

UNIVERSIDAD CATOLICA DE TEMUCO
FACULTAD DE INGENIERIA

DISEÑO, MONTAJE Y PUESTA EN MARCHA
DE UN LECHO FLUIDIZADO PARA
LABORATORIO DE OPERACIONES UNITARIAS

NORA EUGENIA MANQUILEF MANQUILEF

TRABAJO DE TITULO PRESENTADO A LA FACULTAD DE INGENIERIA
DE LA UNIVERSIDAD CATOLICA DE TEMUCO
PARA OPTAR AL TITULO DE INGENIERIA DE EJECUCION EN QUIMICA

TEMUCO, 2006

ÍNDICE

ÍNDICE DE CONTENIDOS	i
ÍNDICE DE FIGURAS	v
ÍNDICE DE TABLAS	vii
ÍNDICE DE APÉNDICES	viii
SIMBOLOGÍA	xi
RESUMEN	xiii
1- INTRODUCCIÓN	1
2- OBJETIVOS	
2.1- Objetivo general	3
2.2- Objetivos específicos	3
3- FUNDAMENTO TEÓRICO	4
3.1- Velocidad mínima de fluidización	7
3.2- Velocidad límite	9
	i

3.3- Tipos de fluidización	10
3.3.1- Fluidización particulada	11
3.3.2- Fluidización de burbujeo	12
3.4- Ventajas y desventajas de la fluidización	
3.4.1- Ventajas	16
3.4.2- Desventajas	18
3.5- Aplicaciones de los lecho fluidizados	20
4- METODOLOGÍA	
4.1- Materiales	26
4.2- Metodología	27
4.2.1- Diseño del equipo de fluidización	27
4.2.1.1- Columna de fluidización	27
4.2.1.2- Soporte de lecho	29
4.2.1.3- Bomba centrífuga	29
4.2.1.4- Manómetro	29
4.2.2- Cálculos teóricos	29
4.2.2.1- Velocidad mínima de fluidización	30
4.2.2.2- Caída de presión en punto de fluidización incipiente	30
4.2.2.3- Velocidad límite del fluido	
4.2.3- Caracterización de las partículas	31
4.2.3.1 - Esfericidad de las partículas	31
4.2.3.2- Diámetro de partículas	31

4.2.3.3- Densidad de las partículas	32
4.2.3.4- Porosidad del lecho fijo	32
4.2.4- Puesta en marcha del equipo	33
4.2.5- Pruebas preliminares	36
4.2.4.1- Determinación experimental	
de la velocidad mínima de fluidización	38
4.2.4.2- Determinación experimental	
de la caída de presión en el punto	
de fluidización incipiente	39
4.2.4.3- Determinación de la velocidad límite del fluido	39
4.2.4.4- Verificación de tipo de fluidización realizada	39
4.2.4.5- Guía de trabajo	40

5- RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1- Diseño y construcción del equipo de fluidización	41
5.1.1- Descripción del equipo de fluidización	41
5.2- Resultados Teóricos	44
5.2.1- Velocidad mínima de fluidización	44
5.2.2- Caída de presión en el punto de fluidización incipiente	45
5.2.3- Velocidad límite del fluido	45
5.3- Caracterización del sólido	46
5.3.1- Diámetro	46
5.3.2- Densidad	46
5.3.3- Porosidad	46

5.4- Pruebas preliminares	47
5.4.1- Velocidad mínima de fluidización	49
5.4.2- Caída de presión en el punto de fluidización incipiente	49
5.4.3- Velocidad límite del fluido	51
5.4.4- Determinación del tipo de fluidización realizada	52
5.5- Guía de Trabajo	53
6- CONCLUSIONES	66
BIBLIOGRAFÍA	68
APÉNDICES	70

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Efecto de la velocidad superficial del fluido sobre el sólido.	5
Figura 2: Caída de presión y altura del lecho frente a velocidad superficial para un lecho de sólidos	6
Figura 3: Fases de la fluidización de burbujeo.	13
Figura 4: Efectos de la canalización causada por el sólido en el lecho fluidizado y en la velocidad de fluidización.	14
Figura 5: Esquema descriptivo del equipo de fluidización.	33
Figura 6: Esquema del sistema de medida de caída de presión.	36
Figura 7: Diagrama de altura de las tomas manométricas.	37
Figura 8: Gráfico caída de presión v/s velocidad superficial	47
Figura 9: Gráfico Altura del Lecho v/s Velocidad Superficial..	48

Figura 10: Gráfico comparación de valores de Caída de presión teórica y experimental.	50
Figura 11: Gráfico porosidad del lecho v/s velocidad superficial.	52

ÍNDICE DE TABLAS

TABLA 1: Resumen de estimaciones de velocidad mínima de fluidización y velocidad límite para partículas de vidrio de 1, 3 y 5 mm de diámetro.	28
TABLA 2: Valores centrales del gráfico caída de presión v/s velocidad superficial.	48
TABLA 3: Valores centrales del gráfico altura del lecho v/s velocidad superficial.	49

ÍNDICE DE APÉNDICES

APÉNDICE 1: Estimaciones de velocidad mínima de fluidización y velocidad límite para partículas de 1, 3 y 5 mm de diámetro	71
APÉNDICE 2: Resultados obtenidos en laboratorio	82
APÉNDICE 3: Resultados usados para análisis de resultados	88
APÉNDICE 4: Ejemplos de cálculos	91
APÉNDICE 5: Valores teóricos de caída de presión a cada altura y velocidad medidas	98
APÉNDICE 6: Valores de porosidad del lecho a cada velocidad medida	101

SIMBOLOGIA

A: Área de sección transversal de la columna de fluidización, (m).

C: Altura a la que se encuentra la primera toma de presión, (0 cm).

D: Diámetro de la columna de fluidización, (10 m).

d_p: Diámetro de las partículas, (3×10^{-3} m).

Fr: Número de Froude, (adimensional).

Fr_m: Número de Froude en condiciones de mínima fluidización, (adimensional).

Ga: Número de Galio, (adimensional).

g: Aceleración de gravedad, (9.8 m/s^2).

g_c: Factor de proporcionalidad a la ley de Newton, ($9.81 \text{ m}\cdot\text{kg}/\text{kg}\cdot\text{s}^2$).

H: Altura a la que se encuentra la tercera toma de presión, (84×10^{-2} m).

h: Altura que alcanza el Tetracloruro de Carbono dentro del manómetro, (m).

L: Altura del lecho fluidizado (m).

L_m: Altura del lecho fijo o del lecho en condiciones de mínima fluidización, (0.1 m).

m: Porción de masa de partículas (g).

m_p: Masa de partículas cargadas en la columna de fluidización (g).

P(mmHg): Caída de presión medida en mm de Hg.

P(mmCCl₄): Caída de presión medida en mm de CCl₄.

Q: Caudal de agua, (m^3/s).

t: Tiempo, (s).

Re: Numero de Reynolds de las partículas, (adimensional).

Re_m : Número de Reynolds en condiciones de mínima fluidización, (adimensional).

\bar{V}_0 : Velocidad superficial del fluido, (m/s).

\bar{V}_{0m} : Velocidad mínima de fluidización, (m/s).

V_i : Velocidad límite o de arrastre del fluido, (m/s).

V : Volumen de agua medido, (l).

V_i : Volumen Inicial de agua, (ml).

V_f : Volumen final de agua, (ml).

ε : Porosidad del lecho fluidizado, (adimensional).

