

Determinación del potencial de gasificación de carbones de la provincia Centro de Boyacá para combustión en horno túnel

Determination of gasification potential of coal from Central province of Boyacá for combustion in tunnel kiln

Marco Antonio Ardila Barragán¹, Alfonso López Díaz², Pilar Triviño Restrepo³,
Claudia Patricia Molina Gallego⁴, Iván Ernesto Barragán Gutierrez⁵

¹M.Sc. en Ingeniería Mecánica. Profesor Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
Grupo de Investigación en Carbones y Carboquímica. Tunja, Colombia

²Ph.D. en Ingeniería. Profesor Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
Grupo de Investigación en Materiales Siderúrgicos. Tunja, Colombia

³M.Sc. en Materiales. Profesora Escuela de Ingeniería Ambiental, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
Grupo de Investigación en Carbones y Carboquímica. Tunja, Colombia

⁴M.Sc. en Materiales. Profesora Escuela de Ingeniería Metalúrgica, Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia.
Grupo de Investigación en Carbones y Carboquímica. Tunja, Colombia

⁵M.Sc. en Ingeniería Mecánica. Experto Asesor Industria Ladrillera.

*E-mail: marco.ardila@uptc.edu.co

Recibido 28/03/2017

Aceptado 15/10/2017

Cite this article as: M. Ardila, A. López, P. Triviño, C. Molina, I. Barragán, "Determination of gasification potential of coal from Central province of Boyacá for combustion in tunnel kiln", *Prospectiva*, Vol 16, N° 1, 51-59, 2018.

RESUMEN

Las industrias cerámicas que utilizan carbón como combustible para la cocción, generan impactos ambientales, de eficiencia energética y de calidad en productos. Como alternativa de solución, se analizaron carbones de la provincia Centro de Boyacá, para evaluar las propiedades de mayor efecto en el proceso de gasificación, determinar el potencial de producción de gas de síntesis (syngas) y de generación térmica. En el estudio se realizó la simulación térmica de un horno túnel, por elementos finitos con pdeotool de Matlab, para analizar requerimientos y distribución de energía de cocción de cerámicos, y se evaluó la eficiencia energética del carbón con respecto a la del gas de síntesis. Los resultados indican que según la norma ASTM D 388, los carbones analizados son de bajo rango, comúnmente usados para la producción de gas de síntesis en el contexto internacional. A nivel energético se estableció que la masa del carbón mineral requerida para el proceso de cocción por combustión directa es mayor que la requerida para producir la misma cantidad de energía a partir de la combustión del gas de síntesis. Esta investigación constituye la fase de exploración, que determina la factibilidad de sustitución del tipo de combustible, para la cocción de cerámicos en horno túnel.

Palabras clave: Carbones de bajo rango; Carbones provincia Centro de Boyacá; Gasificación de carbón; Generación térmica; Gas de síntesis; Eficiencia energética del carbón.

ABSTRACT

Ceramic industry uses coal as fuel for cooking generates an environmental impact, energetic efficiency impact and product quality impact. As an alternative solution, coal from the Central Province of Boyacá was analyzed to assess the properties with the highest effect on the gasification process; determining the production potential for syngas and thermal generation. In the study, the thermal simulation of a tunnel kiln by finite elements with Matlab pdeotool was performed to analyze the requirements and distribution of ceramic firing energy, and the energetic efficiency of coal was assessed as compared to that of syngas. Results indicate that, according to ASTM D 388, coals analyzed are lower rank, commonly used for the production of syngas in the international context. At an energetical level, it was established that the mass of mineral coal required for the process of cooking, by direct combustion, is higher than that required to produce the same amount of energy from the combustion of syngas. This research constitutes the exploration phase, which determines the viability of the substitution of the fuel type for cooking ceramics in a tunnel kiln.

Key words: Low rank coals; Coals from Central Province of Boyacá; Coal gasification; Thermal power; Syngas; Energetic efficiency of coal.

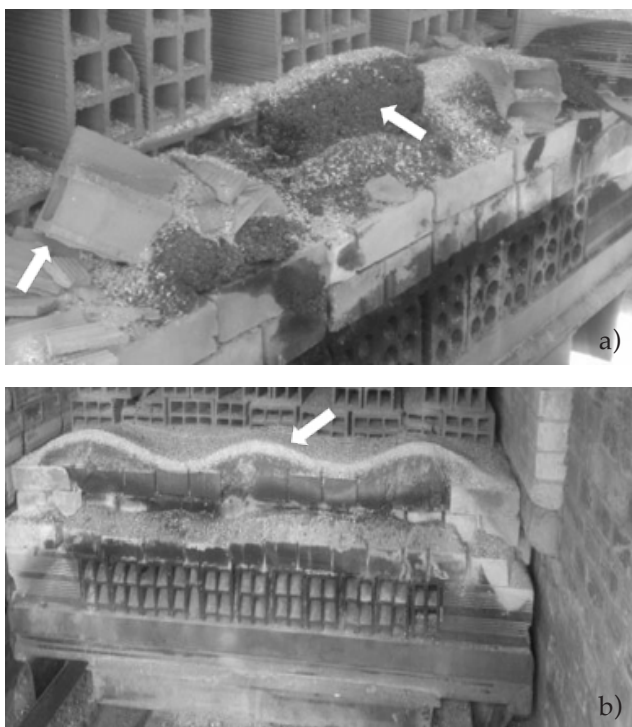
1. INTRODUCCIÓN

En septiembre de 2015, el Gobierno Colombiano presentó en París su compromiso para mitigar el cambio climático, en el cual se proyecta recortar emisiones, aumentar la eficiencia energética en los sectores industrial, residencial y comercio; además de promover la implementación de medidas relacionadas con transferencia de tecnología y sustitución de combustibles [1].

A partir del análisis del proceso de cocción de cerámicos estructurales en un horno túnel, el cual se lleva a cabo por combustión de carbones de la provincia Centro de Boyacá, cuyo poder calorífico promedia los 6.500 Btu/lb y el consumo es en torno a las 60 toneladas/mes, de las cuales se producen 9 toneladas de cenizas, con un 35% (3.2 toneladas) de carbón inquemado en su composición (figura 1(a)). Las cenizas se depositan sobre la carga, formando una capa de aislante térmico que genera defectos de cocción en el producto (figura 1(b)). Las pérdidas por este concepto ascienden al 3% de la producción media mensual, equivalente a 24.000 bloques.

