

COMPORTAMIENTO HIDRODINAMICO DE LA FLUIDIZACION DE DESECHOS FORESTALES

Rogelio Moreno M. (*)
Marcelo Paredes C. (**)
Danilo Baeza Q. (***)
Arnoldo Améstica R. (***)

RESUMEN

El objetivo del trabajo es evaluar experimentalmente el comportamiento hidrodinámico de un lecho fluidizado de partículas de desechos forestales.

El equipo experimental incluyó un soplador centrífugo, dos columnas de fluidización, un distribuidor de aire y la instrumentación requerida para la obtención de los datos pertinentes.

Se determinaron velocidades mínimas de fluidización, velocidades terminales y pérdidas de carga en el lecho, para partículas de hasta $12,5 \times 10^{-3}$ m, en estado seco y húmedo. También se analizó la calidad de la fluidización en función del diámetro de lecho.

Palabras claves: Fluidización, Desechos forestales, Reciclaje.

(*) M.Sc., Ingeniero Civil Mecánico

(**) Ingeniero Civil Mecánico

(***) Alumnos Memoristas

Instituto de Materiales y Procesos Termodinámicos de la Facultad de Ciencias de la Ingeniería, Universidad Austral de Chile, Casilla 467, Valdivia.

ABSTRACT

An experimental evaluation of the hydrodynamic behaviour of a fluidized bed composed by forest residue particles was conducted.

To that end, it was implemented an experimental equipment, consisting of a centrifugal blower, two fluidization columns, an air distributor, and the necessary instruments to get empirical data.

The minimum fluidizing velocity was determined, as well as the terminal velocity and the pressure losses on the bed, for particles up to $12,5 \times 10^{-3}$ m, both in dry and wet conditions. The quality of the fluidization was also analysed in terms of the bed diameter.

Keywords: *Fluidization, Forest residues, Recycling.*

INTRODUCCION

El empleo de la fluidización como sistema para la combustión de sólidos granulados ha ocupado un lugar de importancia a nivel mundial durante los últimos 20 años, producto de la crisis energética y de la necesidad de crear tecnologías de combustión no contaminantes (Broughton y Howard, 1983; Fenelly, 1984).

En Chile, se han obtenido interesantes resultados en estudios relacionados con la combustión de carbones nacionales en una planta piloto de combustión fluidizada, la cual posee un sistema computacional de adquisición de datos (Navarrete et al., 1990; Navarrete et al., 1992).

Una idea que parece interesante es la combustión fluidizada aplicada a partículas de desechos forestales. Existe experiencia de análisis de la hidrodinámica y secado de aserrín (de un tamaño de partículas de hasta 4×10^{-3} m) en lecho fluidizado en un equipo de laboratorio (Moreno, 1990; Moreno, 1991). Los resultados hidrodinámicos obtenidos evidencian una desviación importante entre los valores experimentales y los que predicen correlaciones informadas en la literatura especializada, dado que éstas han sido obtenidas para otro tipo de partículas, normalmente más regulares que las que componen el aserrín.

OBJETIVO

El objetivo de este trabajo es estudiar las variables influyentes en fluidizar desechos forestales de un tamaño de partículas mayor a las del aserrín. Se determinan velocidades de operación y pérdidas de carga en el lecho, tanto para sólidos con humedad de equilibrio como para sólidos húmedos, con el fin de emplear estos datos en el diseño de una unidad de combustión de lecho fluidizado.



MATERIAL Y METODO

Equipo

En la Figura N° 1 se muestra un esquema del equipo experimental empleado para el estudio. Consta de un soplador centrifugo (1) de 0,4 m³/s de caudal y 4 kPa de presión estática para impulsar aire en condiciones normales a dos columnas de fluidización (2) de 0,10 y 0,20 m de diámetro, construidas de acrílico. El caudal de aire se regula con una válvula de mariposa (3) ubicada en la descarga del ventilador y con dos válvulas de cierre (4) ubicadas debajo de las columnas. En la base de las columnas se dispone de distribuidores de aire, consistentes en placas con perforaciones múltiples (5) construidas con planchas de acero. Para la medición de velocidades se dispone de un anemómetro de aletas con lectura digital (6) de 0,1 m/s de resolución, que permite obtener la velocidad superficial del aire en la sección transversal de la columna de fluidización. La caída de presión en el lecho se mide con un manómetro diferencial de 0,01" H₂O de resolución (7) conectado a las tomas de presión (8) ubicadas en las paredes del lecho.