ε_m : Porosidad del lecho fijo o porosidad en el punto de fluidización incipiente, (0.51, adimensional).

ΔP : Caída de presión a través del lecho, (N/m²).

μ : Viscosidad del agua, (1.08x10⁻³ kg/ms).

ρ : Densidad del agua, (998.2 kg/m³).

ρ_p : Densidad de las partículas, (2504 kg/m³).

Φ_p : Esfericidad de las partículas, (1, adimensional).

ρ_{Hg} : Densidad del Mercurio, (13600 kg/m³).

ρ_{CCl_4} : Densidad del Tetracloruro de Carbono, (1590 kg/m³).

SIMBOLOGIA

A: Área de sección transversal de la columna de fluidización, (m).

C: Altura a la que se encuentra la primera toma de presión, (0 cm).

D: Diámetro de la columna de fluidización, (10 m).

d_p: Diámetro de las partículas, (3×10^{-3} m).

Fr: Número de Froude, (adimensional).

Fr_m: Número de Froude en condiciones de mínima fluidización, (adimensional).

Ga: Número de Galio, (adimensional).

g: Aceleración de gravedad, (9.8 m/s^2).

g_c: Factor de proporcionalidad a la ley de Newton, ($9.81 \text{ m}\cdot\text{kg}/\text{kg}_f\cdot\text{s}^2$).

H: Altura a la que se encuentra la tercera toma de presión, (84×10^{-2} m).

h: Altura que alcanza el Tetracloruro de Carbono dentro del manómetro, (m).

L: Altura del lecho fluidizado (m).

L_m: Altura del lecho fijo o del lecho en condiciones de mínima fluidización, (0.1 m).

m: Porción de masa de partículas (g).

m_p: Masa de partículas cargadas en la columna de fluidización (g).

P(mmHg): Caída de presión medida en mm de Hg.

P(mmCCl₄): Caída de presión medida en mm de CCl₄.

Q: Caudal de agua, (m^3/s).

t: Tiempo, (s).

Re: Numero de Reynolds de las partículas, (adimensional).

Re_m : Número de Reynolds en condiciones de mínima fluidización, (adimensional).

\bar{V}_0 : Velocidad superficial del fluido, (m/s).

\bar{V}_{0m} : Velocidad mínima de fluidización, (m/s).

V_i : Velocidad límite o de arrastre del fluido, (m/s).

V : Volumen de agua medido, (l).

V_i : Volumen Inicial de agua, (ml).

V_f : Volumen final de agua, (ml).

ε : Porosidad del lecho fluidizado, (adimensional).

ε_m : Porosidad del lecho fijo o porosidad en el punto de fluidización incipiente, (0.51, adimensional).

ΔP : Caída de presión a través del lecho, (N/m²).

μ : Viscosidad del agua, (1.08x10⁻³ kg/ms).

ρ : Densidad del agua, (998.2 kg/m³).

ρ_p : Densidad de las partículas, (2504 kg/m³).

Φ_p : Esfericidad de las partículas, (1, adimensional).

ρ_{Hg} : Densidad del Mercurio, (13600 kg/m³).

ρ_{CCl_4} : Densidad del Tetracloruro de Carbono, (1590 kg/m³).

RESUMEN

El objetivo de este trabajo es “diseñar e implementar un equipo a escala de laboratorio que permita demostrar el comportamiento de un sistema de contacto entre un sólido granular y un líquido, desde el estado inmóvil del sólido (lecho fijo) hasta su estado de fluidización”.

Para alcanzar este objetivo y considerando que la fluidización es una operación unitaria presente en muchos procesos productivos la cual es necesario incluir dentro de los contenidos enseñados a los estudiantes de las carreras de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil Ambiental se decide diseñar, construir y poner en marcha un lecho fluidizado para actividades docentes.

El resultado del diseño es una columna de acrílico de 84 cm de largo y 10 cm de diámetro, con 3 tomas de presión que permiten medir la caída de presión en el lecho fijo y en el lecho fluidizado.

Los principales parámetros medidos son la velocidad mínima de fluidización \bar{V}_{0m} , la caída de presión en el punto de fluidización incipiente ΔP y la velocidad límite del fluido V_L , cuyos resultados son: 5.1×10^{-2} m/s, 1268.79 N/m² y 1.55×10^{-1} m/s, respectivamente, los que comparados con los resultados teóricos obtenidos mediante las ecuaciones correspondientes son mayores, situación que indica que pese a efectuarse una

fluidización de tipo particulada, esta no se ajusta perfectamente a lo que la teoría indica, debido a lo poco adecuados diámetros de la columna de fluidización y de las tomas manométricas.

1. INTRODUCCIÓN

Los profesionales relacionados al área industrial, en su desempeño laboral se ven enfrentados a transformaciones de materias primas y fuentes de energía en productos útiles a la sociedad mediante distintos procesos productivos.

Todo proceso productivo es resultado de una serie ordenada de etapas llamada *operaciones unitarias*.

Una de las operaciones unitarias importantes en la Ingeniería de Procesos es la llamada fluidización, que es un sistema de contacto entre un sólido granular y un fluido, que convierte un lecho de partículas en una masa suspendida y expandida que posee muchas de las propiedades y comportamiento de un líquido. Esta Operación Unitaria se haya presente en muchos procesos productivos tales como secado y congelamiento de alimentos, combustión de carbón, reacciones catalíticas, limpieza de restos orgánicos de piezas metálica (hierro o bronce), filtros biológicos, etc.

El sistema de lecho fluidizado es ampliamente utilizado porque, entre otras ventajas, en él se puede controlar la temperatura de operación, mantener altas tasas de transferencia de calor y masa. Además, se utiliza con una amplia variedad de materiales incluyendo polvos finos, partículas gruesas, cristales, gránulos o incluso pulpas o pastas. Esta Operación es muy importante en procesos térmicos, tal como la combustión en lecho

fluidizado, debido a que ésta es muy eficiente e impide la generación de contaminantes, por lo que se considera como una "tecnología limpia".

Como la fluidización es una operación presente en muchos procesos productivos, es necesario que los futuros profesionales conozcan y manejen sus principios básicos. Para satisfacer esta necesidad a nivel académico, se decide implementar un equipo de fluidización para uso de laboratorio con su respectiva guía de trabajo, por medio de los cuales se muestre y enseñe los principales fundamentos de dicha operación unitaria a los estudiantes de las carreras de Ingeniería Ambiental e Ingeniería Civil Ambiental de la Universidad Católica de Temuco.

El equipo es diseñado y construido a escala de laboratorio, con fines de docencia, para la demostración del fenómeno de fluidización.

2- OBJETIVOS

2.1- Objetivo general:

- Diseñar e implementar un equipo a escala de laboratorio que permita demostrar el comportamiento de un sistema de contacto entre un sólido granular y un líquido, desde el estado inmóvil del sólido (lecho fijo) hasta su estado de fluidización.

2.2- Objetivos específicos.

- Diseñar, construir e implementar un equipo de fluidización a escala de laboratorio.
- Poner en marcha el equipo de fluidización.
- Caracterizar el material granular que será fluidizado.
- Determinar experimentalmente la velocidad mínima de fluidización y compararla con su valor teórico.
- Determinar experimentalmente la caída de presión en el punto de fluidización incipiente y compararla con su valor teórico.
- Determinar experimentalmente la velocidad límite del fluido y compararla con su valor teórico.
- Determinar el tipo de fluidización realizada.
- Confeccionar una guía de trabajo indicando principios y actividades a realizar para ser utilizada por los alumnos en la ejecución del trabajo de laboratorio.

