

ESTUDIO CINÉTICO DE LA GASIFICACIÓN DE RESIDUOS DE LA INDUSTRIA AZUCARERA

P. J. Villegas*, P. R. Bonelli, M. C. Cassanello, A. L. Cukierman

Programa de Investigación y Desarrollo de Fuentes Alternativas de Materias Primas y Energía (PINMATE),
Departamento de Industrias, Facultad de Ciencias Exactas y Naturales, Universidad de Buenos Aires. Ciudad
Universitaria, 1428, Buenos Aires, Argentina.-Fax: (+54-1) 784 0208 - email: analea@di.fcen.uba.ar

* Centro de Estudio de Termoenergética Azucarera (CETA), Facultad de Ingeniería Mecánica, Universidad
Central de Las Villas, Santa Clara, 54830, Cuba.
Fax: (+53) 422 81608 - email: ceta@ucentral.quantum.inf.cu

RESUMEN

Se estudió la cinética de la gasificación de los productos sólidos resultantes de la pirólisis del bagazo y los residuos agrícolas de la caña de azúcar, en el rango de temperaturas de 623 a 823 K con aire diluido (10% de O₂). Los datos cinéticos obtenidos mediante análisis termogravimétrico isotérmico se representaron considerando una reacción de una sola etapa global con un número reducido de parámetros. El modelo aplicado ajusta satisfactoriamente los resultados experimentales en el rango de temperaturas estudiado.

INTRODUCCION

En varios países en desarrollo, el bagazo de caña de azúcar ha sido frecuentemente empleado para generar energía. La utilización eficiente de este tipo de biomasa y el desarrollo de tecnologías avanzadas basadas en su transformación mediante gasificación, requiere del conocimiento de la cinética de este proceso de conversión térmica, a fin de llevar a cabo el adecuado diseño de gasificadores (Bridgewater y Grassi, 1991, Cukierman et. al., 1996). Sin embargo, la información existente en la literatura sobre esta temática es escasa. Asimismo, considerando que durante ciertos períodos la provisión de bagazo de caña no alcanza para cubrir la demanda requerida, se utilizan hojas de caña, denominadas genéricamente residuos agrícolas cañeros (RAC), como combustible alternativo. En consecuencia, el estudio de la cinética de la gasificación de los RAC resulta también de especial importancia.

En este contexto, el objetivo de este trabajo es la caracterización cinética de la gasificación de bagazo de caña de azúcar y residuos agrícolas cañeros, previamente pirolizados (chars).

PARTE EXPERIMENTAL

Se trabajó con bagazo y RAC provenientes del Central Azucarero "Luis Arcos Bergnes" del Municipio Camajuaní de la Provincia de Villa Clara, Cuba. Para la preparación de las muestras de chars, se acondicionaron previamente las biomásas utilizadas homogeneizando y secando las mismas.

Las muestras de chars se prepararon por devolatilización en atmósfera de nitrógeno a 550°C, durante 1.5 horas. Para ello, se utilizó un reactor cilíndrico herméticamente cerrado con circulación de nitrógeno (80 ml/min.) calefaccionado hasta la temperatura de pirólisis a una velocidad de calentamiento de 10 °C/min. Se procedía luego a enfriar la muestra hasta temperatura ambiente, manteniendo la circulación de nitrógeno. Los chars así obtenidos se molieron y tamizaron, reservándose para las mediciones cinéticas las fracciones de diámetros de partícula menores o iguales a 37 µm.

La caracterización química de las muestras de biomasa cañera y de los chars se llevó a cabo mediante análisis inmediato, según técnicas standard.

Se realizaron mediciones de la cinética de gasificación de los chars de bagazo y RAC mediante análisis termogravimétrico isotérmico en una termobalanza Netzsch STA 409, acoplada a un sistema de adquisición de datos; éstas se llevaron a cabo para un rango de temperaturas de 623 hasta 823 K. Se utilizaron masas de 5 mg de muestra, fracciones de diámetro de partícula menores de 37 µm y un caudal total de 500 ml/min., a fin de minimizar los efectos difusionales intrapartícula y en película externa. Las experiencias se realizaron, como mínimo, por triplicado para asegurar su reproducibilidad.

El sistema de alimentación consistía en tubos de nitrógeno y aire (99.999% de pureza) con sus correspondientes manómetros. Los flujos de gases se regulaban mediante válvulas aguja para obtener la concentración de oxígeno deseada y se medían con caudalímetros capilares, que permitían además verificar la constancia de caudal durante el transcurso de cada experiencia.