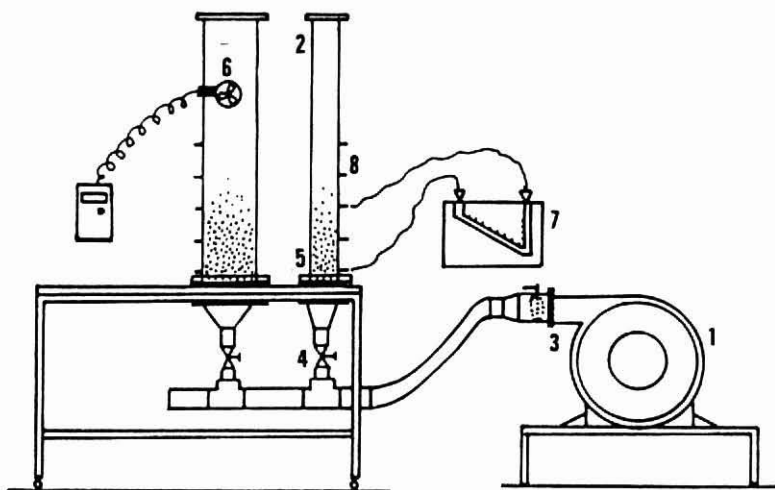


Figura N° 1. ESQUEMA DEL EQUIPO EXPERIMENTAL EMPLEADO

Metodología

La metodología empleada en el estudio se basa en la construcción del gráfico de pérdidas de carga del lecho versus la velocidad superficial del aire.

La velocidad de operación de un lecho fluidizado es un parámetro cuyo valor está entre la velocidad mínima de fluidización (V_{mf}) y la velocidad terminal (V_t). La primera corresponde a la velocidad a la cual la fuerza de arrastre del aire mantiene en suspensión a las partículas en el lecho y la segunda es la velocidad a la cual las partículas comienzan a ser arrastradas fuera del lecho. La velocidad de operación permite determinar los caudales de aire a manejar por el soplador de una unidad de lecho fluidizado.

Por otra parte, la pérdida de carga del lecho corresponde a la caída de presión del aire al pasar a través de las partículas sólidas. Este parámetro, sumado a las pérdidas de presión del resto del sistema, permite determinar las características de presión estática del soplador.

Construyendo un gráfico de pérdida de carga del lecho versus velocidad superficial del aire se puede obtener la velocidad mínima de fluidización intersectando la curva de lecho fijo con la de lecho fluidizado (Davidson et al., 1985) tal como se muestra en la Figura N°2. Esta es una representación teórica del fenómeno, ya que, en la práctica, se sabe que en el caso de fluidización de sólidos irregulares y polidispersos, esta curva presenta alteraciones con fluctuaciones de la pérdida de carga en la transición de lecho fijo a lecho fluidizado (Reyes, 1987).