3 FUNDAMENTO TEÓRICO

La *fluidización* de sólidos se produce cuando una corriente de fluido atraviesa en forma ascendente un lecho de partículas en reposo, el que tiene una cierta *altura* L y *porosidad* o *fracción ocupada por los huecos*, ε , haciéndole perder su forma compacta y suspendiéndolas en él.

Para lograr la fluidización, se comienza con el ascenso del fluido a una velocidad tan baja que el lecho de partículas permanece inmóvil. El estado de lecho fijo se representa en la figura 1.a). En este estado se puede determinar la caída de presión a través del lecho por medio de la ecuación de Ergun, (Mc Cabe, 1991):

$$\frac{\Delta P g_c \Phi_p d_p \varepsilon^3}{L \rho \bar{V}_0^2 (1-\varepsilon)} = 150 \frac{(1-\varepsilon) \mu}{\Phi_p d_p \bar{V}_0 \rho} + 1,75 \quad (1)$$

Donde:

ΔP : Caída de presión a través del lecho, μ : Viscosidad del agua, ρ : Densidad del agua, Φ_p : Esfericidad de las partículas, ε : Porosidad del lecho fluidizado, L : Altura del lecho fluidizado, d_p : Diámetro de las partículas, g_c : Factor de proporcionalidad a la ley de Newton.

Al aumentar la velocidad del fluido, aumenta la caída de presión, aun cuando las partículas permanecen sin alterar su condición de lecho fijo, su altura ni su porosidad.

Con el aumento constante de la velocidad superficial del fluido, \bar{V}_0 , aumenta la altura del lecho, L , y su porosidad, ε . Este movimiento se produce cuando la caída de presión a través del lecho se iguala al peso de este, a una cierta velocidad llamada *velocidad mínima de fluidización*, \bar{V}_{0m} . Este punto se conoce como *punto de fluidización incipiente*.

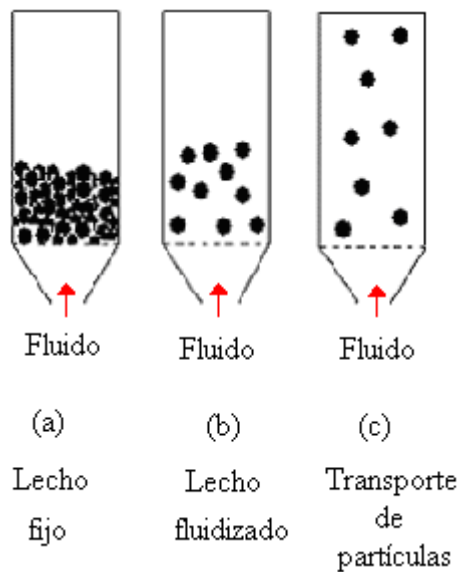


Figura 1: Efecto de la velocidad superficial del fluido sobre el sólido, (Correa, 1982).

Al aumentar la velocidad superficial más allá de la velocidad mínima de fluidización las partículas se separan entre ellas, moviéndose en el lecho, representado en la figura 1.b).

Ahora la caída de presión permanece constante, pero la altura del lecho aumenta al aumentar el flujo de fluido, tal como lo indica la figura 2.

Al disminuir la velocidad del fluido, la caída de presión permanece constante, disminuyendo la altura, hasta la velocidad de fluido igual a \bar{V}_{0m} , la caída de presión disminuye y la altura permanece constante.

La fluidización de sólidos termina cuando la velocidad del fluido sobrepasa la *velocidad límite*, V_b , provocando el arrastre de las partículas, observado en (c) (figura 1).

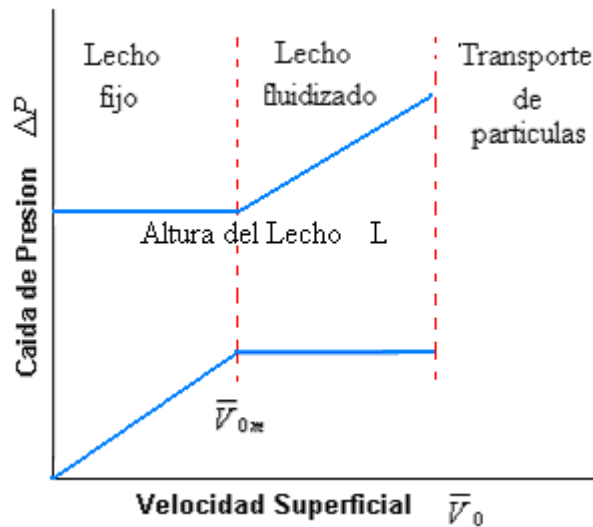


Figura 2: Caída de presión y altura del lecho frente a velocidad superficial para un lecho de sólidos, (Mc Cabe, 1991)

3.1- Velocidad mínima de fluidización, \bar{V}_{0m} :

Como se dijo, la fluidización se alcanza cuando la caída de presión a través del lecho se iguala al peso de este, esto es:

(Caída de presión a través del lecho) = (Peso lecho / unidad área sección transversal)

$$\Delta P = (1 - \varepsilon) (\rho_p - \rho) g \frac{L}{g_c} \quad (2.a)$$

$$\frac{\Delta P g_c}{L} = (1 - \varepsilon) (\rho_p - \rho) g \quad (2.b)$$

Donde:

g : Aceleración de gravedad, ρ_p : Densidad de las partículas.

Considerando en este punto la porosidad ε como la porosidad mínima ε_m , la ecuación (2) se modifica a:

$$\frac{\Delta P g_c}{L_m} = (1 - \varepsilon_m) (\rho_p - \rho) g \quad (3)$$

Donde:

L_m : Altura del lecho fijo o del lecho en condiciones de mínima fluidización, ε_m :

Porosidad del lecho fijo o porosidad en el punto de fluidización incipiente.

Reemplazando $\frac{\Delta P g_c}{L_m}$ de la ecuación (3) en la ecuación (1) se obtiene:

$$150 \frac{\mu \bar{V}_{0m} (1 - \varepsilon_m)}{\Phi_p^2 d_p^2 \varepsilon_m^3} + 1,75 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{\Phi_p d_p \varepsilon_m^3} = g(\rho_p - \rho) \quad (4)$$

Esta ecuación se aplica al punto de fluidización incipiente, con el fin de conocer el valor de la velocidad mínima de fluidización.

Ocasionalmente, existen inconvenientes para evaluar los parámetros de esfericidad y porosidad en el punto de fluidización incipiente, imposibilitando la aplicación de esta ecuación. Por esto Wen y Yu (Peña,1993) desarrollaron empíricamente una correlación aplicable a un amplio espectro de datos experimentales, la que al compararla con las propuestas por otros investigadores demuestran sus ventajas, tales como su simplicidad, exactitud y facilidad para obtener una estimación rápida de la velocidad mínima de fluidización.

Si ε_m y/o Φ_p son desconocidos, Wen y Yu, sugieren lo siguiente:

$$\Phi_p \varepsilon_m = \frac{1}{4} \quad \text{y} \quad \frac{(1 - \varepsilon)}{(\Phi_p^2 \varepsilon_m^3)} = 11 \quad (5)$$

$$\text{Re} = \left((33,7)^2 + 0,0408 Ga \right)^{1/2} - 33,7 \quad (6)$$

Para todos los rangos de número de Reynolds.

