura mínima en grados kelvin

Re: número de Reynolds.

En la tabla 3, se observa el número de Grashof (Gr), de 74859, que viene a ser el cociente entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas que actuaron en el gas, y se encuentra en un rango teórico de  $10^3$  hasta  $10^6$  para flujo laminar; el número de Rayleigh (Ra), superó el valor crítico de  $1708 \pm 50$  (tabla 3), indicando que las fuerzas de flotamiento sobrepasan los efectos disipativos del arrastre viscoso y la difusión térmica, produciendo la convección del gas (aire caliente), en el sistema experimental (tabla 3), siendo para el parámetro adimensional en el orden para el régimen laminar de  $10^4$  hasta  $10^9$  aproximadamente.

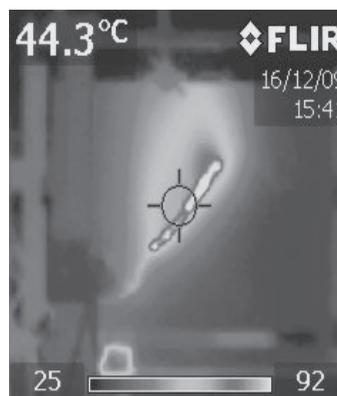
**Tabla 3.** Valores de viscosidad y números adimensionales

Nº Prandtl(Pr)	Nº Grashof(Gr)	Nº Rayleigh (Ra)
0,70	74859	52401

El número de Prandtl no varía significativamente en relación con la temperatura y su valor característico 0.70 para gases; este es un número adimensional proporcional al cociente entre la difusividad del momento (viscosidad), y la difusividad térmica.



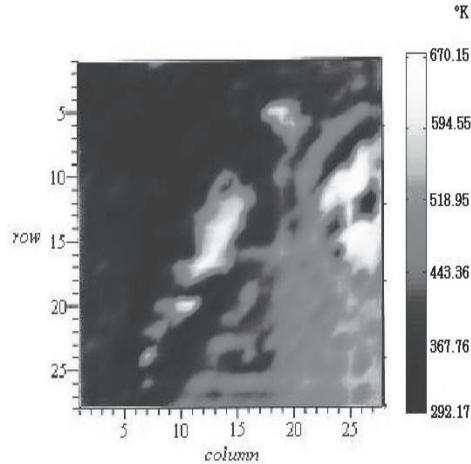
**Figura 6(a).** Elemento calefactor colocado en diagonal



**Figura 6(b).** Imagen termográfica

En la figura 6(b), se aprecia la termografía infrarroja del material y se destaca que en la termografía acústica de reflexión del haz en el gas, tiene un máximo de

temperatura de 670 °K, distribuido en las regiones más claras de la imagen de termografía acústica del ensayo; el rango aparente de temperatura que está en las coordenadas (25,15), de la figura 6(c), obedece a la deformidad del cerámico y a la referencia de cinta adhesiva; las imágenes no guardan la misma escala.



**Figura 6(c).** Imagen acústica termográfica por reflexión.

En la figura 6(c), el ensayo se hizo con el escáner colocado verticalmente, con el diámetro del elemento calefactor (bobinas múltiples) de  $4 \times 10^{-3}$  m., como se menciona en el procedimiento experimental; esta medida coincide con la longitud del transductor ultrasónico, por lo cual el gradiente de temperatura que se aprecia, no corresponde al material del elemento calefactor, colocado de manera diagonal por tener la misma medida de la longitud de onda de los transductores, sino que representa la convección del gas que se forma en las adyacencia de las bobinas múltiples, por conducción (tabla 4).

**Tabla 4.** Valores de distribución de temperatura máxima y mínima

Tmax (°K)	Tmin (°K)	Re para Tmax	Datos
670	292	24	784

Tmax: temperatura máxima en grados kelvin

Tmin: temperatura mínima en grados kelvin

Re: número de Reynolds

En la tabla 5, se observa el número de Grashof (Gr), de 74622, que viene siendo el cociente entre las fuerzas de flotación y las fuerzas viscosas que actuaron en el gas, y se encuentra en el rango teórico de este parámetro adimensional de  $10^3$  y  $10^6$  para flujo laminar.

**Tabla 5.** Valores de viscosidad y números adimensionales.

Nº Prandtl (Pr)	Nº Grashof (Gr)	Nº Rayleigh (Ra)
0.70	74622	52235

El efecto, la transferencia de calor por convección, es significativo para números de Gr mayores de  $10^3$ ; se observa con el número de Rayleigh (Ra) experimental, que supera el valor crítico de  $1708 \pm 50$ , para generar la convección (tabla 5); al superarla, el valor obtenido experimentalmente, indica que las fuerzas de flotamiento sobrepasan los efectos disipativos del arrastre viscoso y la difusión térmica, produciendo la convección del gas (aire caliente), en el sistema experimental (tabla 5), siendo para el parámetro adimensional en el orden para régimen laminar de  $10^4$  hasta  $10^9$  aproximadamente.

El número de Prandtl no varía significativamente en relación con la temperatura, siendo su valor característico 0.70, para gases lo cual es un número adimensional proporcional al cociente entre la difusividad de momento (viscosidad), y la difusividad térmica.

## 2.1 DISCUSIÓN DE LOS RESULTADOS

La transmisión de calor dependió en alto grado, de la posición que el fluido ocupó respecto de la propia superficie cerámica; es decir, que la presencia de la superficie obligó a que el flujo tuviera trayectoria ascendente en la dirección propia de la placa.

