

# combustión de carbones en un lecho fluidizado\*

Alfredo Gordon S.\*\* y Alejandro Reyes S.\*\*\*

---

*RESUMEN: El presente trabajo experimental involucra la determinación de algunos parámetros que caracterizan la combustión de partículas de carbón en un lecho fluidizado, utilizando caliza o dolomita para controlar la emisión de azufre.*

*La parte principal del equipo, la columna de fluidización, fue construida de cemento refractario de 10.5 cm. de diámetro y 85 cm. de altura.*

*Los resultados experimentales para la velocidad mínima de fluidización fueron similares a los calculados con la ecuación de Babu<sup>2</sup>. Se observaron fuertes variaciones de la temperatura con la velocidad del aire, contenido muy bajo de CO en los gases de combustión, estabilidad en la temperatura para un conjunto de parámetros y una retención de azufre menor que los valores publicados.*

*SUMMARY: The present experimental work involved the determination of some parameters that features the combustion of carbon particles in a fluidized bed, utilizing limestone or dolomite for sulfur emission control.*

*The principal piece of the equipment, the fluidization column, was made from refractory cement, 10.5 cm in diameter and 85 cm high.*

*The experimental results for minimum fluidization velocity were similar to those calculated with the Babu<sup>2</sup> equations. It was observed a strongly variation of temperature with air velocity, very low CO content in the combustion gas, temperature stability for a given set of parameters and a lower sulfur retention than published data.*

---

\* Manuscrito revisado y aprobado en forma definitiva en Noviembre de 1981.

\*\* Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Concepción.

\*\*\* Departamento de Ingeniería Química, Facultad de Ingeniería, Universidad de Santiago de Chile, (ex-Universidad Técnica del Estado).

## FUNDAMENTOS Y GENERALIDADES

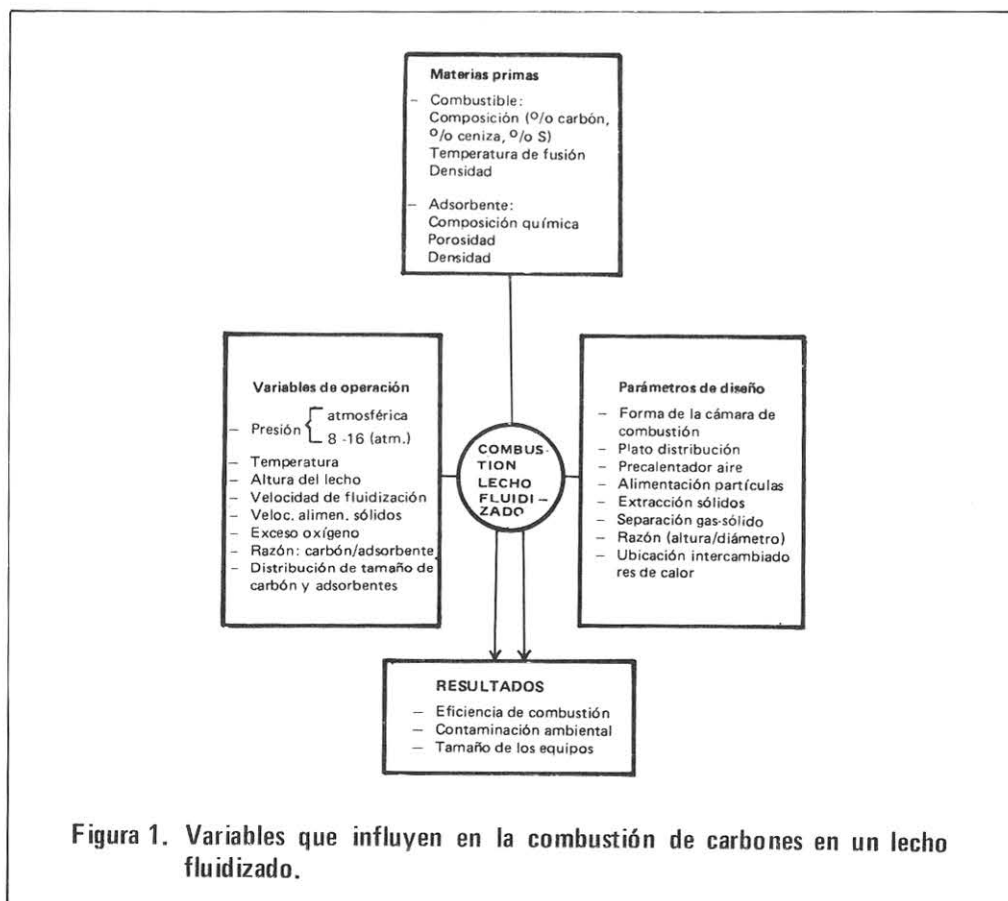
### Descripción General

La combustión en un lecho fluidizado es una innovación técnica versátil que permite quemar carbón y otros combustibles problemáticos en forma “limpia” produciendo calor, vapor y electricidad en forma más eficiente que los sistemas convencionales y a un costo razonable.

Una caldera de lecho fluidizado consiste esencialmente de partículas de sólido “soportadas” por un distribuidor de aire. El lecho contiene partículas de sólidos que pueden ser inertes (como cenizas) o bien materiales como caliza ( $\text{CaCO}_3$ ) y/o dolomita ( $\text{MgCO}_3 \cdot \text{CaCO}_3$ ) utilizados para adsorber el  $\text{SO}_2$  producido en la combustión del carbón, especialmente cuando éste tiene un alto contenido de azufre. El material del lecho es agitado y puesto en movimiento turbulento al subir el aire a través del distribuidor a una velocidad superficial adecuada. Esta, a su vez, depende principalmente del tamaño y densidad de las partículas.

Para maximizar la captura de  $\text{SO}_2$  por los materiales adsorbentes y prevenir la aglomeración de las cenizas, la temperatura del lecho debe ser mantenida entre 800 y 950°C. La operación de un lecho fluidizado a tales temperaturas, relativamente bajas, reduce además la emisión de óxidos de nitrógeno,  $\text{NO}_x$ , contaminantes de la atmósfera.

El término “combustión en un lecho fluidizado” es una descripción general de donde nacen muchas tendencias (algunas de ellas opuestas) y que dan características especiales a cada diseño. En figura Nº 1 se muestra en forma esquemática las principales variables de diseño y operación, cuya combinación debe ser decidida a fin de obtener la máxima rentabilidad económica (sin olvidar los problemas de contaminación ambiental). La elección de variables dependerá en gran parte de las características de las materias primas disponibles.