Donde Ga es el número de Galileo, que está dado por:

$$Ga = \frac{\rho(\rho_p - \rho)g d_p^3}{\mu} \quad (7)$$

Luego, para conocer el valor de la velocidad mínima de fluidización se reemplazan las ecuaciones (5) en la ecuación (4), obteniendo:

$$24,5 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{d_p} + 1650 \frac{\mu \bar{V}_{0m}}{d_p^2} = g(\rho_p - \rho) \quad (8)$$

3.2- Velocidad límite, V_t :

Cuando la velocidad del fluido a través del lecho es muy grande se produce el arrastre de las partículas, pudiendo ser transportadas de un lugar a otro. Esta velocidad se conoce como *velocidad límite* o *velocidad de arrastre*, V_t , la que puede estimarse para los diferentes regímenes de flujo, de acuerdo a las siguientes ecuaciones (Mendez, 1998):

$$\text{Flujo laminar: } V_t = \frac{g(\rho_p - \rho)d_p^2}{18\mu} \quad \text{Re} < 0.4 \quad (9)$$

$$\text{Flujo turbulento: } V_t = \left[\frac{3.1 g (\rho_p - \rho) d_p}{\rho} \right]^{1/2} \quad 500 < \text{Re} < 200000 \quad (10)$$

$$\text{Flujo de transición: } V_t = \left[\frac{4 (\rho_p - \rho)^2 g^2}{225 \rho \mu} \right]^{1/3} d_p \quad 0.4 < \text{Re} < 500 \quad (11)$$

Donde:

$$\text{Re} = \frac{d_p \rho \bar{V}_0}{\mu} \quad (12)$$

3.3- Tipos de fluidización

Dependiendo del fluido usado y de la diferencia de densidades entre éste y el sólido, se distinguen 2 tipos de fluidización, la *particulada u homogénea* y la *de burbujeo o heterogénea*, siendo el criterio adecuado para decidir entre una y otra, el producto de cuatro números adimensionales:

$$(Fr)_m (\text{Re})_m \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{L_m}{D} \right) < 100 \quad (13)$$

Que corresponde a fluidización particulada y

$$(Fr)_m (\text{Re})_m \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{L_m}{D} \right) > 100 \quad (14)$$

a fluidización de burbujeo, (Foust, 1998).

Donde $(Fr)_m$ es el número de Froude, definido como:

$$(Fr)_m = \frac{\bar{V}_{0m}^2}{d_p g} \quad (15)$$

y Re_m está definido por:

$$(Re)_m = \frac{d_p \rho \bar{V}_0}{\mu} \quad (16)$$

3.3.1- Fluidización particulada

La fluidización particulada u homogénea, generalmente, se presenta cuando el fluido usado es un líquido, la diferencia de densidades entre éste y el sólido es mínima o las partículas son pequeñas, (Foust 1998). Esto permite que las partículas se muevan individualmente y exista una fluidización uniforme del sólido.

La fluidización particulada proporciona un buen contacto entre el fluido y el sólido, formando pequeñas burbujas y manteniendo la caída de presión constante a través del lecho fluidizado.

La expansión del lecho se puede conocer al igualar las ecuaciones (2) y (3) y conociendo los valores de la porosidad y los de altura y porosidad para la fluidización incipiente:

$$L = L_m \frac{(1 - \varepsilon_m)}{(1 - \varepsilon)} \quad (17)$$

Donde la ecuación que permite determinar el valor de la porosidad es:

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_p}{\pi r^2 L_m \rho_p} \quad (18)$$

La que es válida para el punto de fluidización incipiente, al reemplazar ε por ε_m .

3.3.2- Fluidización de burbujeo

La fluidización de burbujeo o heterogénea se presenta en lechos fluidizados con gases, la diferencia de densidades entre éste y el sólido es muy grande o las partículas son de gran tamaño, (Foust, 1998). Esto impide que la fluidización sea pareja, pasando la mayor parte del fluido a través del lecho en forma de grandes burbujas que desaparecen en la superficie.

En este tipo de fluidización se distinguen dos fases: una *densa o emulsión*, que presenta una porosidad constante e igual a la porosidad en el mínimo de fluidización y una *fase de burbuja*, que contiene una cantidad insignificante de sólidos, las que se representan en la figura 3.

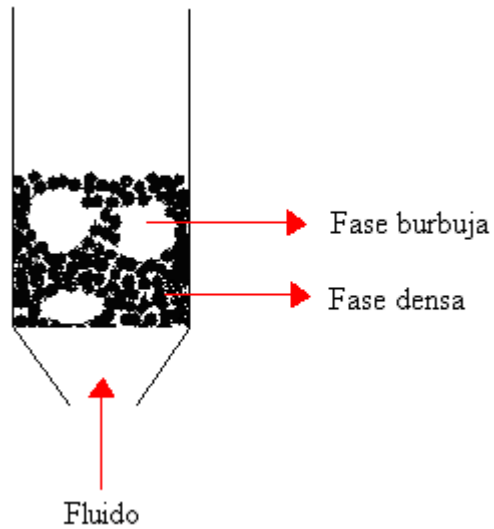


Figura 3: Fases de la fluidización de burbujeo, (Correa, 1982).

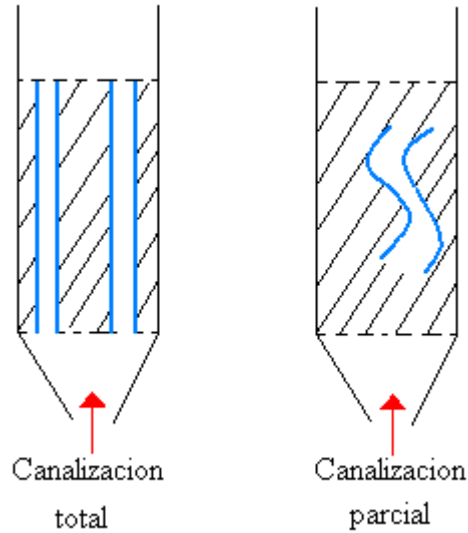
La formación de burbujas provoca anomalías que perjudican el contacto entre el gas y el sólido: la canalización del lecho y el flujo pistón del gas.

a) Canalización del lecho:

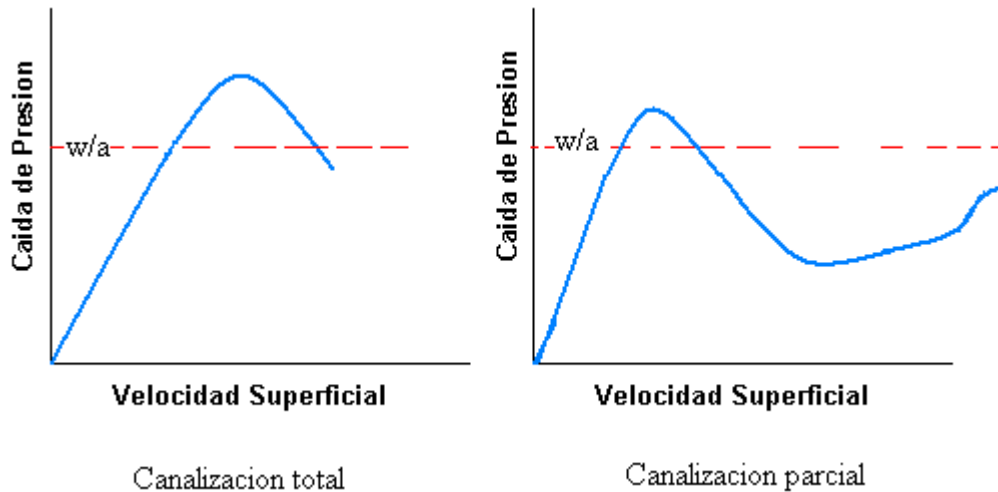
El fluido pasa a través del sólido abriendo verdaderos canales, en lugar de formar burbujas.