En el flujo de gas del ensayo no destructivo de termografía acústica, el comportamiento del gas está en el parámetro adimensional de Rayleigh comprendido entre  $10^4 < Ra < 10^9$  y para Grashof,  $10^3 < Gr < 10^6$ , este último, sólo para el caso de flujo laminar en cavidades producidas por convección, como se muestra en cada resultado y se genera en todos los casos, la convección en flujo laminar, permitiendo observar la distribución de temperatura.

La termografía acústica se puede emplear para apoyar la termografía convencional, siempre y cuando se produzca la convección, que sirva sólo para ciertos valores de temperatura, sin exceder el rango del parámetro adimensional de Rayleigh (Ra) y superando su número crítico, siendo (Ra) el cociente entre la fuerza de flotamiento y el producto del arrastre viscoso y la rapidez de difusión térmica.

En los resultados, se observa que las imágenes obtenidas mediante la reflexión o termografía acústica son complementarias a la termografía infrarroja, ya que permite detectar los cambios de temperatura que se producen en el aire, por convección en

la superficie plana del objeto que se encuentra con un gradiente de temperatura producido por el elemento calefactor.

Otro aspecto importante, en cuanto a las imágenes obtenidas con la reflexión acústica, es que se pueden obtener mediante amplitud transmitida o reflejada, para corrimiento de fase y para tiempo de tránsito de pulsos; estos métodos suministran información independiente y complementaria a la termografía infrarroja, a partir de datos que se pueden capturar simultáneamente en una operación de rastreo.

Un caso particularmente importante y fácil de aplicar, consiste en la diferenciación entre una superficie caliente y una superficie fría pero reflectante, como es el caso de superficies pulidas y de baja emisividad.

La resolución espacial es del orden de 5 mm, para una longitud de onda de 8 mm y un intervalo espacial de 3 mm en el barrido de la termografía.

### 3. CONCLUSIONES

En este trabajo, se desarrolló un sistema para adquirir datos ultrasónicos, aplicando la técnica de corrimiento de fase para un montaje con la termografía acústica o de reflexión, con aplicaciones complementarias a los ensayos no destructivos de termografía convencional.

Se hizo tanto el diseño mecánico, como el software con el cual cuenta el sistema, se implementó este último, para automatiza y adquirir datos para después llevar a cabo un procesamiento digital de señales y obtener imágenes con los datos adquiridos.

En relación con las imágenes de termografía acústica, los resultados indican en ambos casos, que son imágenes que sirven como complemento a las termográfica infrarrojas, ya que el gas o aire que se calienta no se puede detectar por el infrarrojo; pero en el ultrasonido, sí se detecta por la variación de las propiedades mecánicas del medio donde se propaga y por ende, cambia la velocidad del sonido y su tiempo de tránsito; para detectar la convección del gas por su gradiente de temperatura que se generó del elemento calefactor, siendo imposible para el infrarrojo; estando los parámetros adimensionales del gas en los rangos de convección natural laminar de gas para Rayleigh (Ra) de  $10^4 < Ra < 10^9$  y para Grashof (Gr),  $10^3 < Gr < 10^6$ , siendo un método ultrasónico innovador, para aplicaciones de ensayos no destructivos.

La técnica desarrollada puede aplicarse en investigaciones sobre fluidos y para determinar velocidades de desplazamiento de gases, y flujo de calor; adicionalmente a los cambios de temperatura como también su distribución espacial. El

comportamiento del aire caliente en superficies verticales, en los casos estudiados, corresponde a flujos convectivos en régimen laminar.

En las imágenes de termografía acústica, la resolución espacial fue del orden de 5 mm, para una longitud de onda de 8 mm y un intervalo espacial de 3 mm en el barrido longitudinal, con una resolución de temperatura de 0,6 °C.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sadri A. (2005). “Non-destructive determination of refractory and build-up thicknesses in operating furnaces using an acoustic ultrasonic reflection technique”, Degradación de Materiales: Innovación, Inspección, Control y Rehabilitación, 44va Conferencia Anual de Metalurgistas del CIM, Calgary, Alberta, Canadá, pp. 371-385.
- [2] Sadri A., Gebiski P., Rojas Verazay P., Ibañez R., Díaz Chinga W. (2008). “Inspection and Evaluation of Refractory Lining for Slag Cleaning Furnace and Teniente Reactor at Fundición Hernán Videla Lira Empresa Nacional de Minería (ENAMI)”, 5ta Reunión Internacional sobre Mantenimiento de Plantas Mineras, Santiago, Chile, pp. 85-96.
- [3] M. Ochs, T Horbach, A Schulz, R Koch and H-J Bauer (2009) “A novel calibration method for an infrared thermography system applied to heat transfer experiments” (Revista en línea) 075103, En: (<http://iopscience.iop.org/0957-0233/20/7/075103>)
- [4] Ning Z., Yong J., Seizo K., (2005) “Ultrasonic computerized tomography (CT) for temperature measurements with limited projection data based on extrapolated filtered back projection” (Revista en línea), pp.509–522. En: ([www.sciencedirect.com](http://www.sciencedirect.com)) [Consulta: 2009, junio 11]
- [5] Iñiguez G (2007) “Clasificación mediante técnicas no destructivas y evaluación de las propiedades mecánicas de las maderas aserrada de coníferas de gran escuadría para uso estructural”. (Resumen en línea) Tesis doctoral no publicada, Facultad de Física, Universidad Politécnica de Madrid. En: (<http://oa.upm.es/415/>) [Consulta: 2009, junio 14]
- [6] Soto, J.,(1996). Fundamento sobre Ahorro de Energía. Yucatán., México: FOMES.