La muestra pesada se colocaba en un portamuestra dentro del horno; se fijaban los caudales de nitrógeno y aire, a fin de alcanzar la concentración de oxígeno utilizada, y se calefaccionaba en atmósfera de nitrógeno hasta la temperatura de

reacción deseada. Una vez alcanzada esta temperatura, se accionaba la válvula que conectaba el aire al sistema, y se registraba en forma continua la pérdida de peso de la muestra en función del tiempo.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Tabla 1, se presentan los resultados de los análisis inmediatos obtenidos para las biomazas y los chars preparados a partir de éstas; la pirólisis conduce a una disminución del contenido de volátiles acompañada de un aumento del carbono fijo y cenizas.

Tabla 1. Caracterización química de las biomazas y sus chars. Análisis inmediato.

Materia prima	% Volátiles (l/h)	% Carbono fijo (l/h)	% Cenizas (l/h)
Bagazo	84.9	12.3	2.8
Char de bagazo	15.6	73.6	10.8
RAC	79.2	15.0	5.8
Char de RAC	18.9	60.0	21.1

l/h: libre de humedad.

Las Figuras 1 y 2 ejemplifican los termogramas isotérmicos obtenidos para el bagazo y los RAC, respectivamente, a las diferentes temperaturas de gasificación empleadas. Estos ilustran la variación de la fracción másica instantánea ($w = m/m_0$) con el tiempo, donde m es la masa del sólido a diferentes tiempos y m_0 la masa inicial del sólido libre de humedad. Se observa que la temperatura influye notablemente en la velocidad del proceso para ambos materiales.

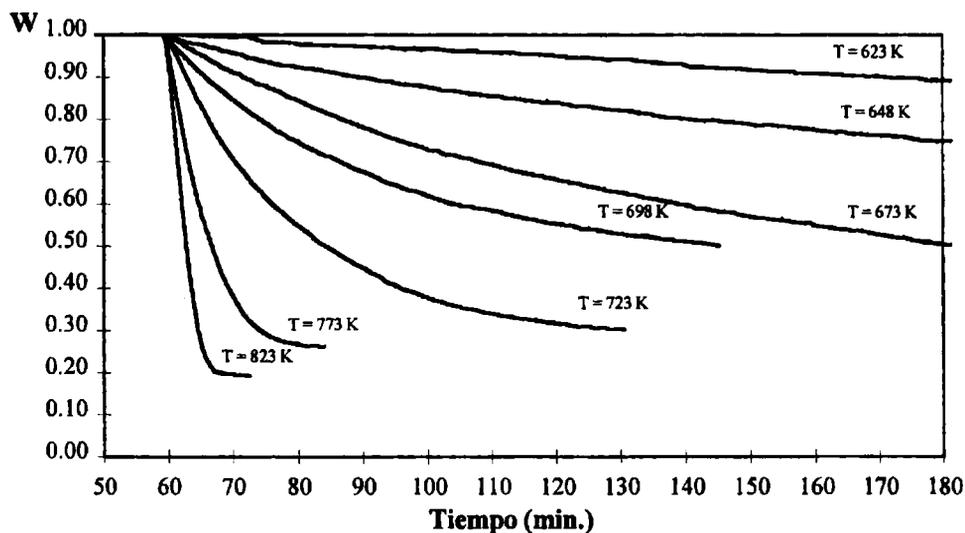


Figura 1. Termogramas de la gasificación del char de bagazo de caña de azúcar ($dp < 37 \mu m$) con aire diluido (10% de O_2) a diferentes temperaturas.