Las causas de la canalización son: el tipo de sólido, la distribución del gas y la baja velocidad del gas.

La canalización causada por el sólido puede ser total o parcial, representadas por la figura 4.



a) Canalización causada por el sólido en el lecho fluidizado.



b) Caída de presión y velocidad superficial en lecho fluidizado presentando canalización causada por el sólido.

Figura 4: Efectos de la canalización causada por el sólido en el lecho fluidizado y en la velocidad de fluidización, (Correa, 1982).

La canalización causada por el distribuidor ocurre cuando éste proporciona una dirección preferencial al fluido en el lecho y la canalización causada por la baja velocidad puede volver a la normalidad con un aumento de la velocidad, sin embargo existen casos donde la fluidización empeora y la pérdida de carga disminuye rápidamente.

b) Flujo pistón del gas o “slugging”:

En el interior del tubo que contiene al lecho ocurre el fenómeno de coalescencia, es decir, se forman pequeñas burbujas a la salida del distribuidor, las que a medida que ascienden se van uniendo para disminuir su número y aumentar su tamaño.

Al ascender esta burbuja, ascienden también los sólidos que se han adherido a ella, los cuales al no ser agitados forman un verdadero flujo pistón, posteriormente estos sólidos caen en forma de lluvia y nuevamente quedan suspendidos.

Esta situación es causa de una mayor cantidad de sólidos arrastrados además de producir un contacto pobre entre el gas y el sólido.

La expansión del lecho depende de la fracción de espacio ocupado por las burbujas ya que la fase densa no se expande significativamente al aumentar el flujo total.

3.4- Ventajas y desventajas de la fluidización, (Correa, 1982).

3.4.1- Ventajas

a) Control de la temperatura:

Cuando la diferencia entre las temperaturas de entrada del fluido y la del lecho es mínima, en cualquier punto de éste, se encuentran temperaturas uniformes cuya variación no es más de 10° C. Este control de la temperatura se debe a:

- **Alta capacidad calorífica del lecho**, la que estabiliza la temperatura cambiando la del lecho cuando la temperatura de entrada del sólido sufre alguna variación.
- **Alta velocidad de transferencia de calor dentro del lecho**, la que también permite que exista un buen control de la temperatura, ya que en el caso de que los coeficientes de transferencia de calor sean bajos, el que exista una gran superficie por unidad de volumen hace que la velocidad de transferencia de calor sea alta.
- **Alta transferencia de calor con un objeto inmerso en el lecho**, debido a la constante agitación de los sólidos y la velocidad del gas, cualquier unidad colocada dentro del lecho tiene una temperatura cercana a la temperatura del lecho.

b) Transferencia de calor:

Usando un lecho fluidizado es posible, tanto transferir calor a otras unidades de operación como, disminuir el tamaño de los intercambiadores debido a la gran superficie de transferencia útil en el lecho. Como la transferencia de calor es realizada en forma rápida, aquellas reacciones en que los reactivos no deben mantenerse a temperaturas intermedias para evitar productos no deseados, se pueden llevar a cabo en un lecho fluidizado.

c) Operación continua:

La operación de agregar y extraer sólidos del lecho fluidizado es relativamente fácil, mezclándose rápidamente estos sólidos y quedando con una composición uniforme en el lecho.

d) Catálisis:

El lecho fluidizado es excelente para la realización de fenómenos de superficie y aunque la mayoría de los catalizadores deben ser regenerados ya que con el tiempo pierden actividad, la operación de extraer los sólidos del lecho es relativamente fácil.

e) Posibilidad de agregar un inerte al sólido:

Se recurre a esta posibilidad para evitar la aglomeración de partículas durante una reacción.

f) Integración de agitadores mecánicos:

En el secado de suspensiones, la incorporación de un agitador mecánico al lecho de partículas aumenta la agitación y por ende la calidad de la fluidización, aumentando su capacidad de secado.

3.4.2- Desventajas

a) Rápido equilibrio de la temperatura:

Es perjudicial en aquellas reacciones que requieren una temperatura óptima para cada grado de conversión, por lo que no es posible usar un solo reactor.

b) By-pass del gas:

Los gases no pueden alcanzar un alto grado de conversión, ya que todo el exceso de aquel gas necesario para alcanzar el mínimo de fluidización pasa a través del lecho en forma de burbujas.

c) Abrasividad de los sólidos:

Esta situación lleva a que las unidades deban ser constantemente reparadas.

d) Aglomeración de sólidos:

La aglomeración de sólidos hace perder la condición de fluidizado al lecho, esto ocurre cuando hay producción de ceras o líquidos, o cuando el sólido se funde con una elevación de temperatura.

e) Trituración y pérdida de finos:

En el sistema de lecho fluidizado debe existir un recolector de polvo cuando haya trituración de sólidos o existan sólidos finos provenientes de la alimentación, para así evitar que éstos sean arrastrados por el fluido y que sólo los sólidos mas pesados queden para ser fluidizados con una velocidad del fluido insuficiente para lograrlo.

f) Flujo en contra corriente:

No es posible lograr un flujo en contra corriente entre el sólido y el fluido, en un lecho fluidizado.

g) Desgaste de las partículas:

Muchas partículas al ser fluidizadas tienden a desgastarse debido al roce entre ellas mismas, provocando la pérdida de partículas que abandonan el lecho.

3.5- Aplicaciones de los lechos fluidizados, (Perry, 1992)

3.5.1- Reacciones químicas

3.5.1.a- Reacciones catalíticas

a) Desintegración catalítica:

En el “craqueo” o desintegración catalítica existe un alto control de la temperatura en todas las unidades generalmente sin recurrir a mecanismos auxiliares para el control térmico.

El sistema de lecho fluidizado es uno de los procesos que ha reemplazado a los antiguos procesos térmicos de “craqueo”. En este sistema se usa polvo de gel de aluminio-sílice como catalizador. En el proceso, se pasa el petróleo a través de un lecho estacionario de partículas sólidas; a una temperatura de 450 ° a 540 °C y a una presión de 2,4 atmósferas.

b) Síntesis de cloruro de alquilo:

En un lecho fluidizado simple, se cloran olefinas para obtener cloruros de alquilo. El HCl reacciona con el O₂ con un catalizador de cloruro de cobre para producir cloro, que reacciona con la olefina para obtener cloruro de alquilo. En este proceso para obtener un control de la temperatura, se utiliza la recirculación de los finos del catalizador en solución acuosa.

c) Anhídrido ftálico:

En un reactor fluidizado de burbujeo se oxida naftaleno por medio del aire para producir anhídrido ftálico. Esta es una reacción exotérmica, aún cuando la alimentación de naftaleno sea líquida.

d) Acrilonitrilo:

En un lecho fluidizado simple reacciona propileno, amoníaco y oxígeno para producir acrilonitrilo, también se produce HCN y acetonitrilo.

e) Procesos catalíticos adicionales:

El nitrobenceno se hidrogena para producir anilina. La melamina y el isoftalonitrilo se producen en reactores catalíticos de lecho fluidizado.