Figura 1. (a) Carbón inquemado y pérdidas de producto. (b) Capas de ceniza, producidas durante el proceso de cocción por combustión directa de carbón en horno túnel.

Figure 1. (a) Unburned coal and product losses. (b) Layers of ash, produced during the cooking process by direct burning of coal in the tunnel kiln.



Durante el descargue del horno y almacenamiento del bloque, las cenizas y el material de pérdidas requieren de manejo y acopio en patios de desechos, donde se convierten en focos de contaminación. La sustitución de la combustión directa de carbón por gas de síntesis, minimiza los problemas mencionados, limpia los gases de chimenea [2]

y aumenta la eficiencia térmica del combustible; de esta manera, se garantiza y promueve el consumo de carbón bajo condiciones sostenibles, teniendo en cuenta que las reservas medidas de carbón en Colombia a 2012, fueron del orden de 5.000 millones de toneladas y los recursos potenciales estimados en 15.500 millones de toneladas, de los cuales el 87,5% corresponden a carbón térmico y el 12,5% a carbón metalúrgico [3]. En el departamento de Boyacá los recursos carboníferos se encuentran distribuidos, así: subcuenca Tunja-Duitama; ubicada entre el Puente de Boyacá al sur y el municipio de Duitama al norte, la mayoría de estos carbones están clasificados como subbituminosos A, hasta bituminosos de altos volátiles C. Subcuenca Sogamoso-Jericó; son carbones principalmente bituminosos, altos en volátiles, B y C. Subcuenca Chinavita-Umbita-Tibaná; ubicada en el centro-sur del departamento de Boyacá y Machetá, Cundinamarca. En total las reservas medidas en las zonas carboníferas de Boyacá, ascienden a 170.4 millones de toneladas [4].

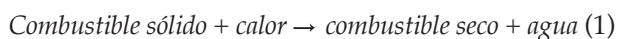
2. METODOLOGÍA

2.1 La gasificación del carbón

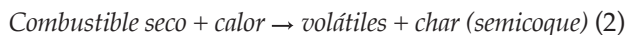
Es un proceso termoquímico para convertir materiales carbonáceos, como carbón y biomasa, en combustible o gas sintético (syngas), a partir de la oxidación parcial a elevadas temperaturas [5, 6]. Es importante a nivel mundial por sus beneficios y variedad de usos [7].

La producción de gas a partir del carbón se lleva a cabo por reacciones químicas en cuatro etapas, de acuerdo con las ecuaciones (1) a (12) [8]:

Secado del combustible sólido. Se lleva a cabo a temperaturas promedio de 105 °C:

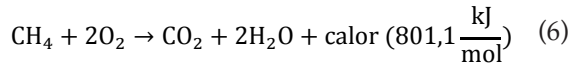
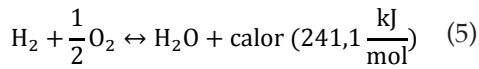
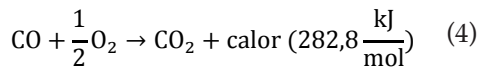
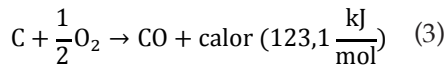


Pirólisis. Ocurre dentro de un rango de temperaturas entre 300 y 400 °C; se libera la materia volátil y se obtiene un producto sólido con propiedades de semicoque o char. Dependiendo de las propiedades del combustible y del gasificador, los volátiles liberados pueden contener H_2 , CO, CO_2 , H_2O , CH_4 , C_2H_6 , H_2S , NH_3 , olefinas, aromáticos, alquitrán y algunas cantidades de hollín. Las partículas de char contienen compuestos orgánicos (carbono) e inorgánicos (cenizas).

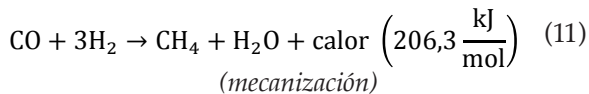
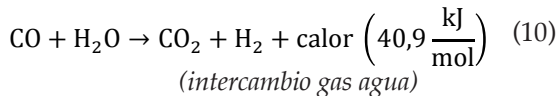
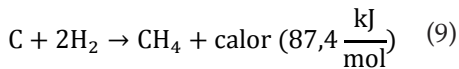
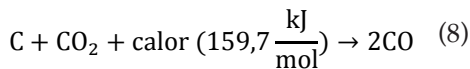
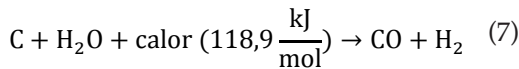


Oxidación. La inyección de oxígeno en defecto al gasificador produce reacciones de oxidación parcial; por lo tanto, la energía térmica requerida para las reacciones de gasificación es suministrada por la oxidación de los productos obtenidos durante el proceso de pirólisis.

Las reacciones químicas que se llevan a cabo durante la combustión de los productos pirolizados son:



Gasificación. Cuando la temperatura de las partículas remanentes (char y hollín) sobrepasan el rango de temperatura de los 600 a 700 °C, se pueden gasificar con vapor de agua y CO₂. A presiones altas, también se pueden gasificar con H₂. Las reacciones heterogéneas de gasificación son mucho más lentas que las reacciones de pirólisis y oxidación, de esta manera controlan la velocidad; por lo tanto, el diseño y construcción de los gasificadores depende en primer lugar de estas reacciones. Además, se debe tener en cuenta que también pueden tener lugar algunas reacciones homogéneas de gasificación. Las principales reacciones del proceso de gasificación son:



A partir de la reacción de intercambio gas-agua, se puede intercambiar la relación H₂/CO. La reacción de metanización permite obtener CH₄ como producto principal del proceso. En estas dos reacciones exotérmicas, la baja temperatura es favorable; sin embargo, a estas condiciones tienen lugar de forma muy lenta por lo cual es importante catalizar. De otra parte, a altas temperaturas las reacciones pueden ser reversibles. En la tabla 1 se relacionan los tipos de gas, la composición y el poder calorífico de los gases obtenidos por gasificación de carbón [9].