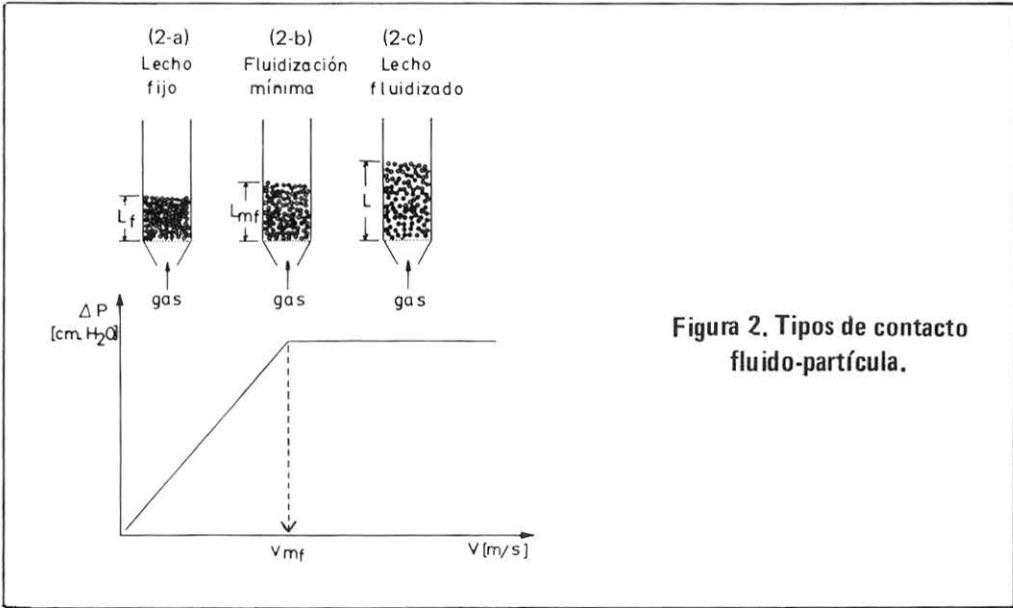
**Descripción fluido mecánica**

Al pasar un gas a través de un lecho de partículas sólidas existen tres alternativas respecto al comportamiento del lecho (figura 2):

- a) Si la velocidad del aire es baja, el fluido se filtra hacia arriba y se dice que el **lecho está fijo** (figura 2-a).
- b) A medida que se aumenta la velocidad de flujo se llegará a un punto en que el lecho se expandirá, pero aún las partículas mantendrán sus posiciones relativas, esta velocidad se denomina **velocidad mínima de fluidización** (figura 2-b).
- c) Al seguir aumentando la velocidad de fluidización, las partículas se mueven más vigorosamente, chocando unas con otras, perdiendo sus posiciones iniciales y decimos que el **lecho está fluidizado** (figura 2-c).

En figura 3 se comparan valores experimentales de  $V_{mf}$ , obtenidas a través de lecturas de pérdida de carga en el lecho vs velocidad de fluidización, con valores calculados utilizando ec. 3 y ec. 4.

La determinación experimental de  $V_{mf}$  resulta fácil cuando se trata de un solo tipo de partículas, sin embargo, cuando se tienen mezclas de diferentes densidades con distribución de tamaño, la determinación es poco clara y es prácticamente imposible cuando, además, se trabaja a altas temperaturas, ya que se corre el riesgo de que se aglomeren las partículas en el interior del lecho al operar con bajas velocidades de aire.



**Figura 2. Tipos de contacto fluido-partícula.**

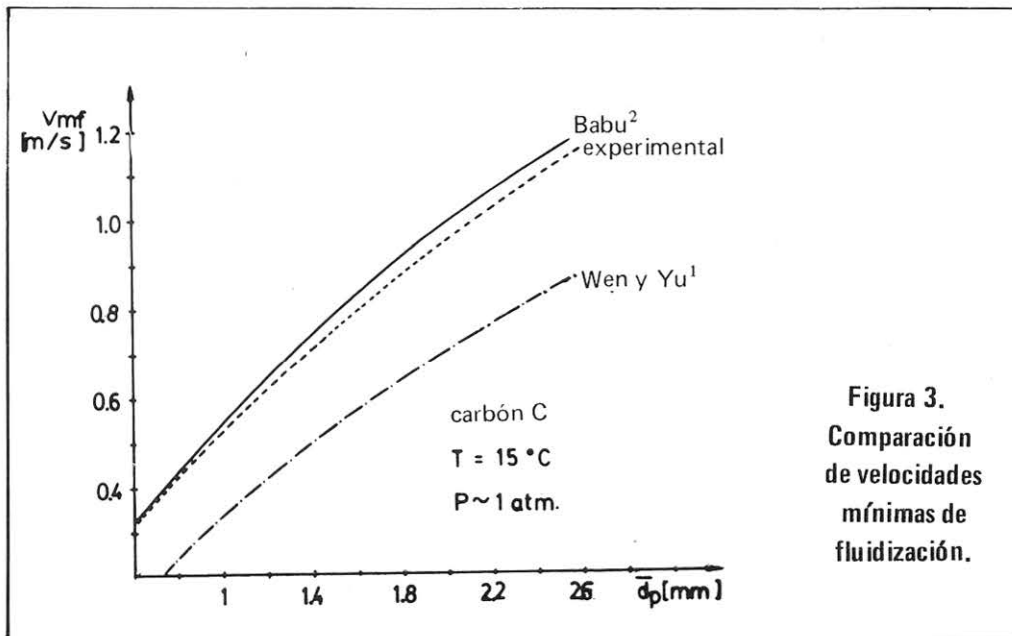
**VELOCIDAD MINIMA DE FLUIDIZACION ( $V_{mf}$ )**

Aunque la definición de “velocidad mínima de fluidización” está sujeta a varias interpretaciones, continúa siendo una medida fundamental en fluidización. En general, se asume que el punto de fluidización mínima ocurre cuando:

$$\text{Fuerza de arrastre ejercida por el flujo de gas} = \text{Peso de las partículas} \tag{1}$$

A través de relaciones conocidas para lechos porosos es posible llegar a la siguiente expresión, que permite determinar  $V_{mf}^1$ :

$$\frac{1.75}{\phi_s \epsilon_{mf}^3} \left| \frac{d_p V_{mf} \rho_g}{\mu} \right|^2 + \frac{150(1 - \epsilon_{mf})}{\phi_s^2 \epsilon_{mf}^3} \cdot \frac{d_p V_{mf} \rho_g}{\mu} =$$



$$= \frac{d_p^3 \cdot \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \quad (2)$$

Para obtener  $V_{mf}$  de ec. 2 es necesario conocer previamente  $\epsilon_{mf}$  del lecho y  $\phi_s$  (definida como la razón de superficie de una esfera con igual volumen de partículas, dividido por la superficie de las partículas), valores que son difíciles de determinar.