3.5.1.b- Reacciones no catalíticas

a) Reacciones homogéneas:

Ejemplo de estas reacciones son la cloración de hidrocarburos o la oxidación de combustibles gaseosos. Se desarrollan en lecho fluidizado para mezclar los gases y controlar la temperatura. Los sólidos del lecho actúan como escape térmico o fuente, y facilitan la transferencia de calor desde el gas o hacia éste, o bien, de las superficies de intercambio calórico o hacia ellas.

b) Reacciones heterogéneas:

Ejemplo de éstas son las combustiones para aplicaciones metalúrgicas, también la calcinación de cal, dolomita y arcilla de rocas fosfóricas para eliminar el material carbonáceo antes de pasar a la digestión con ácido sulfúrico, de carbón para evitar la contaminación del medio ambiente, mediante la adición de piedra caliza o dolomita.

3.5.2- Contacto físico

a) Secado:

El secado por fluidización es una técnica para eliminar la humedad de un sólido mediante el paso de un gas ó líquido, a través de un lecho donde se encuentra depositado el sólido.

Se utiliza para el secado de carbón, cemento, roca y piedra caliza, principalmente. Es una de las técnicas utilizada en la industria de los alimentos, donde se consigue un secado rápido, homogéneo y controlado del producto alimenticio.

La principal ventaja de este tipo de secadores es que se pueden controlar exactamente todas las condiciones de operación, especialmente la temperatura durante el tiempo que dure el secado

b) Clasificación:

Se pueden separar partículas de diferentes tamaños en un lecho fluidizado mediante una corriente de gas.

c) Tratamiento térmico:

Puede ser tratamiento térmico de sólidos fluidizables o de objetos grandes. Se utilizan lechos fluidizados para el tratamiento térmico por la velocidad elevada de transferencia de calor y la temperatura uniforme.

d) Recubrimiento:

Los lechos fluidizados de resinas termosplásticas se han utilizado para facilitar el recubrimiento o el revestimiento de piezas metálicas, las que se sumergen en un lecho fluidizado que permite la inmersión completa de los sólidos secos.

e) Limpieza de metales:

Mediante la introducción de piezas en arena fluidizada con aire y gas es posible limpiar útiles, ganchos y bastidores, usados en las líneas de pintura industrial y, en general decapar restos orgánicos en piezas de base metálica (hierro o bronce), (Arfluid, 2005).

Las piezas se introducen en tinas calentadas a 400 – 425 °C, donde la arena en movimiento frota estas piezas suavemente, logrando el desprendimiento de las capas de pintura polimerizada sin deteriorarlas.

La ventaja radica en el hecho de que al entrar el fluido por la parte inferior del equipo, y al comportarse el sistema como un líquido, las piezas a limpiar pueden introducirse y sacarse sin mayor esfuerzo.

f) Combustión:

La combustión en lecho fluidizado es una aplicación relativamente reciente de la fluidización. Tiene ventajas como la reducción de las emisiones y la flexibilidad que ofrece para quemar combustibles de bajo poder calorífico.

En la industria del carbón, éste se incinera en un lecho fluidizado con partículas sólidas inertes, donde menos del 2% del material del lecho es el combustible y el resto son cenizas del combustible y absorbentes que se añade para capturar el azufre durante la combustión.

Los hornos con lechos fluidizados se utilizan muy a menudo para incinerar residuos o lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas.

El principio de la combustión por lecho fluidizado es "calentar" un lecho de arena y ponerlo en suspensión por inyección de aire, y así quemar los residuos vertidos en este lecho (efecto térmico y mecánico).

En España; donde se desechan considerables cantidades de residuos de piel curtida al cromo del sector curtidos/calzado, mediante combustión en lecho fluidizado, han aprovechado el poder calorífico de los restos de piel, que se sitúa entre 4.500 y 5.000

kilocalorías/kg de piel, lo que está por encima de muchos combustibles que se utilizan en la generación de energía, recuperando a la vez los compuestos de cromo (III) procedente del proceso de curtiembre, que componen el 95% de las cenizas tras la combustión, la que a su vez es menos del 5% del peso de piel inicial. Por esto la combustión en lecho fluidizado además de ser la mejor tecnología disponible para estos efectos, es considerada como una "tecnología limpia", (Martinez S.2001)

3 FUNDAMENTO TEÓRICO

La *fluidización* de sólidos se produce cuando una corriente de fluido atraviesa en forma ascendente un lecho de partículas en reposo, el que tiene una cierta *altura L* y *porosidad* o *fracción ocupada por los huecos*, ε , haciéndole perder su forma compacta y suspendiéndolas en él.

Para lograr la fluidización, se comienza con el ascenso del fluido a una velocidad tan baja que el lecho de partículas permanece inmóvil. El estado de lecho fijo se representa en la figura 1.a). En este estado se puede determinar la caída de presión a través del lecho por medio de la ecuación de Ergun, (Mc Cabe, 1991):

$$\frac{\Delta P g_c \Phi_p d_p \varepsilon^3}{L \rho \bar{V}_0^2 (1-\varepsilon)} = 150 \frac{(1-\varepsilon) \mu}{\Phi_p d_p \bar{V}_0 \rho} + 1,75 \quad (1)$$

Donde:

ΔP : Caída de presión a través del lecho, μ : Viscosidad del agua, ρ : Densidad del agua, Φ_p : Esfericidad de las partículas, ε : Porosidad del lecho fluidizado, L : Altura del lecho fluidizado, d_p : Diámetro de las partículas, g_c : Factor de proporcionalidad a la ley de Newton.

Al aumentar la velocidad del fluido, aumenta la caída de presión, aun cuando las partículas permanecen sin alterar su condición de lecho fijo, su altura ni su porosidad.

Con el aumento constante de la velocidad superficial del fluido, \bar{V}_0 , aumenta la altura del lecho, L , y su porosidad, ε . Este movimiento se produce cuando la caída de presión a través del lecho se iguala al peso de este, a una cierta velocidad llamada *velocidad mínima de fluidización*, \bar{V}_{0m} . Este punto se conoce como *punto de fluidización incipiente*.

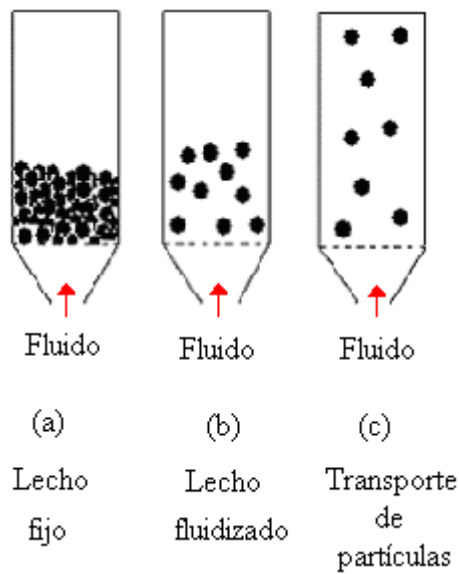


Figura 1: Efecto de la velocidad superficial del fluido sobre el sólido, (Correa, 1982).

Al aumentar la velocidad superficial más allá de la velocidad mínima de fluidización las partículas se separan entre ellas, moviéndose en el lecho, representado en la figura 1.b).