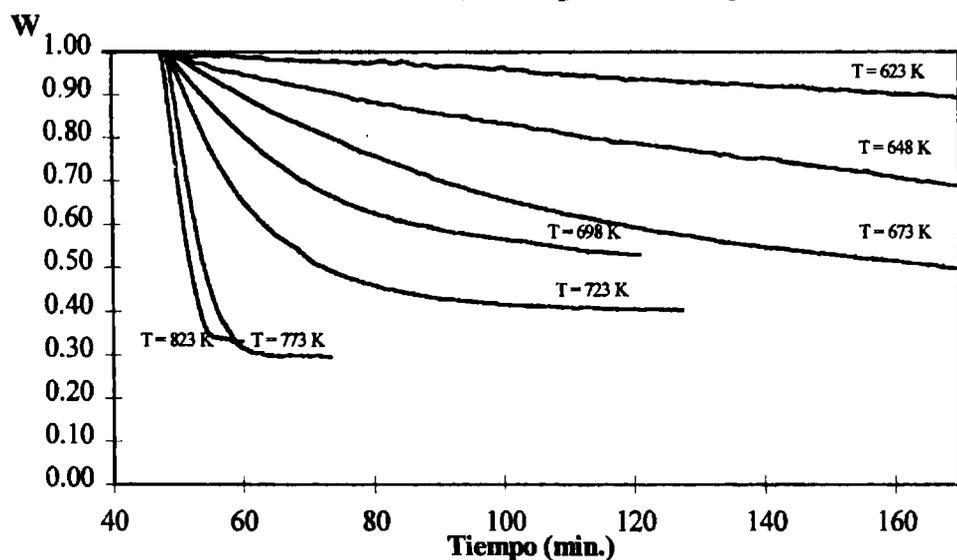


Figura 2. Termogramas de la gasificación del char de los RAC ($dp < 37 \mu m$) con aire diluido (10% de O_2) a diferentes temperaturas.

Para caracterizar la cinética de la gasificación de chars de residuos biomásicos con distintas concentraciones oxígeno se ha empleado un modelo que considera la gasificación como una reacción de una sola etapa global de orden n respecto del sólido y orden p respecto del reactivo gaseoso (Luo y Stanmore, 1992; Di Blasi y col., 1998). La expresión cinética resultante es la siguiente:

$$\frac{dx}{dt} = k p (O_2)^p (1-x)^n$$

donde x es la conversión del sólido ($x = (m_0 - m) / m_0 = 1 - w$), y k , la constante de reacción.

Cuando se trabaja a presión de oxígeno constante, la expresión anterior se reduce a:

$$\frac{dx}{dt} = k' w^n$$

donde k' incluye la presión de oxígeno.

Se realizó el ajuste de los datos experimentales w vs t mediante análisis de regresión no lineal, fijando el valor de $n = 1$ o dejándolo como parámetro de ajuste. En este último caso se ajustaron los termogramas isotérmicos por separado para evaluar un valor medio del orden n y luego se reajustaron las curvas empleando el valor de n promedio. Los valores de $\ln k'$ se representaron en función de la inversa de la temperatura con el fin de calcular la energía de activación del proceso de gasificación en el rango de temperaturas estudiadas.

En la Figuras 3 y 4 se muestran los gráficos, obtenidos de esta forma para bagazo de caña y RAC, respectivamente. En ambos casos, se observa una tendencia lineal para el rango de temperaturas de 623 a 773 K, encontrándose un cambio de pendiente a temperaturas superiores a 773 K, lo cual puede atribuirse a que los efectos difusionales se tornan apreciables.

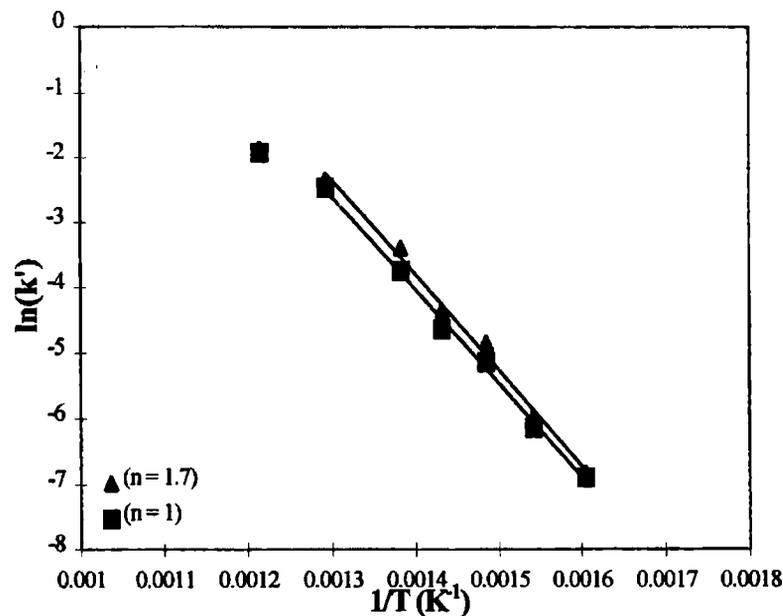


Figura 3. Gráfico de Arrhenius de la gasificación del char de bagazo de caña de azúcar ($d_p < 37 \mu m$) con aire diluido (10% de O_2).