Tabla 1. Propiedades del gas de síntesis [9].
Table 1. Properties of the syngas [9].

TIPO DE GAS	COMPOSICIÓN	PODER CALORÍFICO (BTU/SCF)
Bajo Poder Calorífico (gas pobre)	CO, H ₂ , CO ₂ , N ₂	90 - 250
Medio Poder Calorífico	CO, H ₂ , CO ₂ , CH ₄	270 - 600
Alto Poder Calorífico (gas tratado)	CH ₄ , CO, CO ₂ , N ₂	970 - 1000

Los cálculos para el análisis térmico del proceso de cocción de cerámicos en horno túnel, se hacen con base en las propiedades del gas de bajo poder calorífico, el cual es objeto de estudio para proyectar la reconversión tecnológica.

2.2 Desarrollo metodológico

La investigación se realizó en tres fases: la primera corresponde al estudio y caracterización de los carbones de la provincia Centro de Boyacá, partiendo de la delimitación del área y selección de minas, para toma de muestras y análisis de laboratorio, bajo procedimientos de normas ASTM para carbones y coques [10].

Las propiedades analizadas fueron: humedad residual (HR), pérdidas por secado al aire (ADL), humedad total (HT), cenizas (Cz), materia volátil (M.V.), índice de hinchamiento (F.S.I), carbono fijo (C.F.), azufre (S) y poder calorífico (PC), que corresponden a las propiedades de mayor efecto en el proceso de gasificación [11, 12]. Los análisis se realizaron como se recibe la muestra (CSR), y se hace el cálculo de los resultados en base seca (BS) y en base seca libre de cenizas (BSLCz); el cálculo en diferentes bases se aplicó para hacer el análisis estequiométrico de las reacciones de gasificación; el rango de los carbones analizados se determinó con base en la tabla de clasificación internacional, y se comparó con carbones comúnmente gasificables.

En la segunda fase, se hizo el estudio analítico de la gasificación del carbón, a partir de las reacciones químicas del proceso para la obtención de gas de bajo poder calorífico, y se calcularon las relaciones de masa y energía, carbón/gas.

En la fase final se estableció la energía requerida en el proceso de cocción de cerámicos en horno túnel, a partir del balance de masa del sistema, para evaluar el consumo de carbón y la eficiencia energética, durante la combustión directa y como gas.

3. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

3.1 Fase I. Caracterización de carbones de la provincia Centro de Boyacá

Delimitación de áreas y selección de minas. En Boyacá se definen tres áreas carboníferas [13], Checua-Lenguazaque, al sur occidente del departamento; oriental, denominada Sogamoso - Jericó y Centro, que comprende los municipios de Tunja, Paipa y Duitama, con sus respectivas jurisdicciones [14].

Selección de minas. Se tomaron cinco muestras de minas en producción en la provincia Centro de Boyacá, ubicada en el área carbonífera centro del departamento; esta zona incluye las cuencas carboníferas de Cogua - Samacá y Tunja - Paipa - Duitama, las cuales conforman la formación Guaduas en la parte media inferior [15].

Análisis de laboratorio. Los resultados de las pruebas de laboratorio para la caracterización de los carbones analizados se presentan en la tabla 2.

Tabla 2. Resultados de la caracterización de carbones de la provincia Centro de Boyacá.

Table 2. Results of characterization of coals from Central province of Boyacá.

	RESULTADOS DE LOS ANÁLISIS DE LAS MUESTRAS EN DIFERENTES BASES SEGÚN NORMA ASTM - D 3180														
DATOS GENERALES	COMO SE RECIBE (CSR)									BASE SECA (BS)			BASE SECA LIBRE DE CZ (BSLCz)		RANGO DEL CARBÓN SEGÚN NORMA ASTM D388
MUESTRA	ADL	HR	HT	Cz	M.V.	C.F.	F.S.I.	S	PC	CZ	M.V.	C.F.	M.V.	C.F.	
Código	%	%	%	%	%	%	No.	%	(cal/g)	%	%	%	%	%	
M1	0,97	5,87	6,78	9,06	40,84	44,23	1	0,74	6.540	8,00	39,78	43,17	39,66	43,05	Subituminoso
M2	1,55	7,32	8,76	14,86	41,07	36,75	0,5	1,61	5.920	13,78	39,99	35,67	39,78	35,46	Subituminoso
M3	0,29	1,13	1,42	12,58	30,26	56,03	5	0,89	7.510	11,57	29,25	55,02	29,10	54,87	Lignito
M4	1,55	2,28	3,79	7,66	38,19	51,87	2	0,51	6.678	6,64	37,17	50,85	37,08	50,76	Subituminoso
M5	0,50	2,01	2,50	16,61	34,97	46,41	1	1,55	6.665	15,59	33,95	45,39	33,74	45,18	Lignito

De acuerdo con el estudio de caracterización de los carbones, para exploración de gas metano asociado al carbón en el área Checua – Lenguaque, sector Guachetá (Cundinamarca) - Samacá (Boyacá); realizado por el Servicio Geológico Colombiano [16], se encuentra que los resultados de la tabla 2, están dentro de los rangos propios de las características de los carbones con propiedades gasificables.

Determinación de las propiedades gasificables de los carbones analizados. En los procesos de conversión del carbón sólido a gas [17], los principales productos son: monóxido de carbono e hidrógeno; el rendimiento depende del rango del carbón, el contenido de agua, las propiedades aglomerantes y las propiedades de las cenizas [18]. Los carbones de bajo rango presentan altos contenidos de humedad, y materia volátil, pero bajo porcentaje de carbono fijo y poder calorífico; tienden a ser más reactivos por el bajo nivel de ordenamiento de su estructura y alto contenido de heteroátomos (particularmente oxígeno). En el proceso, cenizas de carbón con bajo punto de fusión, gasificados en reactores que operan a altas temperaturas, presentan comportamiento de escorias fluidas; mientras que en gasificadores que operan a bajas temperaturas, se comportan como cenizas secas [8]. La tabla 3, registra los valores mínimos y máximos, de las propiedades con mayor efecto en el proceso de gasificación de los carbones de bajo rango. De acuerdo con la tabla de clasificación internacional de la norma ASTM D 388 [10], las propiedades de los carbones de bajo rango incluyen carbones subituminosos y lignitos.