Ahora la caída de presión permanece constante, pero la altura del lecho aumenta al aumentar el flujo de fluido, tal como lo indica la figura 2.

Al disminuir la velocidad del fluido, la caída de presión permanece constante, disminuyendo la altura, hasta la velocidad de fluido igual a \bar{V}_{0m} , la caída de presión disminuye y la altura permanece constante.

La fluidización de sólidos termina cuando la velocidad del fluido sobrepasa la *velocidad límite*, V_b , provocando el arrastre de las partículas, observado en (c) (figura 1).

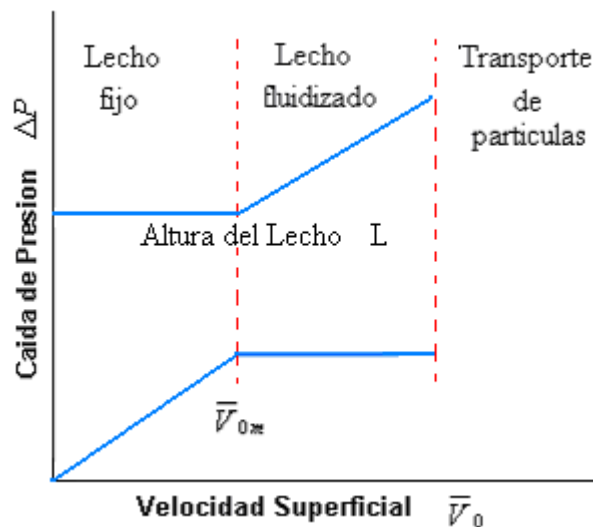


Figura 2: Caída de presión y altura del lecho frente a velocidad superficial para un lecho de sólidos, (Mc Cabe, 1991)

3.1- Velocidad mínima de fluidización, \bar{V}_{0m} :

Como se dijo, la fluidización se alcanza cuando la caída de presión a través del lecho se iguala al peso de este, esto es:

(Caída de presión a través del lecho) = (Peso lecho / unidad área sección transversal)

$$\Delta P = (1 - \varepsilon) (\rho_p - \rho) g \frac{L}{g_c} \quad (2.a)$$

$$\frac{\Delta P g_c}{L} = (1 - \varepsilon) (\rho_p - \rho) g \quad (2.b)$$

Donde:

g : Aceleración de gravedad, ρ_p : Densidad de las partículas.

Considerando en este punto la porosidad ε como la porosidad mínima ε_m , la ecuación (2) se modifica a:

$$\frac{\Delta P g_c}{L_m} = (1 - \varepsilon_m) (\rho_p - \rho) g \quad (3)$$

Donde:

L_m : Altura del lecho fijo o del lecho en condiciones de mínima fluidización, ε_m :

Porosidad del lecho fijo o porosidad en el punto de fluidización incipiente.

Reemplazando $\frac{\Delta P g_c}{L_m}$ de la ecuación (3) en la ecuación (1) se obtiene:

$$150 \frac{\mu \bar{V}_{0m} (1 - \varepsilon_m)}{\Phi_p^2 d_p^2 \varepsilon_m^3} + 1,75 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{\Phi_p d_p \varepsilon_m^3} = g(\rho_p - \rho) \quad (4)$$

Esta ecuación se aplica al punto de fluidización incipiente, con el fin de conocer el valor de la velocidad mínima de fluidización.

Ocasionalmente, existen inconvenientes para evaluar los parámetros de esfericidad y porosidad en el punto de fluidización incipiente, imposibilitando la aplicación de esta ecuación. Por esto Wen y Yu (Peña,1993) desarrollaron empíricamente una correlación aplicable a un amplio espectro de datos experimentales, la que al compararla con las propuestas por otros investigadores demuestran sus ventajas, tales como su simplicidad, exactitud y facilidad para obtener una estimación rápida de la velocidad mínima de fluidización.

Si ε_m y/o Φ_p son desconocidos, Wen y Yu, sugieren lo siguiente:

$$\Phi_p \varepsilon_m = \frac{1}{4} \quad \text{y} \quad \frac{(1 - \varepsilon)}{(\Phi_p^2 \varepsilon_m^3)} = 11 \quad (5)$$

$$\text{Re} = \left((33,7)^2 + 0,0408 Ga \right)^{1/2} - 33,7 \quad (6)$$

Para todos los rangos de número de Reynolds.

Donde Ga es el número de Galileo, que está dado por:

$$Ga = \frac{\rho(\rho_p - \rho)g d_p^3}{\mu} \quad (7)$$

Luego, para conocer el valor de la velocidad mínima de fluidización se reemplazan las ecuaciones (5) en la ecuación (4), obteniendo:

$$24,5 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{d_p} + 1650 \frac{\mu \bar{V}_{0m}}{d_p^2} = g(\rho_p - \rho) \quad (8)$$

3.2- Velocidad límite, V_t :

Cuando la velocidad del fluido a través del lecho es muy grande se produce el arrastre de las partículas, pudiendo ser transportadas de un lugar a otro. Esta velocidad se conoce como *velocidad límite* o *velocidad de arrastre*, V_t , la que puede estimarse para los diferentes regímenes de flujo, de acuerdo a las siguientes ecuaciones (Mendez, 1998):

$$\text{Flujo laminar: } V_t = \frac{g(\rho_p - \rho)d_p^2}{18\mu} \quad \text{Re} < 0.4 \quad (9)$$

$$\text{Flujo turbulento: } V_t = \left[\frac{3.1 g (\rho_p - \rho) d_p}{\rho} \right]^{1/2} \quad 500 < \text{Re} < 200000 \quad (10)$$

$$\text{Flujo de transición: } V_t = \left[\frac{4 (\rho_p - \rho)^2 g^2}{225 \rho \mu} \right]^{1/3} d_p \quad 0.4 < \text{Re} < 500 \quad (11)$$

Donde:

$$\text{Re} = \frac{d_p \rho \bar{V}_0}{\mu} \quad (12)$$

3.3- Tipos de fluidización

Dependiendo del fluido usado y de la diferencia de densidades entre éste y el sólido, se distinguen 2 tipos de fluidización, la *particulada u homogénea* y la *de burbujeo o heterogénea*, siendo el criterio adecuado para decidir entre una y otra, el producto de cuatro números adimensionales:

$$(Fr)_m (\text{Re})_m \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{L_m}{D} \right) < 100 \quad (13)$$

Que corresponde a fluidización particulada y

$$(Fr)_m (\text{Re})_m \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{L_m}{D} \right) > 100 \quad (14)$$

a fluidización de burbujeo, (Foust, 1998).

Donde $(Fr)_m$ es el número de Froude, definido como:

$$(Fr)_m = \frac{\bar{V}_{0m}^2}{d_p g} \quad (15)$$

y Re_m está definido por:

$$(Re)_m = \frac{d_p \rho \bar{V}_0}{\mu} \quad (16)$$

3.3.1- Fluidización particulada

La fluidización particulada u homogénea, generalmente, se presenta cuando el fluido usado es un líquido, la diferencia de densidades entre éste y el sólido es mínima o las partículas son pequeñas, (Foust 1998). Esto permite que las partículas se muevan individualmente y exista una fluidización uniforme del sólido.

La fluidización particulada proporciona un buen contacto entre el fluido y el sólido, formando pequeñas burbujas y manteniendo la caída de presión constante a través del lecho fluidizado.