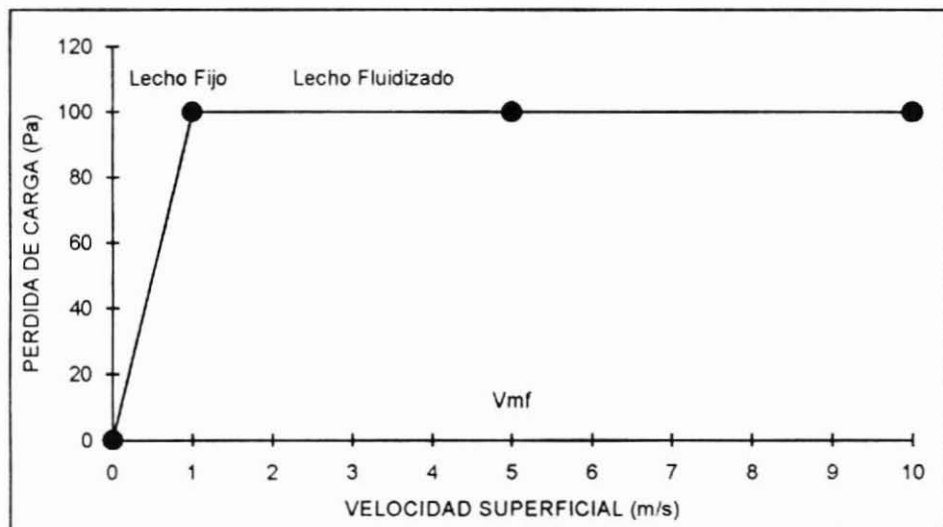


Figura N° 2. PERDIDA DE CARGA EN FUNCION DE LA VELOCIDAD SUPERFICIAL DEL FLUJO PARA FLUIDIZACION IDEAL DE SOLIDOS

Caracterización de los Sólidos

Los sólidos estudiados son partículas de desechos forestales provenientes de diversos procesos industriales, tales como aserrado de madera, cepillado y otros, en tamaños promedio superiores a los 4×10^{-3} m, algunos de los cuales se encontraban en estado húmedo (tal como se usa) y otros con humedad cercana a la de equilibrio, ya que se almacenan bajo techo.

Se procedió a efectuar una clasificación por origen y, a través de un tamizado normalizado ASTM de las muestras, se determinó su tamaño (Cuadro N° 1).

Cuadro N° 1

CLASIFICACION DE DESECHOS FORESTALES

Muestras	Tipo y Origen	Tamaño dp x 10 ⁻³ (m)	Humedad Origen Base Húmeda (Hbh) (%)
A	Astillado Aserradero Fino	4,8-9,5	40,9
B	Astillado Aserradero Grueso	9,5-12,5	40,9
C	Viruta Cepillado Fina	1,0-9,5	9,2
D	Viruta Cepillado Gruesa	9,5-12,5	15,2
E	Chips	>20	15,0
F	Descortezado	>30	30,0

dp: Diámetro partículas

Los parámetros seleccionados para los ensayos son tipo de desecho, granulometría, humedad de sólidos, altura del lecho y diámetro de la columna de fluidización.

RESULTADOS Y DISCUSION

En la Figura N° 3 se puede apreciar un gráfico típico obtenido para el caso de una muestra A. En él se aprecia la inestabilidad que se produce en la zona de transición de lecho fijo a lecho fluidizado evidenciándose esta en fluctuaciones de la pérdida de carga a medida que aumenta la velocidad para luego estabilizarse.

En estos casos, debido a que hay un rango de tamaño de partícula, aunque exista tamizado previo, la velocidad mínima de fluidización no posee un valor fijo sino que también está en un rango, el cual aparece en la Figura N° 3. De igual forma, se ensayaron las otras muestras, tanto en estado de humedad de equilibrio como en estado húmedo, obteniéndose las velocidades indicadas en el Cuadro N° 2, en el cual se dan a conocer, además, los valores obtenidos para la velocidad terminal, que también osciló en un amplio margen.

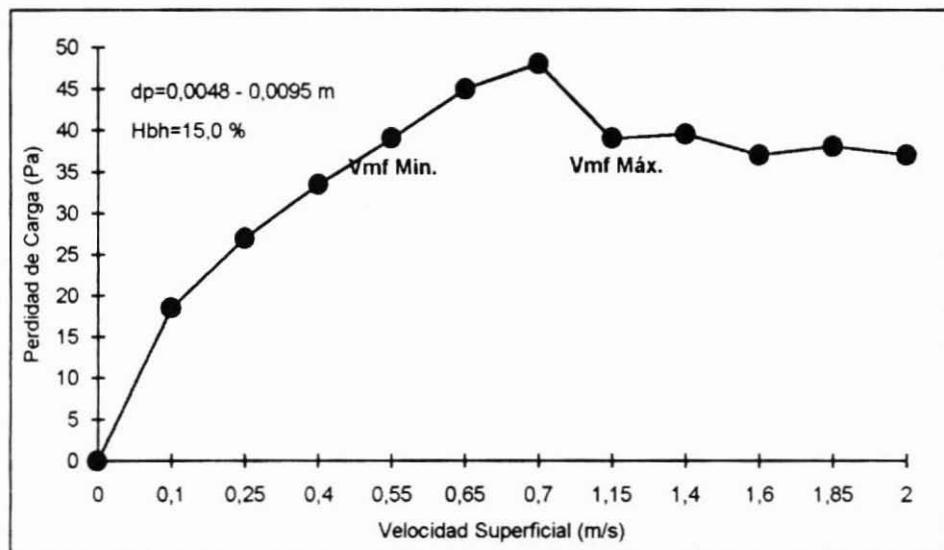


Figura N° 3. CURVA DE PERDIDA DE CARGA PARA LA FLUIDIZACION DE ASTILLAS FINAS DE ASERRADERO EN COLUMNA DE 0,2 m DE DIAMETRO.