Tabla 3. Propiedades de los carbones gasificables - bajo rango.

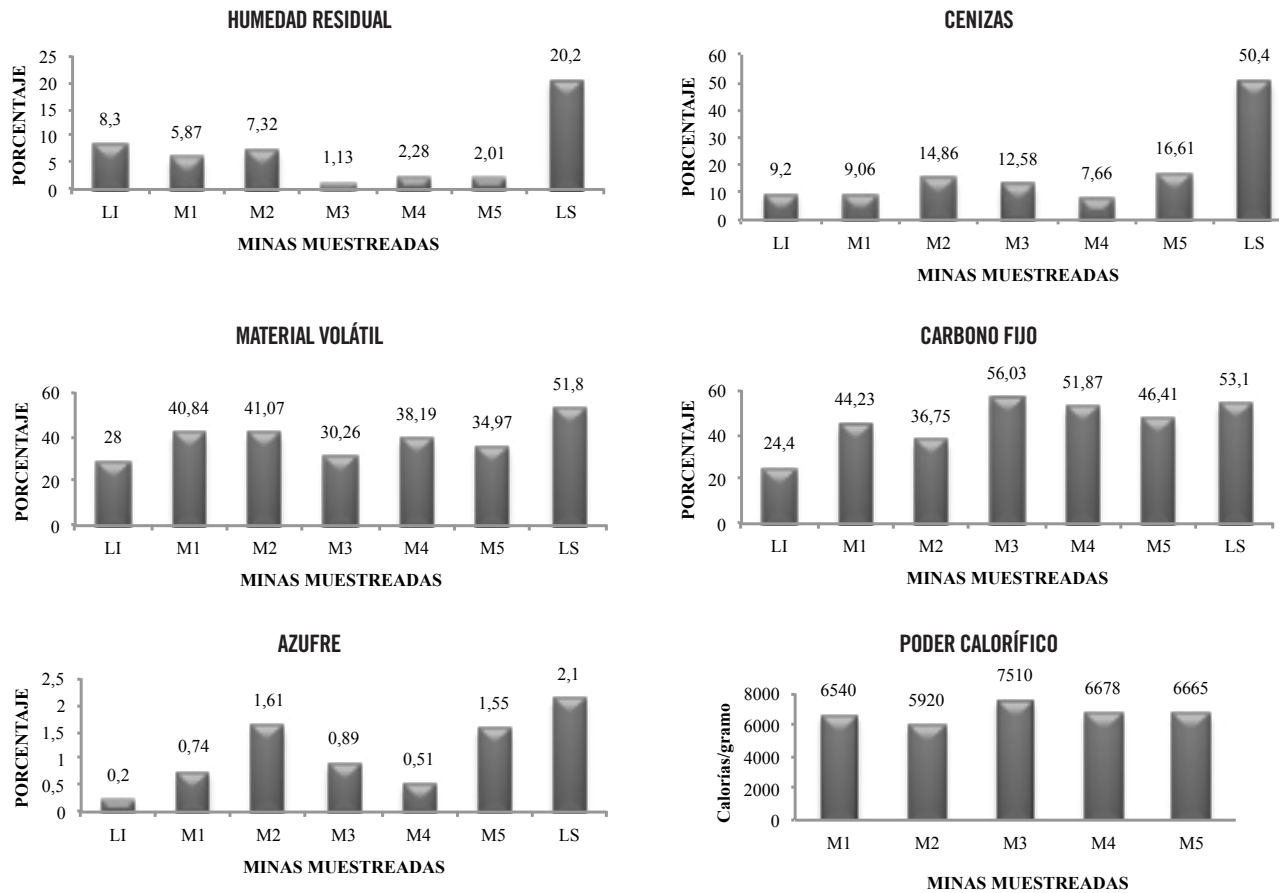
Table 3. Properties of gasifiable coals – low rank.

INTERVALOS	HUMEDAD (%) en peso	MATERIA VOLÁTIL (%) en peso	CARBONO FIJO (%) en peso	CENIZAS (%) en peso	AZUFRE (%) en peso
LIGNITOS					
Valores mínimos	8,3	28	24,4	9,2	0,2
Valores máximos	12,5	50,8	40	52	5,5
SUBITUMINOSOS					
Valores mínimos	2,4	22	24,5	6,3	0,2
Valores máximos	20,2	51,8	53,1	50,4	2,1

Los contenidos de humedad, cenizas, material volátil, carbono fijo y azufre son comparables a los valores de estas mismas propiedades, en carbones terciarios utilizados en gasificación [19], en carbones gasificados para generación de potencia [20] y, en co-gasificación de carbones colombianos con biomasa [21].

Clasificación de los carbones analizados. Este procedimiento se realiza evaluando los resultados de las propiedades de las muestras analizadas, con respecto a los valores límite inferior (LI) y superior (LS), de las propiedades de los carbones de bajo rango, y de los carbones subituminosos y lignitos, en la tabla de clasificación internacional de la norma ASTM D 388 [10]. A partir de los histogramas (figura 2), se hace un análisis comparativo [22] de las propiedades de mayor efecto en el proceso de gasificación, entre los carbones analizados y los carbones de bajo rango.

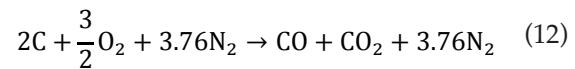
Figura 2. Histogramas de las propiedades de los carbones analizados, respecto a los límites inferior (LI) y superior (LS) de los carbones de bajo rango.
Figure 2. Histograms of properties of analyzed coals, as compared to low (LI) and high (LS) limits of low rank coals.



Se observa que la humedad en todas las muestras está por debajo del límite inferior de los carbones de bajo rango; sin embargo, aunque esta propiedad intrínseca favorece reacciones endotérmicas de gasificación (reacciones 7 y 10) para producir gases de alto valor calorífico, se puede complementar de forma extrínseca en el proceso, usando vapor de agua como agente gasificador o adicionando agua al carbón hasta inyectarlo en forma de lodos [23]. Los contenidos de cenizas, materia volátil, carbono fijo y azufre se mantienen dentro de los intervalos establecidos para estas propiedades, de acuerdo con los parámetros de norma para carbones de bajo rango, y con los valores de estas mismas propiedades en carbones usados en procesos de gasificación [19, 20, 21].