## EFFECTO DEL TIPO Y CONCENTRACIÓN DE AGLUTINANTE EN LA CONDUCTIVIDAD TÉRMICA DE POLVOS DE CARBÓN

### THE EFFECT OF AGGLUTINANT CONCENTRATION AND TYPE ON COAL-POWDER THERMAL CONDUCTIVITY

*Jorge Hernando Bautista Ruiz*

Licenciado en Física y Matemáticas, Magister en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Profesor Auxiliar, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.  
jorgebautista@ufps.edu.co

*Gabriel Peña Rodríguez*

Licenciado en Física, Magister en Física, Doctorado en Ingeniería de los Materiales. Profesor Asociado, Universidad Francisco de Paula Santander, Cúcuta, Colombia.  
ggabrielp@yahoo.com

*William Aperador Chaparro*

Físico, Magister en Metalurgia y Ciencia de los Materiales, Doctor en Ingeniería de los Materiales Profesor Asistente, Universidad Militar Nueva Granada, Bogotá, Colombia.  
william.aperador@unimilitar.edu.co

**Fecha de recepción:** 17 de enero de 2011

**Fecha de aprobación:** 11 de mayo de 2011

## RESUMEN

Se reporta la *conductividad térmica* ( $k$ ) a temperatura ambiente de polvos de carbón térmico, en función del tipo y concentración del aglutinante (agua, alcohol, ACPM), los cuales variaron de porcentaje en peso (%wt), entre 5% y 40%. Las muestras fueron obtenidas de la mina Cerro Tasajero ubicada en el área metropolitana de San José de Cúcuta, Colombia, las cuales se pulverizaron manualmente, utilizando molino de rodillos y se tamizaron en malla pasante número 100 (150  $\mu\text{m}$ ).  $k$  se determinó, usando el principio físico de flujo lineal transitorio de calor, mediante el sistema KD2<sup>®</sup> Thermal Properties Analyzer (Decagon Devices, Inc). El porcentaje de ceniza presente en la muestra, se determinó según la norma ASTM D3174, y se encontró un valor de 1,75%; para hallar la concentración de azufre, se utilizó la norma ASTM D3177, y reportó un valor de 0,45%, mientras que el porcentaje de materia volátil presente en la muestra fue de 34,17%, que se halló, aplicando la norma ASTM D3175. El análisis de  $k$  en función del tipo y concentración del aglutinante, se realizó, usando el ajuste a los datos experimentales mediante la

función logística  $y = \frac{(A_1 - A_2)}{[1 - (x/x_0)^n]} + A_2$  donde  $A_2$  corresponde a los valores de la propiedad térmica ( $y$ ) para la concentración inicial de aglutinante ( $x$ );  $A_1$  representa dicho valor para cuando la concentración de aglutinante ( $x$ ) sea muy grande;  $x_0$  corresponde al punto donde sucede el cambio de curvatura y  $n$  la razón de crecimiento o

decrecimiento. Los resultados encontrados en este trabajo, podrán ser utilizados en el desarrollo de estudios que permitan la fabricación de cilindros de polvos de carbón prensados a altas presiones, los cuales se usarán en los procesos de combustión en hornos industriales que se utilizan en la sinterización de productos cerámicos como teja, bloque y baldosa.

**Palabras clave:** carbón térmico, conductividad térmica, flujo de calor lineal transitorio.

## ABSTRACT

This paper reports a *thermal conductivity* ( $k$ ) given an environment temperature of thermal coal powder as a function of agglutinant concentration and type –i.e. water, alcohol, diesel– which changed their weight percentage (%wt) between 5-and-40 percent. Samples were obtained from Cerro Tasajero, a mine located at San Jose de Cucuta metropolitan area, which were pulverized manually using roller mill and sifted by a mesh No. 100 (150 $\mu$ m). The  $k$  value was determined using the physical principle of temporary linear heat flow by system KD2 $\square$  Thermal Properties Analyzer (Decagon Devices, Inc.) The ash percentage in the sample was given by norm ASTM D 3174, providing a value of 1.75 percent. The sulfur concentration was obtained using norm ASTM 3177, reporting a value of 0.45 percent, while the percentage of matter volatile in the sample was 34.17 percent by applying norm ASTM 3175. The analysis of  $k$  as a function of agglutinant type and concentration was carried out adjusting the

experimental data based on the logistical function  $y = \frac{(A_1 - A_2)}{[1 - (x/x_0)^n]} + A_2$  where  $A_2$  corresponds to values of the thermal property ( $y$ ) for an initial concentration of agglutinant ( $x$ ).  $A_1$  represents such a value as agglutinant ( $x$ ) concentration may be very big;  $x_0$  reveals the point where bend is changing and  $n$  the reason of growth or falling. The results in this experience could be used to develop other studies in order to produce high-pressed coal powder cylinders, which will be used in industrial burning processes by sintering ceramic goods, such as roof tile, block and wall tile.

**Key words:** thermal coal, thermal conductivity, transient linear heat flow.

## INTRODUCCIÓN

El carbón es el combustible fósil más abundante, no sólo porque existen grandes reservas, sino que éstas se encuentran repartidas abundantemente en el Globo. Actualmente, el carbón es la mayor fuente de energía primaria utilizada por las termoeléctricas, y la industria siderúrgica, así como fuente de combustión en los

procesos de quema o cocción de productos cerámicos tradicionales como ladrillos, tejas y baldosas [1], [2], [3].

El bajo costo y la disponibilidad del carbón, permitirá por muchos años más su uso como combustible o fuente de energía, especialmente en los países en vía de desarrollo.