En la literatura<sup>2</sup> se encuentran numerosas correlaciones que permiten estimar  $V_{mf}$ , a partir de valores fáciles de obtener. Las más conocidas y que predicen valores con menor error son las de Wen y Yu (ec. 3) y la de Babu et al. (ec. 4):

Ecuación de Wen y Yu<sup>1</sup>:

$$\frac{d_p V_{mf} \rho_g}{\mu} = \left| (33.7)^2 + 0.0408 \frac{d_p^3 \rho_g (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right|^{1/2} - 33.7 \quad (3)$$

Ecuación de Babu et al.<sup>2</sup>:

$$\frac{d_p V_{mf} \rho_g}{\mu} = \left| (25.25)^2 + 0.0651 \cdot \frac{d_p^3 \cdot \rho_g \cdot (\rho_s - \rho_g) g}{\mu^2} \right|^{1/2} - 25.25 \quad (4)$$

## COMBUSTION Y DESULFURIZACION

### Mecanismo de combustión

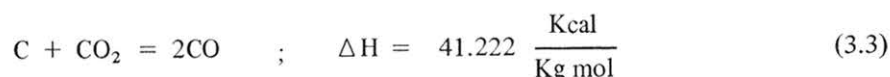
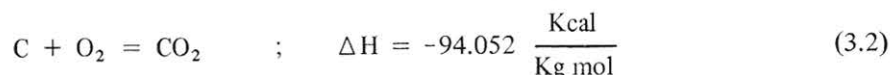
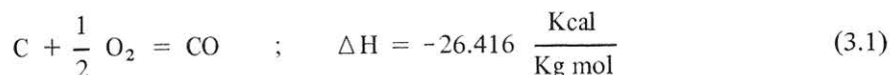
Es posible distinguir los siguientes pasos en el proceso de combustión en lecho fluidizado:

- Calentamiento y liberación de los volátiles.** Se estima un tiempo de liberación de aproximadamente 1 segundo para partículas de un tamaño cercano a 1 mm. El proceso es función del transporte de masa a través de los poros del material y por lo tanto el tiempo es función del tamaño de las partículas.
- Combustión de los volátiles liberados.** Depende de la estructura y composición de los volátiles, como de las condiciones técnicas del lecho mismo. Se estima que los volátiles son responsables de aproximadamente un 40% del calor total liberado en el sistema.

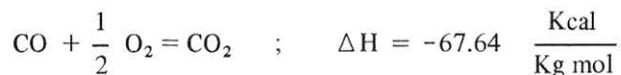
- c) **Combustión del carbón fijo.** Numerosos experimentos efectuados pueden resumirse en el siguiente mecanismo de reacción:<sup>3</sup>

El oxígeno difunde desde el seno de la corriente de aire hasta la partícula de carbón donde reacciona para formar primariamente CO. A temperaturas superiores de 1000°C y en condiciones de equilibrio, las concentraciones de CO<sub>2</sub> y O<sub>2</sub> en la superficie de las partículas es nula. El CO producido en la superficie difunde alejándose de las partículas de carbón y reacciona con el O<sub>2</sub> que entra con la corriente de aire, en una reacción gaseosa homogénea para formar CO<sub>2</sub>. Parte del dióxido difunde de vuelta a la superficie del carbón donde es reducido a monóxido.

Puede observarse que las siguientes reacciones heterogéneas pueden ocurrir en el lecho fluidizado:



El segundo paso en el mecanismo descrito es la difusión del CO hacia el seno del aire para producir la reacción gaseosa homogénea:



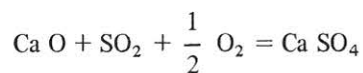
### Desulfurización

Se ha encontrado que la caliza y la dolomita son buenos adsorbentes del SO<sub>2</sub>.

Al entrar en el lecho fluidizado la caliza es calcinada según la reacción endotérmica:



La reacción con el SO<sub>2</sub> ocurre en el medio oxidante del lecho según:



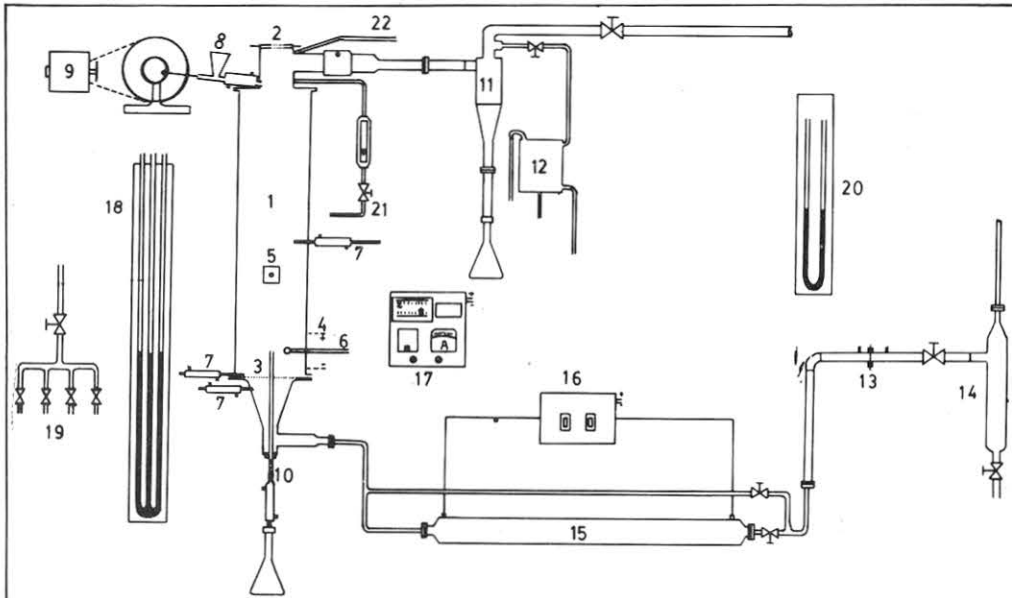
Las reacciones para la dolomita son análogas.

## TRABAJO EXPERIMENTAL

### Equipo Experimental

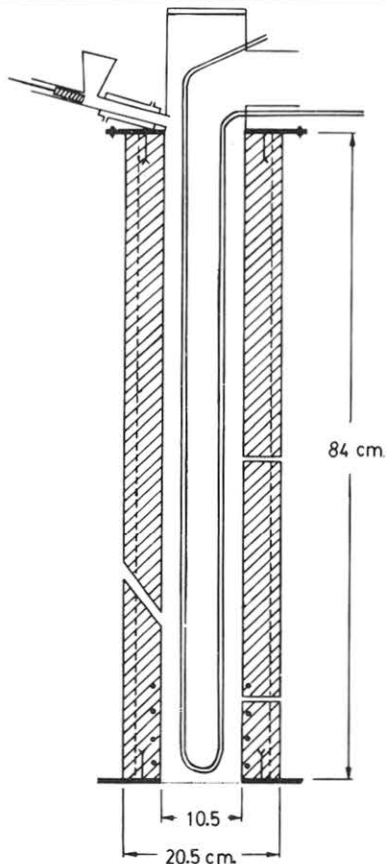
El equipo experimental, diseñado originalmente para realizar experiencias en forma batch<sup>4</sup>, fue modificado hasta llegar al equipo mostrado en la figura 4, que permite realizar la combustión de carbones en forma semi-continua. A continuación se describen las partes principales del equipo:

- Tubo de fluidización.** Se construyó de cemento refractario con un diámetro interior de 10.5 cm, espesor 5 cm y altura 84 cm. En su interior lleva incorporado una malla de alambre a fin de aumentar la resistencia mecánica (figura 5).
- Separador de partículas.** Se diseñó un ciclón separador de acuerdo a especificaciones de bibliografía.<sup>5</sup> Es capaz de separar partículas de hasta 0.034 mm.