3.2 Fase II. Estudio y análisis del proceso de gasificación

El estudio analítico de la gasificación se hace a nivel estequiométrico, para calcular la producción de gas de bajo poder calorífico (tabla 1), a partir de carbón, por combustión incompleta a condiciones normales, y con 25% de aire en déficit. La reacción química del proceso es:



Los resultados se muestran en la tabla 4.

Tabla 4. Resultados del análisis estequiométrico para gasificación de los carbones probados.

Table 4. Results of stoichiometric analysis for gasification of tested coals.

MUESTRA	CARBÓN			COMPOSICIÓN GAS BAJO PODER CALORÍFICO (GBPC)						GBPC			RELACIÓN MASA	RELACIÓN
	CF (%)	CF (Kg)	PC (Kcal)	CO		CO2		N		(m³)	(Kg)	(Kcal)	(Kg-carbón) / (Kg-syngas)	(PC-GBPC / PC-carbón)
				(m³)	(%)	(m³)	(%)	(m³)	(%)					
M1	82,71	0,83	6.540,00	1,16	19,63	0,39	6,54	4,36	73,83	5,90	3,69	1.217,74	0,27	0,19
M2	75,24	0,75	5.920,00	1,05	19,63	0,35	6,54	3,96	73,83	5,37	3,35	1.107,76	0,30	0,19
M3	83,97	0,84	7.510,00	1,18	19,63	0,39	6,54	4,42	73,83	5,99	3,74	1.236,29	0,27	0,16
M4	87,84	0,88	6.678,00	1,23	19,63	0,41	6,54	4,63	73,83	6,27	3,92	1.293,27	0,26	0,19
M5	78,92	0,79	6.665,00	1,10	19,63	0,37	6,54	4,16	73,83	5,63	3,52	1.161,94	0,28	0,17

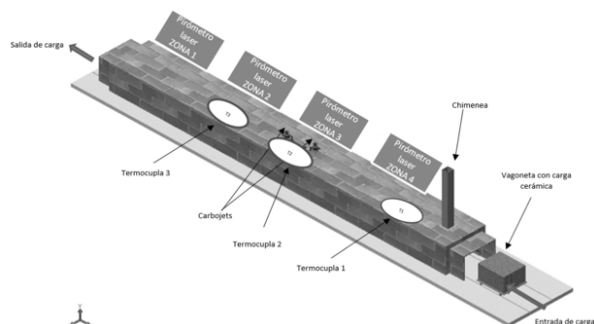
El análisis estequiométrico indica que todos los carbones analizados se pueden gasificar. En promedio la relación de masa es del 27,51%; es decir que a partir de 275 gramos de carbón se obtiene un kilogramo de gas; la energía del gas equivale al 18,11% respecto a la del carbón, cuando la composición promedio del gas es 19,63% CO, 6,54% CO₂ y 73% N₂, obtenido por combustión incompleta con deficiencia de aire. A nivel industrial, este proceso se optimiza mezclando o substituyendo el aire por vapor de agua para minimizar los contenidos de dióxido de carbono (CO₂) y nitrógeno (N₂), en las emisiones; en consecuencia, aumenta la capacidad energética debido al incremento en la producción de monóxido de carbono (CO), e hidrógeno (H₂), de acuerdo con la reacción 7, para obtener un gas de poder calorífico medio (tabla 1).

3.3 Fase III. Análisis termodinámico y cálculo de energía

Análisis térmico. Se realizó a partir del modelo 3D de un horno túnel para cocción de bloques, definiendo las zonas térmicas y el flujo del proceso (figura 3). Durante la operación, la carga entra a la zona de precalentamiento y se desplaza en movimiento continuo a una velocidad de 2.86 m/h, hasta salir por la zona de reposo [24].

Figura 3. Zonas y puntos de monitoreo de temperatura en un Modelo 3D del horno túnel.

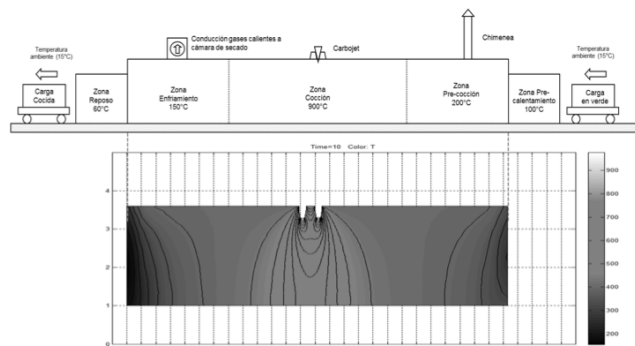
Figure 3. Temperature monitoring zones and points in a 3D Model of the tunnel kiln.



El calor para el proceso de cocción es suministrado por combustión directa de carbón. Los requerimientos de energía en función de la temperatura y la simulación en Matlab de las zonas térmicas del horno se ilustran en la figura 4.

Figura 4. Distribución de temperaturas y simulación de las zonas térmicas en el horno túnel.

Figure 4. Temperature distribution and thermic zones simulation in the tunnel kiln.