Los problemas medioambientales derivados del uso de combustibles fósiles han impulsado el desarrollo de tecnologías encaminadas a mejorar la eficiencia y reducir las emisiones contaminantes a los cada vez más restrictivos niveles adoptados en los protocolos internacionales [4]. El carbón tiene muchos usos importantes, aunque los más significativos son la producción de electricidad, la fabricación de acero, cemento y otros procesos industriales de producción de calor [5], [6].

En los últimos años, Colombia ha aumentado su participación en las exportaciones de carbón térmico y carbón coquizable, con una buena contribución de la zona de Norte de Santander [7], [8]. Es indispensable desarrollar estudios que contribuyan a mejorar las condiciones para la explotación y utilización del carbón, de manera que sea posible disminuir pérdidas y lograr el máximo rendimiento en su utilización y cumplir con las normas medioambientales.

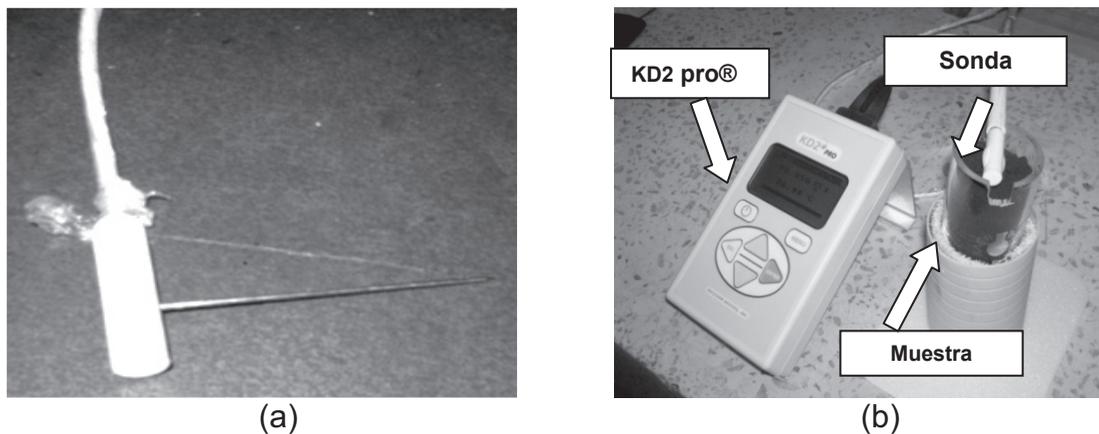
Los resultados encontrados en el desarrollo de esta investigación, serán utilizados con el objetivo de fabricar cilindros de carbón compactados a altas presiones, los cuales se usarán en los procesos de combustión de hornos en la industria de producción de cerámicas que son relevantes en el área metropolitana de San José de Cúcuta y su área fronteriza con la República Bolivariana de Venezuela.

## 1. PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

**Preparación de las muestras.** Se tomaron muestras representativas de carbón mineral de una de las minas más importantes de la región, la mina Cerro Tasajero, ubicada en el área metropolitana de San José de Cúcuta. Las muestras se pulverizaron manualmente en molino de rodillos. El polvo obtenido se tamizó en malla pasante número 100 (150  $\mu\text{m}$ ). Utilizando el secadero de circulación forzada marca Gabrielli<sup>®</sup>, a una temperatura de  $312,0 \pm 0,5$  K durante 24 horas, se realizó el proceso de secado; a la masa inicial de la muestra, se le agregaron tres tipos diferentes de aglutinantes: agua destilada, alcohol comercial al 96% y ACPM en porcentaje en peso con variaciones cada 5% en un rango comprendido entre el 5% y 40%. Luego se compactó con una carga constante de  $5315,6 \pm 0,2$  gf. Posteriormente, se procedió a medir la conductividad térmica ( $k$ ) con el sistema KD2-Pro (R), tomando cinco lecturas de  $k$ , con una diferencia entre medidas de cinco minutos y después se promediaron. Para complementar la caracterización de

las muestras de carbón de la mina Cerro Tasajero, el porcentaje de ceniza se determinó usando la norma ASTM D3174; la concentración de azufre se halló, empleando la norma ASTM D3177, mientras que la materia volátil se obtuvo, según la norma ASTM D3175.

**Método experimental.** El sistema KD2-Pro<sup>®</sup>, permite hallar las propiedades térmicas, usando como principio físico del flujo lineal transitorio de calor, en donde se monitorea el perfil de temperatura en función del tiempo. El sistema realiza mediciones experimentales que se ajustan a funciones exponenciales integrales mediante un procedimiento no lineal de mínimos cuadrados. Un término de la tendencia lineal, corrige los cambios de temperatura de la muestra durante la medida, optimizando así la exactitud de las lecturas [9].



**Figura 1.** Sistema KD2-Pro<sup>®</sup>. (a) sensor o sonda. (b) montaje experimental

La figura 1(a), muestra el sistema KD2-Pro(R ) junto con la sonda o aguja empleada en el desarrollo del presente trabajo. En la figura 1(b), se presenta el diseño experimental empleado para efectuar las mediciones de las propiedades térmicas del polvo de carbón compactado con diferentes porcentajes en peso del aglutinante. Se visualiza la ubicación de la sonda o sensor, sobre la muestra de carbón y su conexión con el analizador KD2-Pro(R ).