Cuadro N° 2

VELOCIDADES DE OPERACION PARA DESECHOS FORESTALES
EN LECHO DE 0,1 m DE DIAMETRO

Muestra	Estado Humedad de Equilibrio			Estado Húmedo		
	Vmf (m/s)	Vt (m/s)	Hbh (%)	Vmf (m/s)	Vt (m/s)	Hbh (%)
A	0,7-1,8	2,4-3,8	13,0	1,2-3,5	4,0-5,5	64,8
B	1,0-2,0	2,8-5,0	15,0	1,7-3,5	4,5-5,5	66,5
C	0,3-0,9	1,5-3,0	9,2	0,7-3,0	2,0-5,0	66,7
D	0,5-1,1	2,0-3,3	15,2	0,8-4,0	3,0-5,5	71,0

Con el fin de comparar estos resultados con los obtenidos en estudios anteriores para el caso del aserrín, el Cuadro N° 3 proporciona las velocidades de fluidización y terminal, promedio para partículas de tamaño inferior a los 4×10^{-3} m.

Cuadro N° 3

VELOCIDADES DE OPERACION DEL ASERRIN SECO

dp x10 ³ (m)	Vmf(m/s)	Vt (m/s)
0,359	0,11	1,13
0,505	0,16	1,38
0,890	0,27	1,78
1,595	0,44	2,36
2,190	0,51	2,73
3,570	0,69	3,35

(Moreno, 1990).

Se debe destacar que el fenómeno de inestabilidad de la presión también había sido observado en el caso del aserrín.

En relación a los resultados del Cuadro N° 2, que no contempla las muestras E y F, se debe decir que efectivamente se disponía de muestras con granulometría mayor a 20×10^{-3} m, correspondientes a chips y descortezados, tal como lo señala el Cuadro N° 1. Sin embargo, estos sólidos no pudieron ser fluidizados con el equipo experimental disponible, el cual permite velocidades superficiales de hasta 5,5 m/s. Como estas muestras no son homogéneas, al ser tomadas de un proceso industrial, existían sólo algunas partículas de pequeño tamaño que eran fluidizadas, pero el fenómeno no es generalizado.

En el Cuadro N° 2 también se puede apreciar que, en el caso de virutas de granulometría relativamente grande, las velocidades obtenidas para lograr la fluidización son bajas, lo cual se debe a que por su geometría la superficie de exposición a la corriente de aire por unidad de volumen es alta, lo que hace que la fuerza de arrastre necesaria para equilibrar su peso se logre con una menor velocidad del aire.

En general, en los resultados obtenidos se observa una tendencia acorde con la teoría, respecto de la dependencia de la velocidad con tamaño de partículas y humedad de sólidos (Kunii y Levenspiel, 1969; Reyes, 1987)

La Figura N° 4 muestra el comportamiento de la pérdida de carga máxima del lecho de partículas, por unidad de altura de lecho, con respecto a la humedad de los sólidos. Esta pérdida de carga fue determinada experimentalmente en base al peso de las muestras, por unidad de sección transversal del lecho. Cabe hacer notar que este valor es mayor que el que se

midió con un manómetro diferencial, lo se debe a que la calidad de la fluidización no es cien por ciento efectiva al usar una placa distribuidora tipo multiorificio. Este aspecto del diseño actualmente está siendo optimizado por los autores. Por tanto, se reportan los valores máximos de pérdida de presión para una completa fluidización, ya que son estos valores los que habría que considerar en el dimensionamiento del ventilador de un lecho fluidizado.