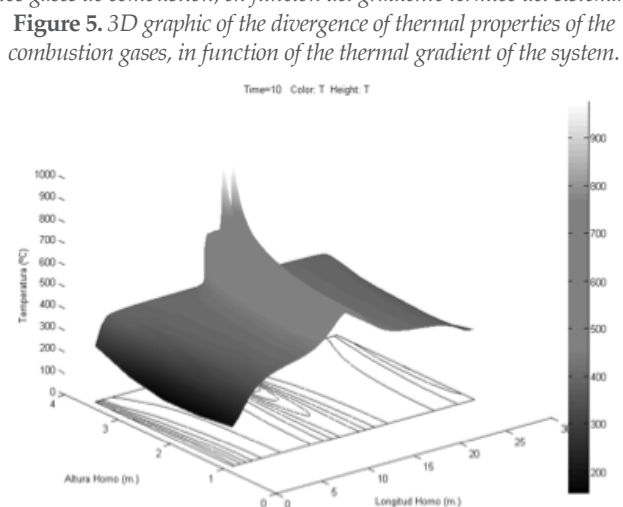
La simulación se realiza con pdetool de Matlab resolviendo la ecuación de transferencia de calor (ecuación 13), con el método parabólico por elementos finitos; el cual permite resolver sistemas definidos sobre dominios limitados y continuos en un plano. Se definieron condiciones de frontera tipo Dirichlet donde se conocen los valores de la solución que necesita la frontera del dominio y tipo Neumann, donde se especifican los valores de la derivada de una solución tomada sobre la frontera. El modelo geométrico para la simulación se proyectó a partir de un esquema de zonas térmicas y de operación del horno (figura 4), sobre una retícula a escala asimétrica, midiendo la longitud del horno (53 m) sobre el eje X (cada unidad representa dos metros), y la altura (3,5 m), sobre el eje Y (cada unidad representa un metro).

$$\rho \cdot C \cdot T - \text{div}(k \cdot \text{grad}(T)) = Q + h \cdot (T_{\text{ext}} - T) \quad (13)$$

Donde: ρ es la densidad; C , es la capacidad calórica; $\text{div}(k \cdot \text{grad}(T))$, es la divergencia del producto entre el coeficiente de conducción y el gradiente de la temperatura de los gases de combustión; Q , es la fuente de calor; h , es el coeficiente de transferencia de calor por convección; T_{ext} , es la temperatura externa y T , es la temperatura de frontera.

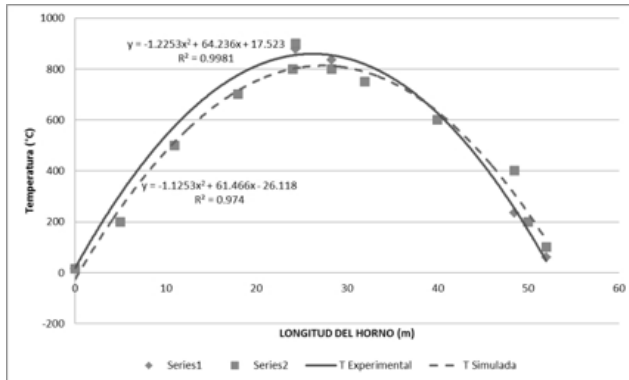
La figura 5 presenta la solución gráfica del sistema por el método parabólico, en una capa diferencial en 3D, que muestra la divergencia de las propiedades térmicas de los gases de combustión, en función del gradiente térmico.

Figura 5. Gráfica 3D de la divergencia de las propiedades térmicas de los gases de combustión, en función del gradiente térmico del sistema.



La validación de los resultados de la simulación del perfil térmico del horno túnel, se hace con base en el análisis del perfil térmico obtenido a partir de los resultados experimentales. En la figura 6 se grafican los valores de las temperaturas simuladas y experimentales para analizar la correlación de datos.

Figura 6. Gráfica de correlación de datos de temperaturas simuladas y experimentales en función de la longitud del horno.
Figure 6. Graphic data correlation of simulated and experimental temperatures in function of the kiln length.



Los datos de las temperaturas experimental y simulada alcanzan los mayores niveles de ajuste mediante las ecuaciones polinómicas de segundo orden:

$$y_{Texp} = -1,23x^2 + 64,24x + 17,52 \quad (14)$$

$$y_{Tsim} = -1,13x^2 + 61,47x - 26,12 \quad (15)$$

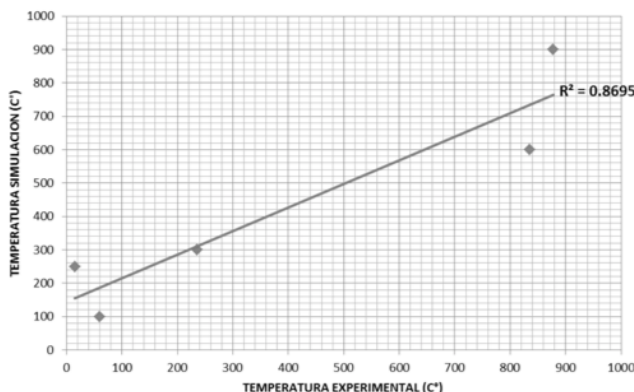
Las líneas de tendencia obtenidas a partir de las ecuaciones 14 y 15, confirman la distribución de calor de acuerdo con el esquema de zonas térmicas y la simulación gráfica de la figura 4. La correlación de datos de la temperatura experimental es de 0,998, mientras que para los datos de temperatura simulada es de 0,974, en los dos casos la dispersión es menor a 0,026. La diferencia de 0,024 entre las correlaciones se debe a que el horno cuenta solamente con 5 puntos de registro de las temperaturas experimentales, mientras que para la temperatura simulada se registraron 12 datos.

En la figura 7, obtiene la correlación entre las temperaturas experimental y simulada, a partir de la línea de tendencia, definida por la ecuación:

$$y = 0,7076x + 143,56 \quad (16)$$

Figura 7. Gráfica de correlación de temperaturas simuladas y experimentales.

Figure 7. Graphic correlation of simulated and experimental temperatures.



El valor de la correlación indica que la desviación entre los datos de las temperaturas experimental y simulada es del 0,13%; de donde se deduce, que la eficiencia de la simulación alcanza el 87%. Este resultado es coherente con otras simulaciones realizadas para establecer el perfil térmico y el flujo de calor en un horno túnel [25].

Cálculo de Energía. La energía térmica necesaria para el proceso de cocción Q_{prcs} , (ec. 16 y 18), es suministrada por el combustible Q_{cmb} ; equivale a la sumatoria de las cantidades de calor Q_i , (ec. 2) [26, 27], que consume cada uno de los componentes másicos del sistema, de acuerdo con las ecuaciones:

$$Q_{prcs} = \sum_{i=1}^n Q_i \quad (17)$$

$$Q_i = mC_p\Delta T \quad (18)$$

Donde m , es la masa, C_p el calor específico del material a presión constante, y ΔT representa el cambio de temperatura experimentado por el material, para su transformación o calentamiento.