Los valores de  $k$  se determinan con el monitoreo de la disipación del calor que proviene de una fuente lineal transitoria dada por un voltaje conocido. El gradiente de temperatura para un medio infinito, a una distancia  $r(m)$  próxima a la fuente lineal de calor, está dado por Carslaw H. S., et al [10].

$$\Delta T = \frac{Q}{4\pi kt} e^{\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right)} \quad (1)$$

Donde  $k$  es la conductividad térmica ( $\text{W m}^{-1} \text{K}^{-1}$ ),  $D$  es la difusividad térmica ( $\text{m}^2 \text{s}^{-1}$ ),  $Q$  ( $\text{J m}^{-1}$ ) corresponde a la cantidad de calor aplicada en forma instantánea, y  $t$  (s) es tiempo. Considerando a  $Q$  como un pulso instantáneo de calor en un intervalo de tiempo ( $0 < t < t_1$ ), la ecuación (1) se transforma en:

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi k} Ei\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) \quad 0 < t < t_1 \quad (2)$$

Donde  $q$  es la tasa de disipación de calor ( $\text{W/m}$ ),  $t_1$  es el tiempo de calentamiento, y  $Ei$  es la integral exponencial [11]. El gradiente de temperatura después de interrumpir el pulso de calor en el proceso de enfriamiento ( $t > t_1$ ) está dado por la ecuación 3 de Abramowitz [11]:

$$\Delta T = -\frac{q}{4\pi k} \left[ -Ei\left(-\frac{r^2}{4Dt}\right) + Ei\left(-\frac{r^2}{4D(t-t_1)}\right) \right] \quad t > t_1 \quad (3)$$

La conductividad térmica ( $k$ ) de la muestra en estudio, se determina ajustando los datos de temperatura tomados durante el tiempo de calentamiento, ecuación (2), y durante el enfriamiento, ecuación (3). Dicho ajuste es no-lineal de mínimos cuadrados [12], en donde los valores de  $k$  se minimizan con la diferencia entre el modelado y el medido por el sensor de temperatura. Un factor de tendencia lineal se incluye en el procedimiento inverso. La mayoría de los experimentos no ocurre bajo condiciones constantes de temperatura, por tal razón, se asume que la temperatura puede ser de tendencia lineal y se utiliza un parámetro de ajuste a esta tendencia, permitiendo reducir el error en forma sustancial.

Otros estudios teórico para hallar  $k$ , donde se considera la fuente pulsada de forma cilíndrica de radio  $a$  (m) y longitud  $2b$  (m), midiendo la temperatura en el centro de la muestra, reporta que el gradiente de temperatura durante el calentamiento ( $0 < t < t_1$ ), es dado por la ecuación (4), y durante el enfriamiento ( $t > t_1$ ), por la expresión (5) [13].

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \int_{r^2/4Dt}^{\infty} u^{-1} \exp(-u) \exp[-(a/r)^2 u] I_0(2au/r) \operatorname{erf}\left(\frac{b}{r}\sqrt{u}\right) du \quad (4)$$

$$\Delta T = \frac{q}{4\pi k} \int_{r^2/4Dt}^{r^2/4D(t-t_1)} u^{-1} \exp(-u) \exp[-(a/r)^2 u] I_0(2au/r) \operatorname{erf}\left(\frac{b}{r}\sqrt{u}\right) du \quad (5)$$

Donde,  $I_0(x)$  representa una función de Bessel modificada de orden cero,  $\operatorname{erf}(x)$  es la función error, y  $u$  es una variable de integración.

Si  $a/r$  se aproxima a cero, y  $b/r$  a infinito, se reducen las ecuaciones (4) y (5) a las expresiones (2) y (3).

Para el tipo de sensor y microcontrolador que maneja el sistema KD2, se ha encontrado que las ecuaciones (2) y (3), ajustan los datos del gradiente de temperatura tan bien como las ecuaciones (5) y (6), pero dan valores un poco diferentes para el ajuste en los parámetros, variación que debe incluirse en la calibración del equipo, así las ecuaciones más simples (2) y (3) son confiables para determinar el valor de  $k$ .

## 2. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Una vez obtenidas las muestras, se procedió a analizar el porcentaje de ceniza, materia volátil, carbón fijo, azufre y el poder calorífico. Las normas ASTM D [14] se utilizaron en la determinación de los parámetros anteriores que se encuentran registrados en la tabla 1.

De los resultados anteriores y usando la norma ASTM D 388-82, que clasifica el carbón según el contenido de carbón fijo y materia volátil, es posible afirmar que las muestras de carbón de la mina Cerro Tasajero corresponden a un carbón tipo bituminoso clasificado como alto volátil (C.F.<69% y M.V.>31%), que puede ser utilizado como carbón aglomerante. Este resultado implica la existencia de un alto potencial como materia prima para fabricar briquetas sólidas compactadas.

**Tabla 1.** Porcentaje en peso de ceniza, materia volátil, carbono, azufre y el poder calorífico.

Análisis	Porcentaje (%)
Ceniza	1,75
Material volátil (M.V)	34,17
Carbón Fijo (C.F)	64,08
Azufre	0,45
Poder Calorífico (P.C)	8450 Cal/g

En las tablas 2, 3 y 4 se presentan los resultados experimentales encontrados de la densidad ( $\rho$ ), conductividad térmica promedio ( $k$ ) y temperatura ( $T$ ) para las muestras de polvo de carbón de la mina Cerro Tasajero, en función de la concentración de fluido (agua, alcohol y ACPM), respectivamente, y para la presión de compactación constante de 52 N. De los resultados anteriores, se aprecia que el valor promedio de  $k$ , para la muestra de carbón en polvo con tamaño de grano inferior a 150  $\mu\text{m}$  sin fluido (0%), reporta un valor promedio de  $(0,063 \pm 0,003) \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$  para una temperatura promedio de  $(300,85 \pm 1,02) \text{ K}$ , valor que es similar al reportado  $(0,065 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1})$  por Y.S. Touloukian et al [15].