**Figura 4. Esquema del equipo experimental.**

1. Tubo de fluidización. 2. Tapa superior (con mirilla). 3. Plato distribuidor de aire. 4. Salida resistencia eléctrica. 5. Orificio que permite introducir soplete a gas. 6. Termocupla. 7. Tomas piezométricas refrigeradas. 8. Tolva de alimentación de partículas. 9. Motor con regulador de velocidad. 10. Sistema de extracción de sólidos. 11. Ciclón separador de partículas. 12. Enfriador de gases. 13. Plato orificio. 14. Filtro aire. 15. Tubo con resistencias eléctricas en su interior. 16. Tablero con interruptores de resistencia eléctrica. 17. Tablero con enchufes para termocuplas y reóstato. Incluye un voltímetro y dos instrumentos indicadores de temperatura.



**Figura 5. Vista en corte del tubo de fluidización.**

- c) **Plato distribución.** Se utilizaron 2 tipos de platos, no observándose ninguna tendencia en las características de la combustión, que permitieran establecer el mejor funcionamiento de uno sobre otro. A continuación se resumen sus características principales:

**TABLA 1**  
**Platos distribuidores**

	Plato 1	Plato 2
Diámetro orificio (cm)	0.1	0.1
Número orificios	340	785
Espesor plato (pulg.)	1/8	1/8
Dist. entre orificios (cm)	0.5	0.353
o/o área orificios	3.08	7.1

- d) **Alimentador de sólidos.** Consiste de un tubo en cuyo interior se desplaza un pistón que empuja los sólidos, que se deslizan desde una tolva, cayendo por gravedad a la zona de combustión. El pistón se mueve mediante un motor, provisto de un regulador de velocidad, lo que permite variar la velocidad de alimentación de partículas.
- e) **Medición de temperatura.** Se utilizaron termocuplas de (Ni) - (CrNi), protegidas con una vaina de acero. Estas se conectaron con un instrumento digital.
- f) **Tomas piezométricas.** Fueron enfriadas mediante pequeñas camisas refrigerantes. Permiten determinar la caída de presión a través del plato y a través del lecho de partículas.
- g) **Encendido del lecho.** Inicialmente se utilizó una resistencia eléctrica incorporada a la pared en la parte inferior del tubo de fluidización. Este sistema fue dejado inoperante tras algunos ensayos preliminares. Posteriormente, se utilizó el encendido de las partículas mediante un sistema lateral (con llama directa). Este sistema dio resultados aceptables.
- h) **Pre-calentamiento del aire de fluidización.** Para lograr el precalentamiento del aire se le hizo circular por un tubo en cuyo interior se tenía resistencias eléctricas con un total de 4 KW. Cuando el lecho se encuentra encendido, el aire de fluidización se hace circular en by-pass por el precalentador a fin de introducirlo a temperatura ambiente al lecho caliente.

#### MATERIALES EMPLEADOS

Se utilizó carbones nacionales provenientes de las minas de Lota-Schwager. Como adsorbentes se usó caliza y dolomita provenientes de isla Guarello. Sus tamaños y propiedades físico-químicas se detallan en tablas 2 y 3.

**TABLA 2**  
**Tamaño de las partículas**

MATERIAL	RANGO (cm)	*DIAMETRO (cm)
Carbón A y C	0,3327-0,236	0,2802
Carbón A y C	0,236 -0,1650	0,1973
Carbón C	0,1650-0,1168	0,1388
Carbón C	0,1168-0,0833	0,0986
Caliza y dolomita	0,0833-0,059	0,0701
Caliza y dolomita	0,059 -0,0417	0,0496
Caliza	0,0417-0,0295	0,0351

\* Media geométrica entre los 2 rangos.

**TABLA 3**  
**Análisis de los materiales empleados**

A) Adsorbentes.			
MATERIAL	COMPOSICION (o/o peso)		DENSIDAD* (gr/cm <sup>3</sup> )
	CaCO <sub>3</sub>	MgCO <sub>3</sub>	
Caliza	98,02	1,08	2,65
Dolomita	55,40	44,47	2,74
* Por picnometría de gases			

B) Carbones.		
	CARBON A	CARBON C
Humedad a 105°C o/o	3,41	2,05
Cenizas o/o	5,10	10,41
Mat. Volátil o/o	38,71	43,54
Azufre	0,67	3,12
Poder cal. sup. (Kcal/Kg)	7356	7190
Densidad (gr/cm <sup>3</sup> )	1,25	1,30

### PROCEDIMIENTO

El procedimiento experimental consistió en cargar el tubo de fluidización con una cierta cantidad de sólidos (mezclas de carbón y adsorbente), precalentar el sistema haciendo circular a baja velocidad, aire caliente e iniciar el encendido del carbón introduciendo por un orificio lateral, un soplete a gas. Una vez encendido el carbón, se ajusta la alimentación de sólidos en un valor prefijado, se aumenta gradualmente la velocidad del aire (cuya temperatura puede ser regulada), hasta que el lecho esté completamente fluidizado y se retira el soplete. La fluidización de las partículas se verifica visualmente a través de la mirilla ubicada en la parte superior del tubo fluidización.

Para retirar parte del calor generado, se hace circular agua por el tubo en U, ubicado en el interior del lecho, produciendo vapor.

En cada corrida experimental, de aproximadamente 3 horas de duración, se registra la velocidad y temperatura del aire, velocidad de alimentación de sólidos y la temperatura en el interior del tubo de reacción. Además, se toman muestras de los gases de salida, en envases apropiados, los que son analizados posteriormente en un cromatógrafo.

Al finalizar cada experiencia se recolectan los sólidos que quedan en el interior del lecho y los sólidos retenidos en el ciclón, para un posterior análisis de composición y granulometría.

### PRESENTACION Y DISCUSION DE RESULTADOS

#### Rango de variables

En tabla 4 se indica el rango de las variables analizadas.