Los parámetros para el balance de masa y energía son: un ciclo de cocción con carga completa en el horno (19 vagonetes); temperatura mínima, 15°C (ambiente); temperatura máxima, 900°C y presión atmosférica. El consumo de calor en el proceso está dado por: el calentamiento de la carga estática (Q_{st}), el calentamiento y cocción de la carga dinámica Q_{dy} , (ec. 17) y las pérdidas de calor (Q_{prd}). El calor requerido para el proceso se obtiene mediante la ecuación:

$$Q_{prcs} = Q_{cmb} - (Q_{st} + Q_{dy} + Q_{prd}) \quad (19)$$

El calor consumido por la carga dinámica (Q_{qdy}), es el necesario para cocer los cerámicos (Q_{ccr}), calentar la vagoneta (Q_{wg}), y las cenizas del carbón (Q_{cz}), de donde se obtiene la ecuación:

$$Q_{dy} = Q_{ccr} + Q_{wg} + Q_{cz} \quad (20)$$

Las pérdidas de calor están definidas por la convección (Q_{pcnv}) sobre las paredes externas del horno y el calor remanente en la carga dinámica a la salida del horno: cerámicos (Q_{pcr}), vagoneta (Q_{wg}), y cenizas (Q_{pcz}).

Estas pérdidas se determinaron a partir de la ecuación:

$$Q_{prd} = Q_{pcnv} - Q_{pcr} + Q_{wg} + Q_{pcz} \quad (21)$$

El cálculo de la energía consumida para la cocción de los cerámicos, más las pérdidas generadas por el enfriamiento de la carga dinámica a la salida del horno y la convección sobre las paredes, se define como calor de reposición y se registra en la tabla 5.

Tabla 5. Calor requerido por el sistema.
Table 5. Heat required by the system.

CALOR COMPONENTE	ENERGÍA DE REPOSICIÓN (kcal)	(%)
Q dinámico	7.901.332,2	88,25
Q pérdidas	1.051.401,2	11,75
Q total	8.952.733,4	100

El balance de energía se hace a partir de la ecuación 18; sin embargo, en un proceso continuo el calor de la carga estática (todos los componentes fijos del horno), una vez alcanzado se mantiene constante; así el calor requerido para mantener el horno en operación continua equivale al calor de reposición.

La tabla 6 registra las cantidades de masa de carbón mineral y de gas de síntesis de bajo poder calorífico (135 BTU / SCF), requeridas para suministrar el calor de reposición al proceso.

Tabla 6. Balance de masa y energía para carbón gas de síntesis, requeridos por la energía de reposición.

Table 6. Balance of mass and energy for coal and syngas, required by the reposition energy.

FUENTE DE ENERGÍA	DESCRIPCIÓN	CANTIDAD	UNIDADES
Energía de reposición	Energía carga dinámica más pérdidas	8.952.733,4	(kcal)
Balance termodinámico del carbón	Poder calorífico medio del carbón	7.460,0	(kcal)
	Carbón requerido por combustión directa. (Sin considerar pérdidas por inquemados)	1.200,1	(kg)
Balance termodinámico del gas de síntesis	Energía gas de síntesis con poder calorífico medio	1.203,4	(kcal/m ³ -gas)
	Gas a producir por kilogramo de carbón	5,8	m ³ /kg-carbón
	Carbón requerido por combustión de gas de síntesis	1.282,7	(kg)

Con base en el análisis estequiométrico se requiere 1,2 toneladas de carbón mineral para mantener el horno en operación; considerando pérdidas del 35% por inquemados, el gasto asciende a 1,62 toneladas. Con gas de síntesis se requieren 7439.7 metros cúbicos, producidos a partir de 1,28 toneladas de carbón mineral. La diferencia muestra un ahorro del 21% en consumo de carbón.

4. CONCLUSIONES

Las muestras de carbón de la provincia Centro de Boyacá, caracterizadas bajo procedimientos de norma ASTM, se clasifican como carbones de bajo rango, los cuales son ampliamente usados en procesos de gasificación a nivel internacional; estos resultados permiten promover el desarrollo e implementación del proceso de

gasificación de carbón, como forma alternativa de uso de este abundante recurso a nivel regional y nacional.

El estudio y análisis estequiométrico del proceso de gasificación con carbones de la provincia Centro de Boyacá, establece la viabilidad para producir gas de síntesis de bajo poder calorífico (gas pobre), usando aire en déficit al 25%. El proceso se puede optimizar mezclando o substituyendo aire por vapor de agua, para minimizar contenidos de CO₂ y N₂ en las emisiones; en consecuencia, aumenta la capacidad energética por incremento CO, e H₂ en la composición y se obtiene un gas de poder calorífico medio.

A partir del análisis térmico y el balance de masa del proceso de cocción de cerámicos en horno túnel, se concluye que la combustión de gas de síntesis, a diferencia de la combustión directa de carbón no produce residuos sólidos, lo cual mejora la eficiencia térmica por incremento en la velocidad de calentamiento de la carga útil, y minimización de pérdidas de energía por carbón inquemado y arrastre de calor en cenizas calientes a la salida del horno. El calor de reposición necesario para mantener el horno en operación continua se genera a partir de la combustión de gas de síntesis, el cual se produce con un 21% menos del carbón requerido para producir la misma cantidad de energía por combustión directa.

La correlación de datos de las temperaturas experimentales y simuladas son de 0,998 y 0,974 respectivamente, que se ajustan a funciones polinómicas de segundo grado con desviaciones de 0,002 y 0,026; se deduce confiabilidad del 99%. La diferencia en los valores de correlación de los datos simulados con los experimentales es de 0,024, lo cual indica que la confiabilidad de la simulación es del 97,6%. La precisión de la simulación se explica por el uso de datos experimentales para definir las condiciones de frontera y los parámetros de operación del horno. Los resultados de los análisis estequiométrico y termodinámico del proceso de cocción de cerámicos en horno túnel, demuestran la viabilidad energética para hacer la conversión del proceso de cocción por combustión directa de carbón, a combustión de gas de síntesis, promoviendo el consumo de un recurso estratégico a nivel regional y nacional bajo condiciones sostenibles. A partir de estos resultados se proyecta la continuidad de la investigación en su fase experimental [1].