**Tabla 2.** Densidad, conductividad térmica y temperatura para el carbón en polvo con agua.

% AGUA	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$k$ (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$T$ (K)
0	733,3±3,7	0,062±0,004	300,71±0,34
5	752,2±1,5	0,112±0,004	299,77±0,16
10	769,5±1,6	0,134±0,003	302,62±0,25
15	778,2±1,9	0,184±0,005	302,68±0,17
20	794,6±2,0	0,193±0,005	300,02±0,20
25	761,8±1,5	0,221±0,004	302,91±0,16
30	797,2±1,9	0,238±0,005	300,74±1,14
35	816,2±1,8	0,261±0,003	299,97±0,16
40	926,2±2,1	0,277±0,003	300,49±0,02

**Tabla 3.** Densidad, conductividad térmica y temperatura para el carbón en polvo con alcohol.

% ALCOHOL	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$k$ (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$T$ (K)
0	664,2±1,3	0,063±0,002	301,75±0,09
5	661,3±1,3	0,101±0,004	299,18±0,23
10	654,6±1,6	0,118±0,003	297,57±0,37
15	649,5±1,6	0,120±0,001	300,01±0,36
20	648,2±1,5	0,134±0,002	301,39±0,36
25	672,3±1,5	0,149±0,002	300,55±0,46
30	767,2±1,8	0,179±0,002	298,64±0,24
35	790,8±1,7	0,195±0,001	299,45±0,65
40	861,2±2,0	0,199±0,002	298,14±0,27

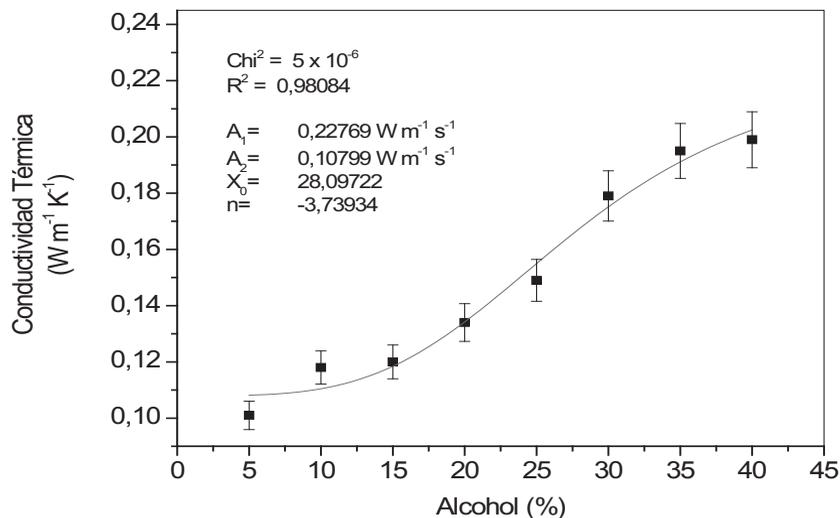
**Tabla 4.** Densidad, conductividad térmica y temperatura para el carbón en polvo con ACPM.

% ACPM	$\rho$ (Kg/m <sup>3</sup> )	$k$ (Wm <sup>-1</sup> K <sup>-1</sup> )	$T$ (K)
0	677,2±2,0	0,063±0,003	300,09±0,06
5	626,3±1,3	0,106±0,002	301,17±0,16
10	632,1±1,6	0,121±0,002	302,65±0,08
15	661,4±2,0	0,142±0,003	301,15±0,08
20	733,5±1,5	0,181±0,001	301,31±0,09
25	748,0±2,2	0,192±0,003	289,17±0,10
30	791,2±1,6	0,199±0,003	301,14±0,12
35	891,5±2,2	0,201±0,001	299,16±0,09
40	935,2±2,8	0,215±0,002	299,64±0,09

Al analizar los valores de  $\rho$ ,  $k$  y  $T$ , para las muestras de carbón con concentraciones de fluido superiores al 5% e inferiores al 40% (tablas 2, 3 y 4), se observa que la densidad volumétrica tiende a aumentar con la concentración del fluido, y se aprecia que dicho parámetro oscila entre 733±3,7 kg/m<sup>3</sup> y 926±2,1 kg/m<sup>3</sup> para la mezcla con agua; entre 664±1,3 kg/m<sup>3</sup> y 861±2,0 kg/m<sup>3</sup> para la muestra con alcohol, mientras

que cuando se varía la concentración de ACPM, la densidad varía entre  $677 \pm 2,0 \text{ kg/m}^3$  y  $935 \pm 2,8 \text{ kg/m}^3$ .

La conductividad térmica ( $k$ ) se incrementa al aumentar la concentración en peso del aglutinante agregado, para la temperatura reportada (ambiente), encontrándose que los valores experimentales de  $k$  varían en un rango de  $0,112 \pm 0,004 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a  $0,277 \pm 0,003 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ , cuando se utiliza agua como fluido, mientras que para el alcohol, el rango de variación es de  $0,101 \pm 0,004 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$  a  $0,199 \pm 0,002 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$  y para el ACPM osciló entre  $0,106 \pm 0,002 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$  y  $0,215 \pm 0,002 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ . De los resultados anteriores, se puede afirmar que la mezcla de carbón con agua, presenta la mayor conductividad térmica.