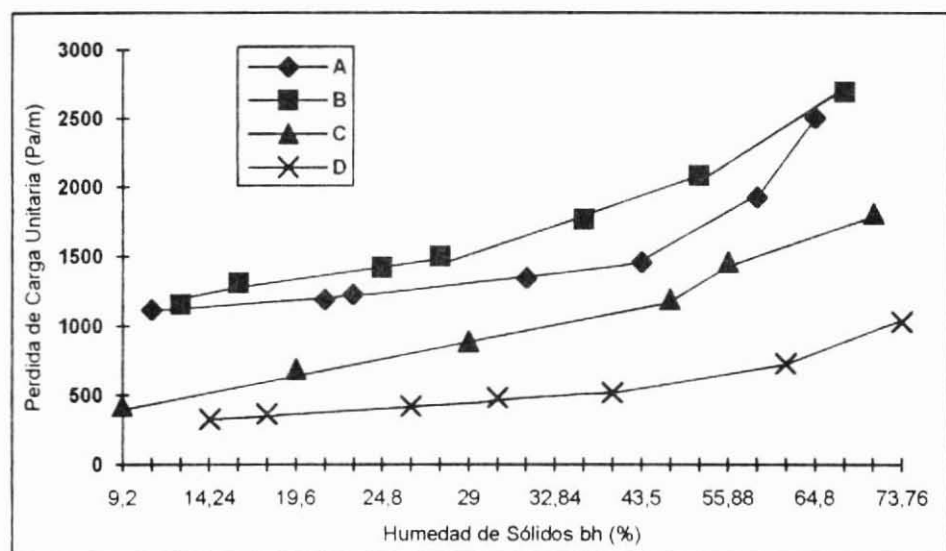


Figura N° 4. PERDIDAS DE PRESION DEL LECHO EN FUNCION DEL CONTENIDO DE HUMEDAD DE LOS SOLIDOS.

Los resultados obtenidos en esta parte del trabajo muestran un aumento de la caída de presión con el incremento del contenido de humedad de los sólidos, lo que concuerda con el fundamento teórico expresado a través de la ecuación fundamental de la fluidización (Kunii y Levenspiel, 1969).

$$\Delta p/L = (1-\epsilon) (\rho_S - \rho_f) g$$

donde:

Δp = pérdida de presión (Pa)

L = altura de lecho (m)

ϵ = porosidad de lecho (m^3 vacío/ m^3 lecho)

ρ_S = densidad de sólido (Kg/m^3)

ρ_f = densidad del fluidizante (Kg/m^3)

g = aceleración de gravedad (m/s^2)

En esta ecuación la densidad de las partículas es el parámetro a través del cual interviene la humedad de las muestras.

También los resultados son concordantes con la teoría al comparar los valores de pérdida de presión de las partículas astilladas (A o B) con los de las partículas tipo viruta (C o D). La menor caída de presión en el segundo caso, se debe a que por la geometría que poseen las virutas, la porosidad del lecho es alta con respecto a la que se presenta en el caso de partículas más compactables.

Por otro lado, las diferencias entre las muestras C y D se deben a que, en el caso de la viruta fina (C), la distribución de tamaño de las partículas es amplia ($1,0 - 9,5 \times 10^{-3}$ m), por lo que la porosidad en este caso es menor que para las virutas de tamaño $9,5 - 12,5 \times 10^{-3}$ m y la muestra C es por tanto más pesada que la D.

Finalmente, respecto de la calidad de la fluidización, se pudo verificar que en las columnas de 0,1 m de diámetro es muy difícil fluidizar lechos de alturas superiores a los 70×10^{-3} m, produciéndose efectos de pistoneo y flujo canalizado del aire, fenómenos que son más significativos a altas humedades de sólidos. En contraste con lo anterior, en la columna de 0,2 m de diámetro fue posible fluidizar lechos de hasta 120 a 150×10^{-3} m de altura, evidenciándose incluso una leve disminución de las velocidades requeridas para la suspensión de sólidos, tal como se muestra en el Cuadro N° 4.



Cuadro N° 4

EFFECTOS DEL DIAMETRO DE COLUMNA EN LAS VELOCIDADES DE FLUIDIZACION PARA
DESECHOS SECOS

Muestra	Columna de 0,1 m		Columna de 0,2m	
	Vmf (m/s)	Vt (m/s)	Vmf(m/s)	Vt (m/s)
A	0.7 - 1.8	2.4 - 3.8	0.6 - 1.2	2.1 - 3.0
B	1.0 - 2.0	2.8 - 5.0	0.7 - 1.6	2.6 - 3.4
D	0.5 - 1.1	2.0 - 3.3	0.4 - 1.0	1.8 - 3.0

De esto se puede concluir que el flujo pistón, como fenómeno indeseado y producido por la influencia de las paredes de la columna sobre el lecho, se puede atenuar al emplear lechos de mayor diámetro o mayor sección transversal.