REFERENCIAS

- [1] P. Correa. (2016). Colombia reducirá en un 20% sus emisiones de CO₂ [Internet], El Espectador. Disponible desde: <http://www.elespectador.com/noticias/medio-ambiente/colombia-reducira-20-sus-emisiones-de-co2-articulo-584492> [Acceso 22 de abril 2016].
- [2] J. Cetina, Informe Monitoreo isocinético en chimenea – Monitoreo calidad del aire PM₁₀-SO_x-NO_x. Ladrillera Fénix Tunja, Tunja: Asistencia y Monitoreo Ambiental, 2014.

- [3] Agencia Nacional Minera (ANM). 2015. Carbón [Internet], ANM. Disponible desde: <https://www.anm.gov.co/sites/default/files/DocumentosAnm/carbon_0.pdf> [Acceso 15 de agosto de 2016].
- [4] Unidad de Planeación Minero-Energética (UPME). 2015 Reservas carboníferas de Colombia. Plan de desarrollo del subsector carbón 1999-2010. [Internet], UPME. Disponible desde: <http://www.upme.gov.co/guia_ambiental/carbon/areas/zonas/indice.htm> [Acceso 1 de septiembre de 2016].
- [5] J. Rezaiyan and N.P. Cheremisinoff. "Gasification technologies: a primer for engineers and scientists", Taylor & Francis Editores, U.S.A. 2005, pp 5.
- [6] P.N. Sheth, B. Babu, "Experimental studies on producer gas generation from wood waste in a downdraft biomass gasifier", *Bioresource and Technology*, 100, 3127-3133, 2009.
- [7] E. Graciosa, J. Nogueira, J.L. Oliveira, C.S. Machado, "Sustainable energy: A review of gasification technologies", *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 16 (7), 4753-4762, 2012.
- [8] K. Qin, (2012, 09). *Entrained Flow Gasification of Biomass*. Tesis Doctoral. Technical University of Denmark Danmarks Tekniske Universitet, Risø National Laboratory for Sustainable Energy Risø National laboratoriet for Bæredygtig Energy.
- [9] W. W. Bodle, J. Heubler. Coal Handbook. Institute of gas technology Chicago Illinois United States of America, Edited by Marcel Decker inc., 1981, pp 493-713.
- [10] ASTM Designations: D 2234, D 2013, D 3173, D 3174, D 3175, D 720, D 3172, D 4239, D 5865, D 3180, D 388. Copyright © ASTM, 100 Barr Harbor Drive, West Conshohocken, PA 19428-2959, United States. 2012
- [11] S. V. Vassilev, C.G. Vassileva, "A new approach for the combined chemical and mineral classification of the inorganic matter in coal: Chemical and mineral classification systems", *Fuel*, 88, 235-45, 2009.
- [12] S.V. Vassilev, K. Kitano, S. Takeda, T. Tsurue, "Influence of mineral and chemical composition of coal ashes on their fusibility", *Fuel Processing Technology*, 45, 27-51, 1995.
- [13] L. Mojica, J. Mariño, "Estado de la exploración y posibilidades de gas asociado al carbón (gac) en Boyacá (Colombia)", *Boletín de Geología*, 35(2), 2013, pp 31 - 34.
- [14] INGEOMINAS y MINERCOL. (2004), El carbón-colombiano: Recursos reservas y calidad [Internet]. Disponible desde: <https://es.scribd.com/document/205758738/EL-CARBON-COLOMBIANO-Recursos-Reservas-y-Calidad>, [oct 22].
- [15] J. A. Rodríguez, O. Solano, 2000. Mapa Geológico del Departamento de Boyacá. [Internet], INGEOMINAS, Ministerio de Minas y Energía. Bogotá Colombia, Disponible desde: <https://www.academia.edu/10674255/mapa_geologico_del_departamento_de_boyaca_Memoria_explicativa_Elaborada_por_antonio_jos%C3%89_rodr%C3%8Dguez_parra_orlando_solano_silva> [Acceso 03 de septiembre de 2016].
- [16] C.I. Duarte, F.A. Parra, Exploración Gas Metano Asociado al Carbón. Área Checua – Lenguaque. Guachetá – Samacá. Bogotá, Servicio Geológico Colombiano, Ministerio de Minas y Energía, 2013, pp. 67-76.
- [17] I. Adeyemi, I. Janajreh, T. Arink, C. Ghenai, "Gasification behavior of coal and woody biomass: Validation and parametrical study", *Applied Energy*, 185 (2), 1007 – 1018, 2017.
- [18] A. Innocenti, N. Kamarulzaman, Stoichiometry and Materials Science - When Numbers Matter, Croatia, InTech, 2012, pp. 415.
- [19] M. Öztürk, N. Özek, Y. E. Yüksel, "Gasification of various types of tertiary coals: A sustainability approach", *Energy Conversion and Management*, 56, 157-165, 2012.
- [20] A.J. Minchener, "Coal gasification for advanced power generation", *Fuel*, 84(17), 2222-2235, 2005.
- [21] J.F. Vélez, F. Chejne, C.F. Valdés, E.J. Emery, C.A. Londoño, "Co-gasification of Colombian coal and biomass in fluidized bed: an experimental study", *Fuel*, 88(3), 424-430, 2009.
- [22] D. Montgomery, Design and analysis of experiments. John Wiley & Sons, México, 2008, pp. 21-54.
- [23] D. A. Bell, B. F. Towler, M. Fan, Coal gasification and its applications, Great Britain, Elsevier. 2011, pp. 39-41.
- [24] Y. T. Bolívar, M.A. Ardila, (2016), Análisis Térmico del horno túnel de la Ladrillera Fénix Tunja. Tesis de pregrado. Universidad Pedagógica y Tecnológica de Colombia. Tunja.
- [25] R.P. Oba, "Thermal analysis of a tunnel kiln used to produce roof tiles", *Applied Thermal Engineering*, 63, 59-65, 2014.
- [26] Y. A. Cengel, M. A. Boles. Termodinámica. México, Edit. Mc Graw Hill, 2011, pp. 165-226.
- [27] Y. A. Cengel. Transferencia de Calor y Masa. México, Edit. Mc Graw Hill, 2007, pp. 174-179.