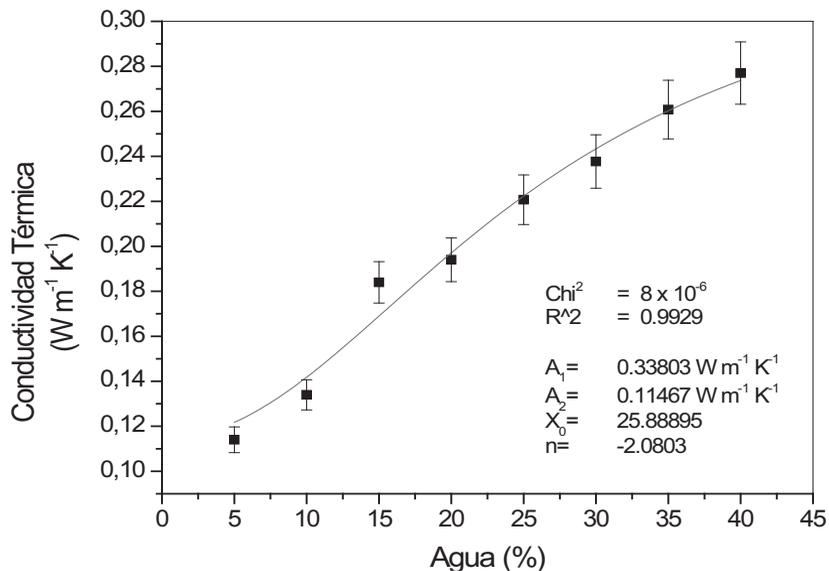
**Figura 2.** Conductividad térmica en función de la concentración de alcohol agregada a la muestra

El comportamiento de  $k$  en función de la concentración del aglutinante agregado (alcohol, agua y ACPM), se presenta en las figuras 2, 3 y 4 respectivamente, en donde la línea sólida corresponde al mejor ajuste a los datos experimentales, usando una función logística de crecimiento, con límite de saturación dada por la expresión (6) [16].

$$y = \frac{(A_1 - A_2)}{[1 - (x/x_0)^n]} + A_2 \quad (6)$$

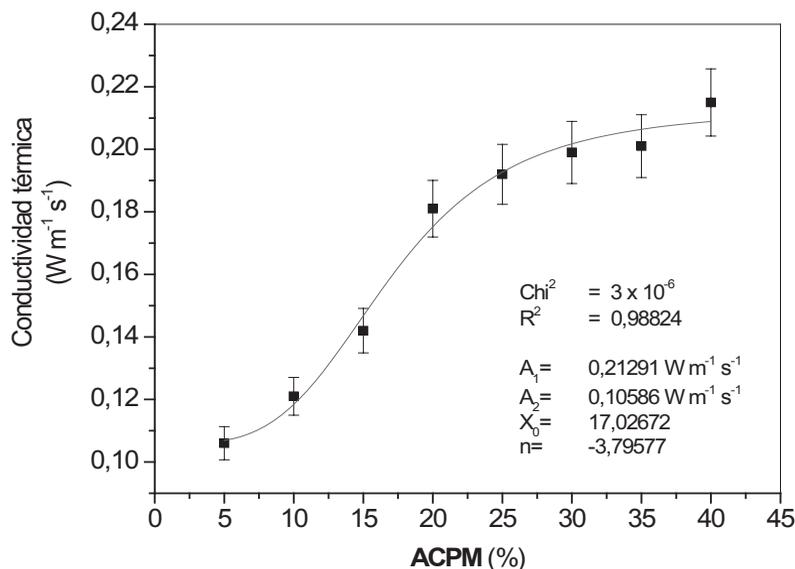
Donde  $A_2$  corresponde al valor de la conductividad térmica ( $y$ ) de la muestra cuando se agrega una cantidad mínima de aglutinante ( $x=5 \text{ \%wt}$ );  $A_1$  es el valor de la propiedad térmica cuando la concentración del aglomerante es muy grande ( $x \gg$ ), es

decir, el valor máximo de saturación;  $x_0$  hace referencia al punto donde se produce el cambio de curvatura, y  $n$  es la razón de crecimiento. De lo anterior se aprecia que el parámetro  $A_2$  (figuras 2, 3 y 4), corresponde exactamente a los datos reportados para  $k$  en las tablas 2, 3 y 4 para las concentraciones bajas del aglutinante (5%). En estas mismas gráficas, al analizar el parámetro  $A_1$ , se observa que el valor de  $k$  para la mayor concentración de aglutinante (alcohol, agua y ACPM), reporta los valores de  $0,228 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$ ,  $0,338 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$  y  $0,213 \text{ Wm}^{-1} \text{ K}^{-1}$  respectivamente. Revisando los coeficientes de correlación ( $R^2$ ), y las desviaciones cuadráticas media ( $\text{Chi}^2$ ), en los ajustes realizados a los datos experimentales, usando la expresión (6), se observa que los valores reportados para los parámetros  $A_1$  y  $A_2$  son confiables, pues  $R^2$  es muy cercano a la unidad, y  $\text{chi}^2$  es del orden de  $10^{-6}$  (figuras 2, 3 y 4).



**Figura 3.** Conductividad térmica en función de la concentración de agua agregada a la muestra

Comparando los resultados de  $k$  a temperatura ambiente, reportados en la literatura para el polvo de carbón ( $0,065 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) [15], para el agua ( $0,58 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) [17], el alcohol ( $0,17 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) [18], y el ACPM ( $0,15 \text{ Wm}^{-1}\text{K}^{-1}$ ) [17], con los hallados experimentalmente en este trabajo (tablas 2, 3 y 4), se aprecia que están en el mismo orden de magnitud, y que los valores de  $k$  aumentan al incrementar la concentración del aglutinante (agua, alcohol y ACPM), coincidiendo con lo reportado por Raffi M., et al [19].



**Figura 4.** Conductividad térmica en función de la concentración de ACPM agregada a la muestra

### 3. CONCLUSIONES

Del análisis sobre el porcentaje de ceniza, materia volátil, carbón fijo, azufre y el poder calorífico realizado a las muestras de polvo de carbón, se concluye que el carbón de la mina Cerro Tasajero, corresponde a un carbón tipo bituminoso clasificado como alto volátil, que puede ser utilizado como carbón aglomerante.