**TABLA 4**  
**Rango de variables**

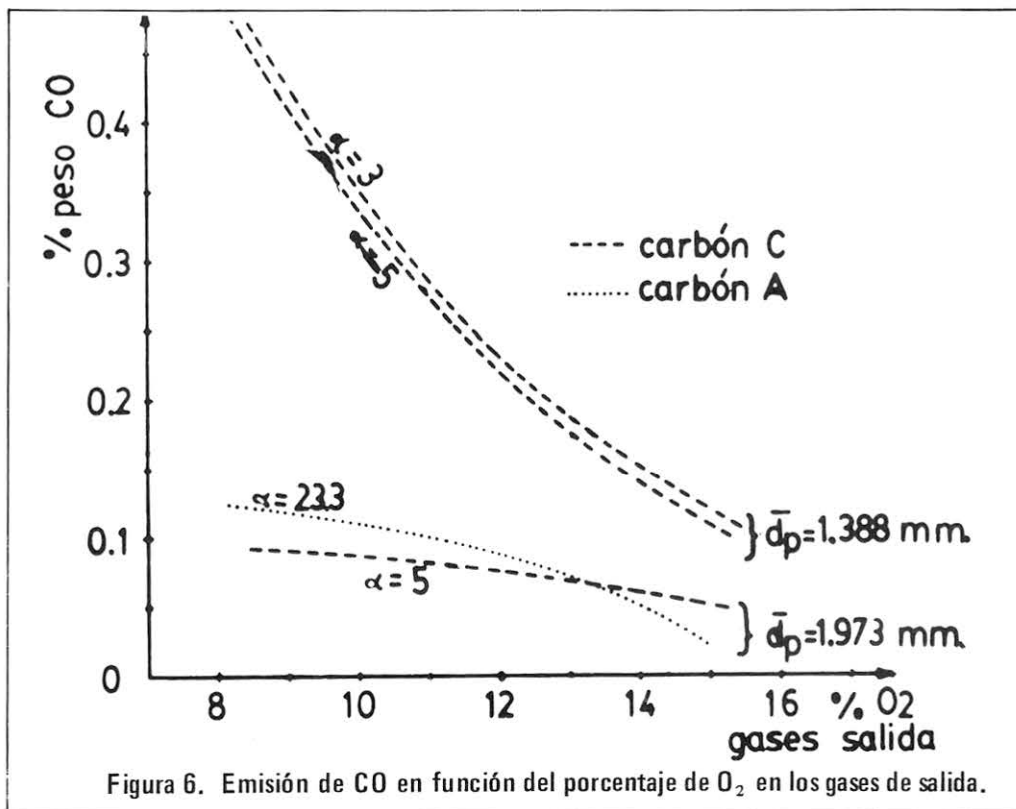
Veloc. superficial (m/s)	1.86	–	2.6
Tamaño part. carbón (mm)	3.327	–	0.833
Tamaño part. adsorbente (mm)	0.833	–	0.295
Razón (Ca/S) = $\alpha$	0	–	23.3
Exceso O <sub>2</sub> °/o	5	–	18
Veloc. aliment. sólidos (gr/min)	16	–	35
Temperatura * (°C)	800	–	950

\* Se incluye la temperatura aunque no es una variable independiente.

### Emisión de gases

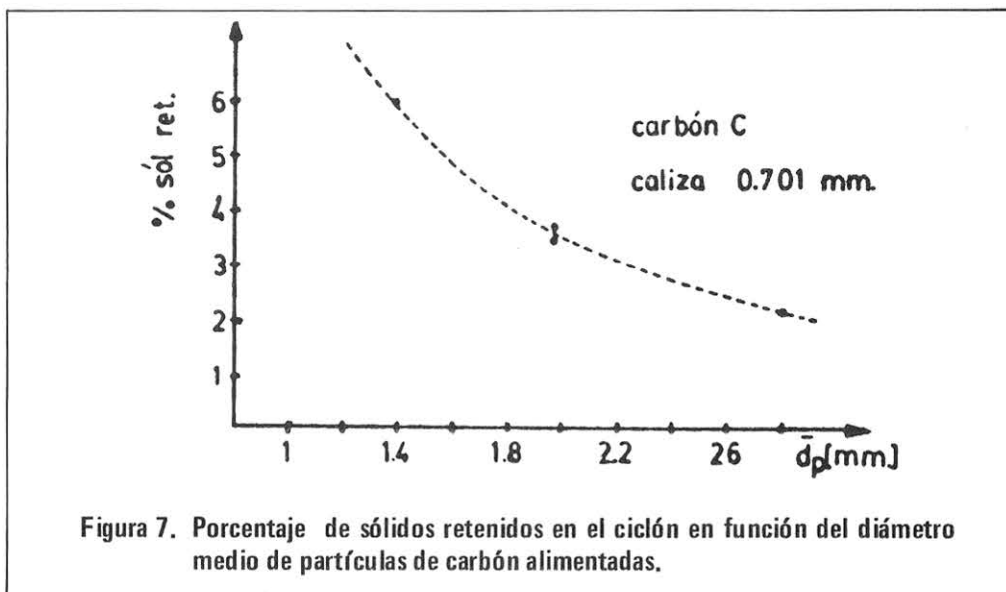
Se determinó la composición de los gases de salida utilizando un cromatógrafo Perkin-Elmer, modelo F11. Se instalaron columnas adecuadas para detectar la presencia de CO, O<sub>2</sub>, CO<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> y SO<sub>2</sub>. Este último no se detectó, debido probablemente a su baja concentración.

En figura 6, se muestra la variación de la emisión de CO en función del exceso de O<sub>2</sub>, para dos tamaños de carbón. En todos los casos, con el aumento del exceso de O<sub>2</sub>, disminuye la emisión de CO. Esta disminución es más fuerte en las partículas de menor tamaño. Esto implica que la cinética no es importante en este caso y por lo tanto, es probable que la difusión de O<sub>2</sub> hacia las partículas de carbón sea el mecanismo limitante. Esto se vio apoyado por el hecho de que no se detectó una tendencia definida en el efecto de la temperatura en la emisión de CO.



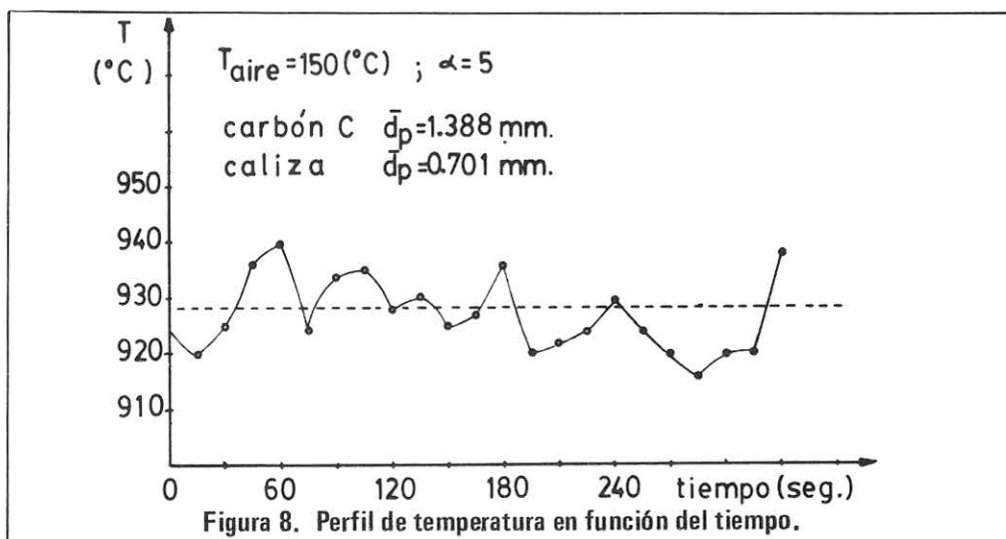
### Emisión de partículas.

El control de emisión de partículas es importante, tanto por consideraciones medio ambientales, como desde el punto de vista de la eficiencia de combustión. Los sólidos arrastrados fuera del lecho dependen de las características del material alimentado, diseño de la cámara de combustión y de las condiciones de operación. En figura 7 se muestra el porcentaje de sólidos retenidos en el ciclón, en función del diámetro de partículas de carbón alimentadas. Esta tendencia era esperada, ya que al ser mayor el tamaño de las partículas, éstas tienen menos posibilidades de ser arrastradas por el aire.