En la Tabla 2 se presentan los valores de los parámetros cinéticos estimados a partir de la aplicación del modelo mencionado a los datos experimentales en el rango de temperaturas de 623 a 773 K.

Tabla 2. Parámetros cinéticos obtenidos para la gasificación de la biomasa cañera con aire diluido (10% de O_2).

Muestra	n = 1		n = promedio	
	EA (kJ)	$k' \times 10^6$	EA (kJ)	$k' \times 10^6$
Bagazo de caña de azúcar	121	16.3	119	8.7
Residuos agrícolas cañeros	120	13.7	114	3.6

Se observa que los valores de las energías de activación (EA) calculados para ambos residuos son similares y no difieren significativamente de los informados en la literatura para otros residuos biomásicos (Di Blasi y col., 1998). Asimismo, se encuentra que el char de RAC es ligeramente menos reactivo que el de bagazo si se comparan los valores del factor preexponencial aparente, si bien debe tenerse en cuenta que la influencia de la presión de oxígeno puede afectar en forma distinta la gasificación de estos residuos.

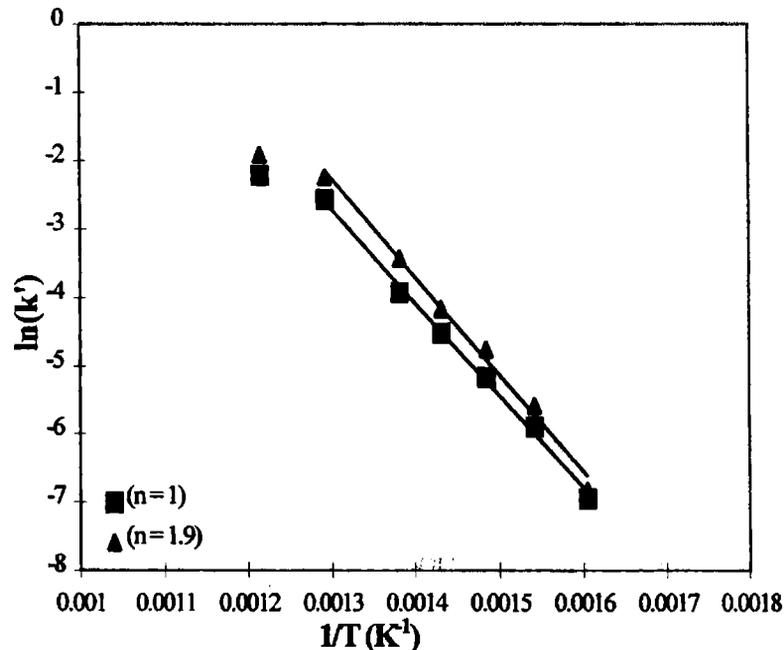


Figura 4. Gráfico de Arrhenius de la gasificación del char de RAC ($dp < 37 \mu m$) con aire diluido (10% de O_2).

CONCLUSIONES

Se llevó a cabo un estudio cinético a fin de caracterizar la gasificación de chars de residuos de la industria azucarera con aire diluido (10% de O_2) en el rango de temperaturas de 623 a 823 K. Los datos experimentales se ajustaron mediante un modelo sencillo que considera una reacción de una sola etapa global. Se encontró, para ambos residuos, que la reacción puede representarse satisfactoriamente mediante este modelo con la misma energía de activación hasta una temperatura de 773 K. A temperaturas superiores, los efectos difusionales se tornan significativos.

AGRADECIMIENTOS

Los autores agradecen el apoyo económico de la Universidad de Buenos Aires y el CONICET. El Lic. Pedro Villegas desea agradecer a la CEE por la beca de entrenamiento otorgada (Project No. 5.0075.9) para realizar este trabajo en el PINMATE (Argentina).

REFERENCIAS

- Bridgwater A.V. y Grassi G., *Biomass pyrolysis liquids upgrading and utilization*. Elsevier Applied Science, London and New York (1991).
- Cukierman A.L., Della Rocca P.A., Bonelli P.R. y Cassanello M.C., On the study of thermochemical biomass conversion. *Trends in Chemical Engineering*, 3, 129-144 (1996).
- Di Blasi, C., Buonano, F., Branca, C., Combustion Kinetics of Chars derived from Agricultural Residues. Biomass for Energy and Industry, 10th European Conference and Technology Exhibition, Würzburg, Alemania (1998).
- Luo, M., Stanmore, B., The combustion characteristics of char from pulverized bagasse, *Fuel*, 71, 1074-1076 (1992).