Se reporta el valor de la conductividad térmica a temperatura ambiente, de muestras de polvo de carbón de la mina de Cerro Tasajero, con tamaño de grano inferior a  $150 \mu\text{m}$ , sometidos a una presión de compactación de  $52 \text{ N}$ , y se encontró un valor promedio de  $0,063 \pm 0,003 \text{ W m}^{-1} \text{ K}^{-1}$ .

El análisis de la conductividad térmica ( $k$ ) en función de la concentración del aglutinante (agua, alcohol y ACPM), permite concluir que al aumentar su concentración, se incrementa el valor de  $k$ , lo cual fue corroborado con el comportamiento de la densidad de la muestra, que también se incrementa al aumentar la concentración de fluido agregado. El comportamiento de  $k$  en función de la concentración del aglutinante, se ajustó a una función logística de crecimiento con límite de saturación dada por la expresión (6), y se reportaron los valores de  $k$  correspondientes a la saturación de la mezcla carbón-aglutinante, dados por el parámetro  $A_1$  presente en la función de ajuste, valores que pueden considerarse confiables, por que el coeficiente de correlación  $R^2$  es muy cercano a la unidad y la desviación cuadrática media es muy pequeña del orden de  $10^{-6}$ .

En general, se encontró que las muestras que presentaron la mayor conductividad térmica fueron las que utilizaron agua como aglutinante debido, muy posiblemente, a la bipolaridad de la molécula de agua.

## AGRADECIMIENTOS

Al Fondo de Investigaciones Universitarias (FINU), de la Universidad Francisco de Paula Santander (UFPS), por su apoyo económico. Al Centro de Investigación en Materiales Cerámicos CIMAC-UFPS, por el préstamo de sus instalaciones y a Fredy Carrillo y Yuliet Pabón del programa Especialización en Física (UFPS) por su colaboración en la preparación de las muestras.

## REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Sehlke G. Wichlacz P. (2009). U. S. Department of Energy's Role in the Energy-Water Nexus. In: Journal of Contemporary Water Research and Education, Vol. 143, pp. 56-62.
- [2] Hiroaki Y., Nobuhiro M. and Makoto T. (2003). Coal Firing Power Generation Technology. In: Journal of the Japan Institute of Energy, Vol. 82, pp. 822-829.
- [3] Vieira C. M. F. and Monteiro S. N. (2009). Incorporation of solids wastes in red ceramics – an update review. In: Revista Materia, Vol. 14, pp. 881-905.
- [4] Santurio Díaz J. (2002). Corrección y mejora del análisis de humedad del carbón térmico por medios no destructivos en tiempo real. En: Universidad de Oviedo.
- [5] Plitt L. R. (1998). Basic physical principles of on-line coal ash and moisture measurement. In: Seminar on coal moisture and ash on-line analyzers.
- [6] Unsworth J. F. Barrta D. J. Roberts P. T. (1991). Coal Quality and Combustion Performance (2007). An international perspective. In: Coal Science and Technology, Vol. 19, pp. 638-643.
- [7] Valbuena O. (2007). Efecto de la distribución del tamaño de partícula en la conductividad térmica de polvo de carbón usado en la elaboración del combustible tipo CCTA. En: *Universidad Francisco de Paula Santander*.
- [8] Flórez P. (2006). Mercado Nacional e internacional del carbón colombiano, En: Ministerio de Minas y energía, Bogotá.

- [9] Decagon D. (2006). KD2 Pro Theory. In: KD2 Pro User Manual.
- [10] Carslaw, H. S., and J. C. Jaeger (1959). *Conduction of Heat in Solids*, 2<sup>nd</sup> ed. Oxford, pp 258-262, London.
- [11] Abramowitz M., and I. A. Stegun (1972). *Handbook of mathematical functions*. New York: Dover Publications, Inc.
- [12] Marquard D. W., (1963). An algorithm for least-squares estimation of nonlinear parameters, *J. Soc Indust. Appl. Matb.* 11: 431-441.
- [13] Kluitenberg G. J., J. M. Ham, and K. L. Bristow (1993). Error analysis of the heat pulse method for measuring soil volumetric heat capacity, *Soli Sci. Soc. Am. J.* 57:1444-1451.
- [14] Normas ASTM D: 3174, 3175, 3172, 3177 y 2015.
- [15] Touloukian Y., Powell R., Ho C., and Klemens P., (1970). *Thermal conductivity non metallics solids*, IFI/Plenum, Vol. 2, pp. 8.
- [16] Dragan A., and Scitovski R., (1996). The existence of optimal parameters of the generalized logistic function. In: *Applied Mathematics and Computation*, Vol. 77, pp. 281-294.
- [17] Ramírez M.L.V., Nieto de Castro C. A., Nagasaka Y., Nagashima A., Assael M. J., and Wakeham W. A. (1994). Standard reference data for thermal conductivity of water, *AIP.ACS.* pp. 1377-1381. In: <http://www.nist.gov/data/PDFfiles/jpcrd493.pdf>. (Consulta: mayo de 2011).
- [18] Thermal Conductivity Common Liquids. In: <http://www.engineeringtoolbox.com/thermal-conductivity-liquids-d1260.html> (Consulta: mayo de 2011).
- [19] Raffi M. Turian, Dong-Jin Sung and Feng-Lung Hsu. (1991). Thermal conductivity of granular coals, coal-water mixtures and multi-solid/liquid suspensions. *Fuel* Vol. 70, Issue 10, pp: 1157 – 1172.