### Estabilidad en la temperatura.

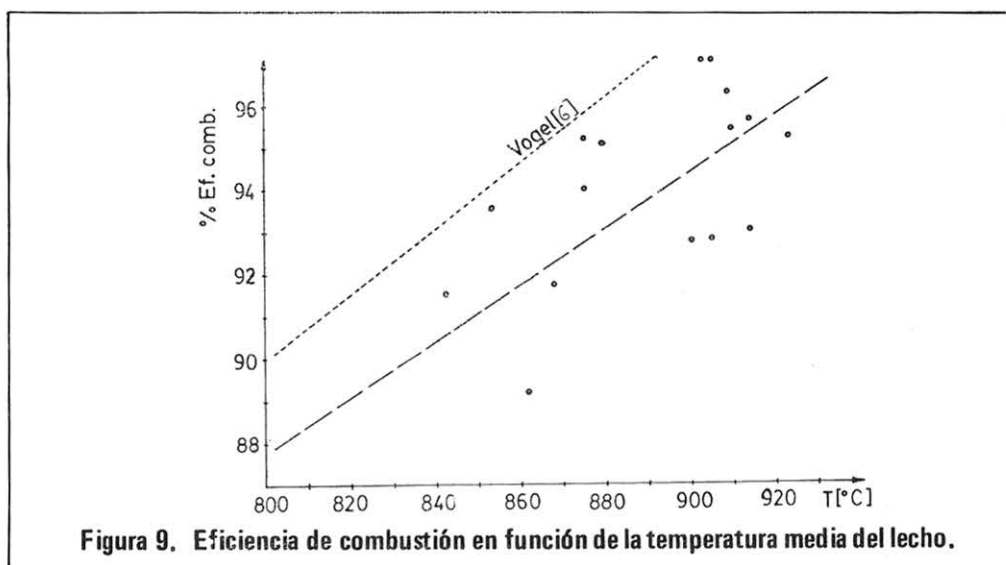
La temperatura en el interior del lecho se mantiene aproximadamente constante, oscilando alrededor de un valor que depende de las variables de operación. Estas oscilaciones, del orden de  $\pm 10^\circ\text{C}$ , podrían deberse a variaciones en el aire de fluidización y al hecho de que la alimentación de sólidos no es constante. Estas dos consideraciones son importantes dado que la masa de sólidos que constituye el lecho es pequeña, por lo que el sistema reacciona rápidamente ante variaciones de la velocidad del aire o de la alimentación de sólidos (figura 8).



### Eficiencia de combustión.

Se definió eficiencia de combustión como el porcentaje del calor alimentado en el carbón, que es liberado al reaccionar con  $O_2$  formando  $CO_2$ . En su evaluación se incluyen dos términos medidos experimentalmente: pérdida de calor debida al arrastre de partículas semi-quemadas y el  $\%$  de  $CO$  en los gases de salida. La influencia de estos dos términos en la eficiencia de combustión es del mismo orden de magnitud, sin embargo, a medida que disminuye el tamaño del carbón alimentado, se hace más importante el efecto de arrastre de partículas.

En figura 9 se observa que la eficiencia de combustión aumenta con la temperatura de operación. La alta dispersión de los puntos experimentales, se debe a que corresponden a distintas combinaciones de las demás variables (razón  $Ca/S$ , tamaño de partículas, velocidad de fluidización, etc.). Sin embargo, existe una tendencia (obtenida con el ajuste de la mejor recta), similar a la informada por otros investigadores<sup>6</sup>, observándose eso sí, que estos últimos valores son aproximadamente 2 $\%$  mayores. Esto se debe a que los valores de literatura se obtuvieron en un lecho fluidizado a 8 at., mientras que los de este trabajo corresponden a presiones de alrededor a 1 at. (la eficiencia de combustión aumenta proporcionalmente con la presión<sup>7</sup>).



En figura 10 se observa que a medida que aumenta la velocidad de fluidización aumenta la eficiencia de combustión hasta llegar a un valor máximo. Para valores de velocidad de fluidización aún mayores, la eficiencia comienza a disminuir debido a que se hace más importante el término de escape de partículas frente a la menor emisión de  $CO$ .

### Eficiencia de desulfurización.

Se estudió la capacidad de retención de azufre mediante caliza y dolomita a través de análisis de las cenizas, al no resultar, por no contar con los equipos adecuados, los análisis de detección de  $SO_2$  en la corriente gaseosa. Los valores obtenidos para la retención de azufre corresponden a condiciones media de temperatura, velocidad de fluidización y alimentación de sólidos, ya que la muestra de ceniza se tomaba al final de cada experiencia, durante la cual se variaban los parámetros recién nombrados.

En la figura 11 se observa que a medida que aumenta la razón  $Ca/S$  aumenta el porcentaje de retención de azufre.

Los valores de retención son bastante menores a los informados en la literatura.<sup>6</sup> La causa principal de esta diferencia puede deberse a la naturaleza de los adsorbentes (especialmente porosidad). De figura 12 se observa que puede mejorarse el  $\%$  de retención disminu-

yendo el tamaño de los adsorbentes (obviamente habrá una mayor emisión de partículas).

La capacidad de retención de la dolomita es levemente superior comparada con la caliza.

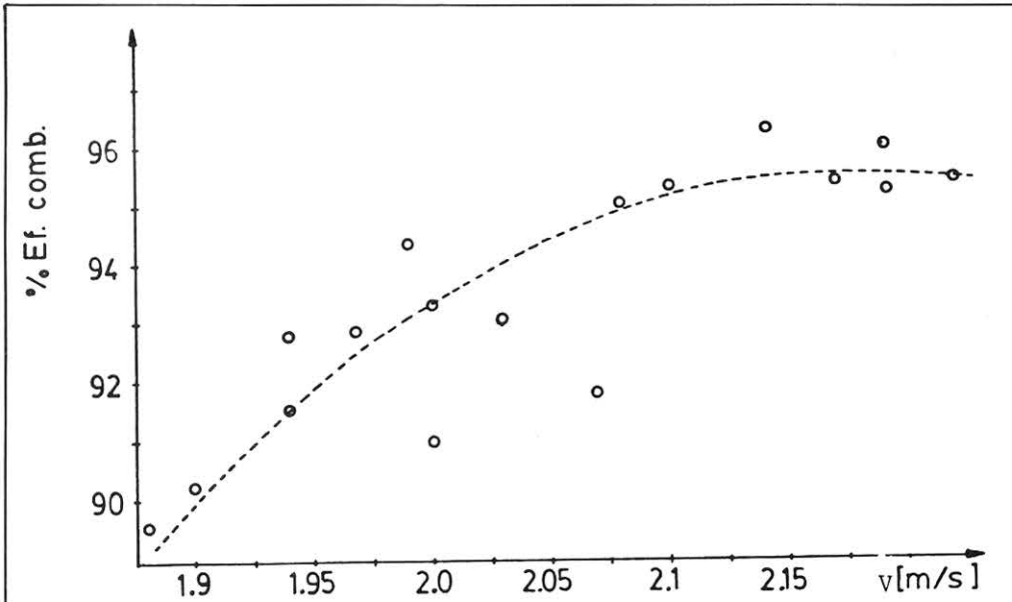


Figura 10. Eficiencia de combustión en función de la velocidad del aire.