CONCLUSIONES

Se evaluaron experimentalmente las variables hidrodinámicas de la fluidización de desechos forestales, tales como velocidad mínima de fluidización, velocidad terminal y pérdidas de carga, empleando como parámetros la granulometría y humedad de los sólidos, la altura del lecho fluidizado y el diámetro de la columna de fluidización.

Se comprobó que es posible obtener la fluidización de desechos forestales con velocidades de operación entre 1 y 5 m/s, dependiendo del tamaño y humedad de las partículas.

En general, a medida que el tamaño de partículas aumenta, se requieren mayores velocidades mínimas de fluidización y terminales. Sin embargo, en partículas de gran superficie por unidad de volumen, como es el caso de las virutas de cepillado, se necesita una velocidad menor que la que correspondería a su tamaño determinado por tamizado.

La humedad influye directamente en la densidad o peso de las partículas y por tanto en la velocidad de operación del equipo.

Las pérdidas de carga del lecho son directamente proporcionales a la humedad de los sólidos. Con respecto a la granulometría, se puede afirmar que las partículas con gran superficie por unidad de volumen (virutas) presentan menos pérdidas de carga a pesar de tener mayor tamaño, ya que en un determinado volumen de lecho hay menos masa de producto, debido a la alta porosidad intersticial que dejan las partículas.

La fluidización se ve beneficiada con el empleo de columnas de mayor sección transversal, consiguiéndose fluidizar, para la misma energía disponible en el ventilador, mayores volúmenes de material, optimizando de esta forma el rendimiento de la unidad.

Esta extrapolación es válida hasta un cierto límite que sería necesario definir experimentalmente.

Se espera que sea posible optimizar el diseño, especialmente en lo que se refiere a la calidad de la fluidización, mejorando el diseño de la placa distribuidora de aire para disminuir al máximo el pistoneo y la canalización.

RECONOCIMIENTO

Este trabajo se realizó gracias al apoyo brindado por la Dirección de Investigación y Desarrollo de la Universidad Austral de Chile al Proyecto de Investigación S-92-14. Los autores del trabajo también agradecen la colaboración del profesor Dr. Pedro Navarrete A. de la Facultad de Ingeniería de la Universidad de Santiago de Chile.



REFERENCIAS

- Broughton, J. and J.R. Howard. 1983.** Combustion of Coal in Fluidized Beds, Fluidized Beds, Combustion and Applications, Ed. by J.R. Howard, Applied Science Publishers, London, 37-76.
- Davidson, J.F., R. Clift and D. Harrison. 1985.** Fluidization, Academic Press, Inc., London.
- Fenelly, P.F. 1984.** Fluidized Bed Combustion, American Scientist, 72:254-261.
- Kunii, D. and O. Levenspiel. 1969** Fluidization Engineering, John Wiley & Sons, Inc., New York, 64-80.
- Moreno, R. 1990.** Fluidización de Aserrín: Comportamiento Hidrodinámico y Estudio de Correlaciones, Anales IV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, 331-343, Santiago.
- Moreno, R. 1991.** Secado de Aserrín en Lecho Fluidizado, Ciencia e Investigación Forestal, Instituto Forestal, 5(2): 217-227.
- Navarrete, P., U. Zuñiga, R. Santander, M. Salinas, O. Torres y R. Mansilla. 1990.** Desarrollo y Experimentación de Planta Piloto para Combustión de Lecho Fluidizado, Anales IV Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, 359-365, Santiago.
- Navarrete, P., U. Zuñiga, F. Valenzuela, L. Faúndez, A. Martinich, A. Jalaf y G. Lira. 1992.** Prototipo Modificado de Laboratorio para la Combustión en Lecho Fluidizado, Anales V Congreso Nacional de Ingeniería Mecánica, 2: 501-505, Punta Arenas.
- Reyes, A., 1987.** Parámetros de Diseño de Reactores de Lecho Fluidizado. Seminario Fundamentos de Transferencia de Calor y Materia en Lechos Fluidizados. USACH. 28pp. Valdivia, Chile.