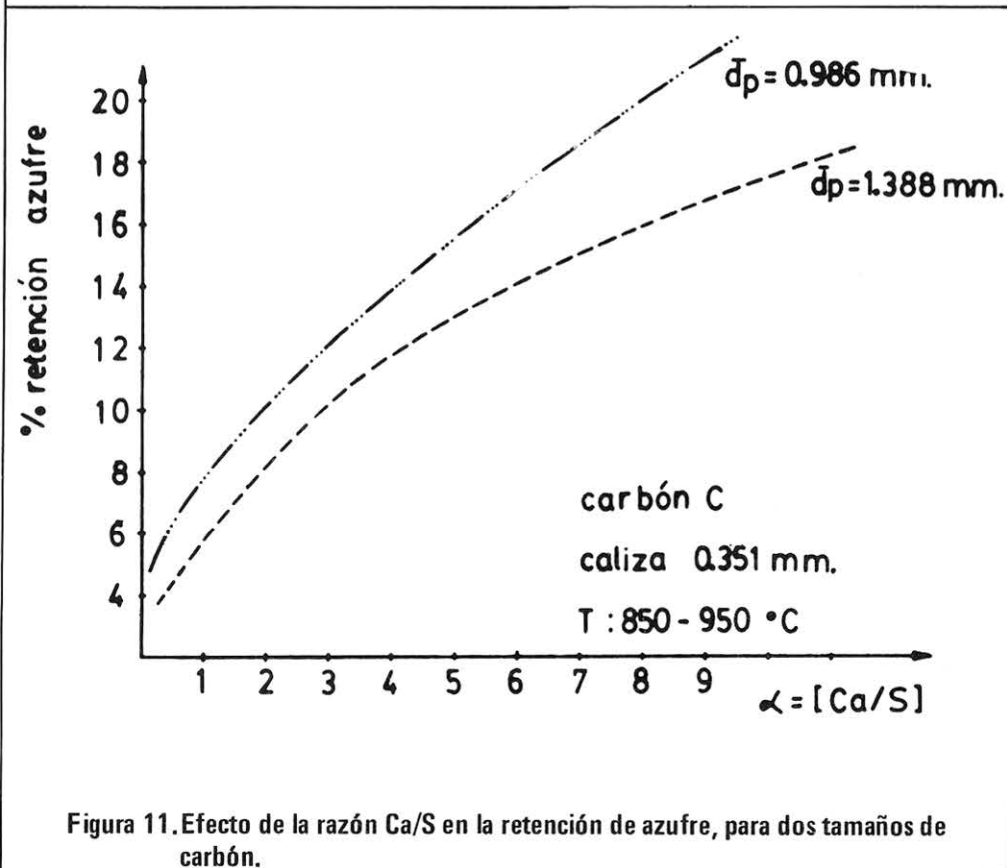
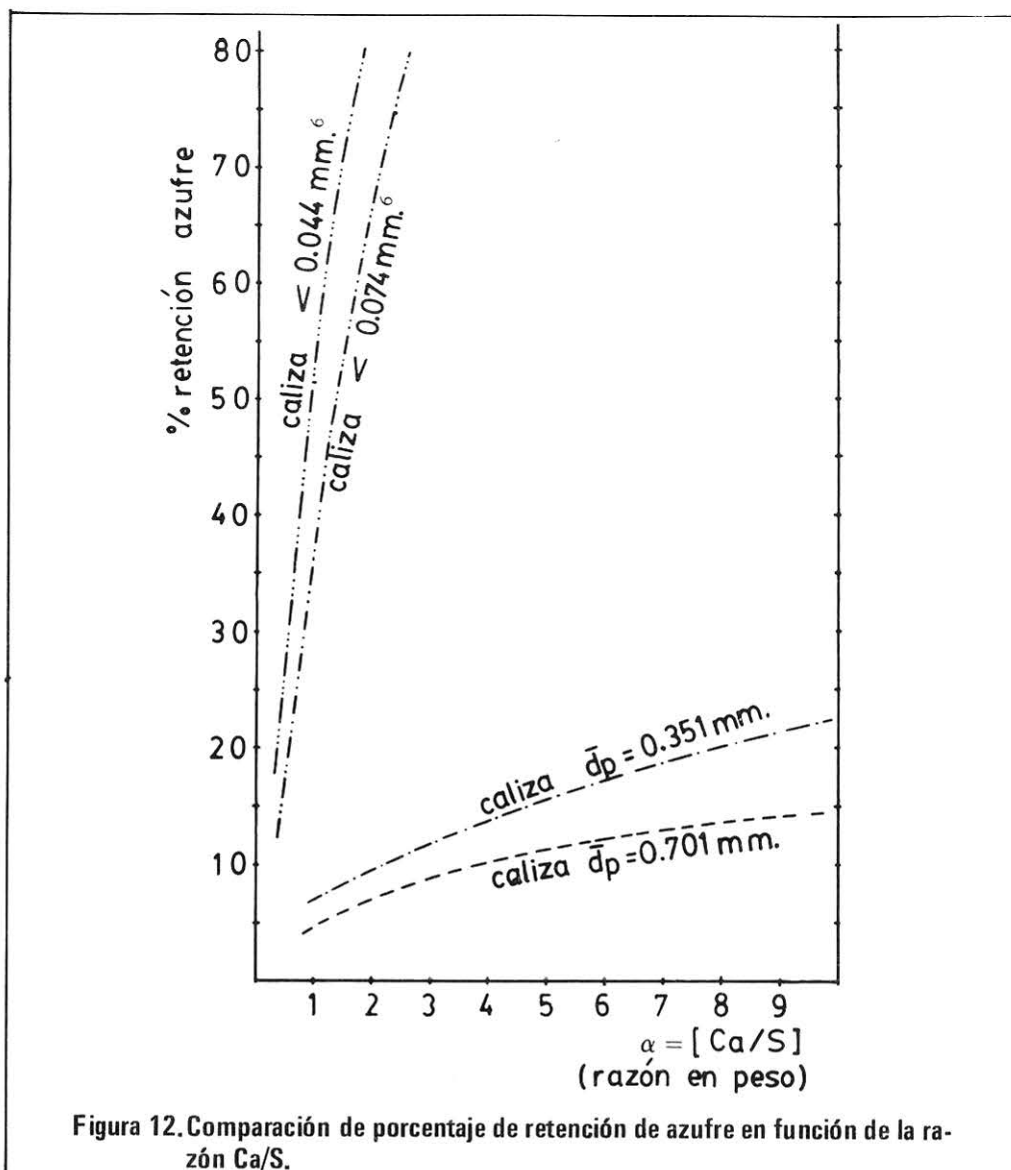


Figura 11. Efecto de la razón Ca/S en la retención de azufre, para dos tamaños de carbón.



#### Efecto de la velocidad de fluidización en la temperatura del lecho.

En figura 13 se muestra la influencia de la velocidad de fluidización en la temperatura del lecho. Al principio con el aumento de la velocidad del aire se detecta una subida en la temperatura, debido a que probablemente cuando la velocidad del gas es baja, la etapa controlante en la combustión del carbón es la difusión de  $O_2$  hacia las partículas de carbón, por lo tanto, al existir un mayor exceso de  $O_2$ , se aumenta la velocidad de combustión. Sin embargo, al existir un gran exceso de  $O_2$  se hace más importante el efecto refrigerante del gas de entrada, con lo cual es posible que se apague el lecho. Esta "temperatura de apagado" depende de las características de los sólidos alimentados y de la temperatura de entrada del gas de fluidización. Este último efecto es verificado con el modelo teórico desarrollado por Gordon y Amundson.<sup>8</sup>

#### CONCLUSIONES

- Valores de  $V_{mf}$  obtenidos experimentalmente, son similares a los calculados con la ecuación de Babu.

- b) Partículas de carbón mayores de 1.973 mm. tienden a aglomerarse durante la combustión.
- c) Mientras menores son los tamaños de las partículas alimentadas, mejor es la "calidad" de la fluidización.
- d) La temperatura de combustión oscila alrededor de cierto valor, dependiendo de los valores que asumen las variables independientes.
- e) A menor tamaño de los adsorbentes, aumenta el porcentaje de retención de azufre.
- f) Mayor capacidad de retención de azufre, de la dolomita comparada con la caliza.
- g) Del orden de 5 veces menor es la capacidad de retención de azufre de los adsorbentes analizados, frente a los informados en la literatura.
- h) Bajo contenido de CO en los productos gaseosos de la combustión.
- i) La eficiencia de combustión obtenida, es similar a la informada por otros investigadores.

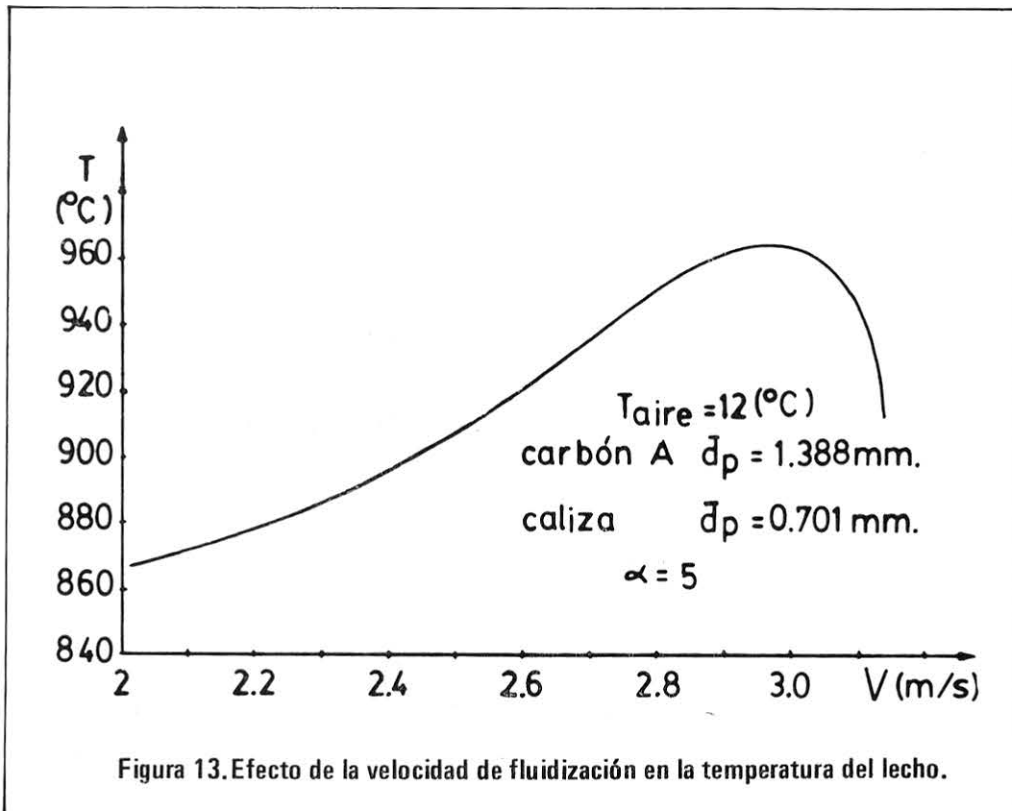


Figura 13. Efecto de la velocidad de fluidización en la temperatura del lecho.

## NOMENCLATURA

$V_{mf}$	= Velocidad mínima de fluidización, $L\Theta^{-1}$
$\Delta p$	= Caída de presión a través del lecho, $FL^{-2}$
$V$	= Velocidad del gas basado en la columna vacía, $L\Theta^{-1}$
$d_p$	= Diámetro de esfera del mismo volumen que la partícula, L
$\bar{d}_p$	= Diámetro de la partícula basado en el promedio geométrico, de las aberturas superior e inferior del tamiz, L
$\mu$	= Viscosidad del fluido, $ML^{-1}\Theta^{-1}$
$\rho_g$	= Densidad del fluido, $ML^{-3}$
$\rho_s$	= Densidad de las partículas, $ML^{-3}$
$g$	= Aceleración de gravedad, $L\Theta^{-2}$
$\epsilon$	= Porosidad del lecho
$\epsilon_{mf}$	= Porosidad del lecho, en el punto de fluidización incipiente
$L_f$	= Altura de lecho fijo, L
$L_{mf}$	= Altura del lecho en el punto de fluidización incipiente, L
$L$	= Altura de lecho para cualquier velocidad de aire, mayor a $V_{mf}$ , L
$\alpha$	= Razón Ca/S (en peso)

## BIBLIOGRAFIA.

1. KUNII, D., LEVENSPIEL, O., "Fluidization Engineering". Ed. John Wiley & Sons, Inc., New York (1969).
2. BABU, S., SHAH, B. y TALWALKAR, A., Institute of gas Technology, diciembre (1976).
3. HOUGEN, O.A. y WATSON, K.M., "Chemical Process Principles, III Kinetics and Catalysis", John Wiley and Sons, New York (1974).
4. REYES, A., "Combustión de carbón en un lecho fluidizado". Habilitación Profesional, Universidad de Concepción (1978).
5. PERRY, R.H., CHILTON, CH., "Chemical Engineer's Handbook", Tokio Tosho Printing Co., 20-82 (1973)
6. "Proceedings of the fourth International Conference of fluidized-bed Combustion" (1975).
7. RAO, C.S.R., Combustion Science and Technology, **16**, 221 (1977).
8. GORDON, A.L., AMUNDSON, N.R., Chemical Engineering Science, **31**, 1163 (1976).