La expansión del lecho se puede conocer al igualar las ecuaciones (2) y (3) y conociendo los valores de la porosidad y los de altura y porosidad para la fluidización incipiente:

$$L = L_m \frac{(1 - \varepsilon_m)}{(1 - \varepsilon)} \quad (17)$$

Donde la ecuación que permite determinar el valor de la porosidad es:

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_p}{\pi r^2 L_m \rho_p} \quad (18)$$

La que es válida para el punto de fluidización incipiente, al reemplazar ε por ε_m .

3.3.2- Fluidización de burbujeo

La fluidización de burbujeo o heterogénea se presenta en lechos fluidizados con gases, la diferencia de densidades entre éste y el sólido es muy grande o las partículas son de gran tamaño, (Foust, 1998). Esto impide que la fluidización sea pareja, pasando la mayor parte del fluido a través del lecho en forma de grandes burbujas que desaparecen en la superficie.

En este tipo de fluidización se distinguen dos fases: una *densa o emulsión*, que presenta una porosidad constante e igual a la porosidad en el mínimo de fluidización y una *fase de burbuja*, que contiene una cantidad insignificante de sólidos, las que se representan en la figura 3.

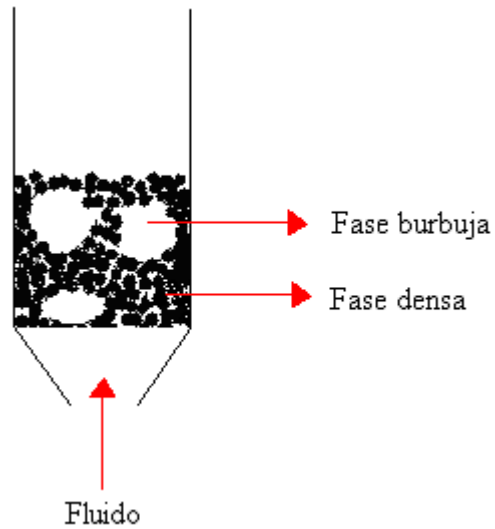


Figura 3: Fases de la fluidización de burbujeo, (Correa, 1982).

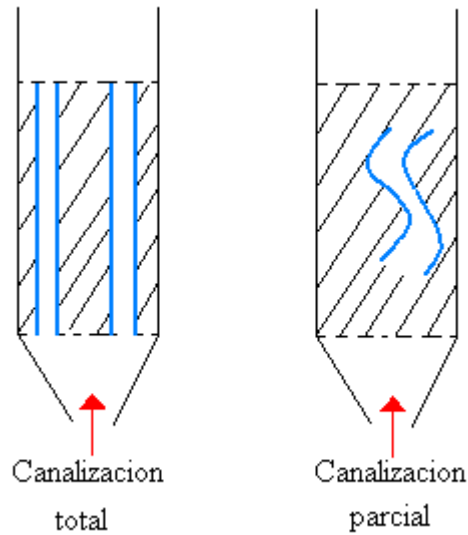
La formación de burbujas provoca anomalías que perjudican el contacto entre el gas y el sólido: la canalización del lecho y el flujo pistón del gas.

a) Canalización del lecho:

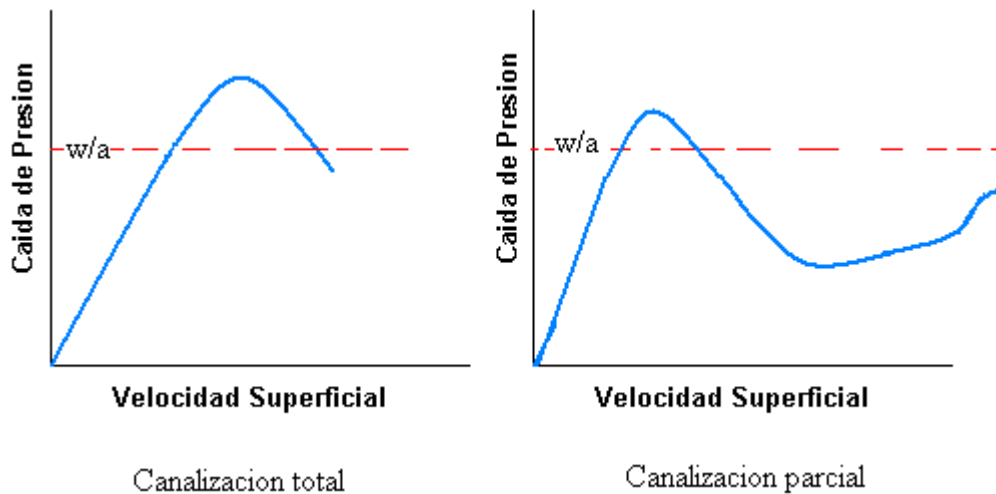
El fluido pasa a través del sólido abriendo verdaderos canales, en lugar de formar burbujas.

Las causas de la canalización son: el tipo de sólido, la distribución del gas y la baja velocidad del gas.

La canalización causada por el sólido puede ser total o parcial, representadas por la figura 4.



a) Canalización causada por el sólido en el lecho fluidizado.



b) Caída de presión y velocidad superficial en lecho fluidizado presentando canalización causada por el sólido.

Figura 4: Efectos de la canalización causada por el sólido en el lecho fluidizado y en la velocidad de fluidización, (Correa, 1982).

La canalización causada por el distribuidor ocurre cuando éste proporciona una dirección preferencial al fluido en el lecho y la canalización causada por la baja velocidad puede volver a la normalidad con un aumento de la velocidad, sin embargo existen casos donde la fluidización empeora y la pérdida de carga disminuye rápidamente.

b) Flujo pistón del gas o “slugging”:

En el interior del tubo que contiene al lecho ocurre el fenómeno de coalescencia, es decir, se forman pequeñas burbujas a la salida del distribuidor, las que a medida que ascienden se van uniendo para disminuir su número y aumentar su tamaño.

Al ascender esta burbuja, ascienden también los sólidos que se han adherido a ella, los cuales al no ser agitados forman un verdadero flujo pistón, posteriormente estos sólidos caen en forma de lluvia y nuevamente quedan suspendidos.

Esta situación es causa de una mayor cantidad de sólidos arrastrados además de producir un contacto pobre entre el gas y el sólido.

La expansión del lecho depende de la fracción de espacio ocupado por las burbujas ya que la fase densa no se expande significativamente al aumentar el flujo total.

3.4- Ventajas y desventajas de la fluidización, (Correa, 1982).

3.4.1- Ventajas

a) Control de la temperatura:

Cuando la diferencia entre las temperaturas de entrada del fluido y la del lecho es mínima, en cualquier punto de éste, se encuentran temperaturas uniformes cuya variación no es más de 10° C. Este control de la temperatura se debe a:

- **Alta capacidad calorífica del lecho**, la que estabiliza la temperatura cambiando la del lecho cuando la temperatura de entrada del sólido sufre alguna variación.
- **Alta velocidad de transferencia de calor dentro del lecho**, la que también permite que exista un buen control de la temperatura, ya que en el caso de que los coeficientes de transferencia de calor sean bajos, el que exista una gran superficie por unidad de volumen hace que la velocidad de transferencia de calor sea alta.
- **Alta transferencia de calor con un objeto inmerso en el lecho**, debido a la constante agitación de los sólidos y la velocidad del gas, cualquier unidad colocada dentro del lecho tiene una temperatura cercana a la temperatura del lecho.

b) Transferencia de calor:

Usando un lecho fluidizado es posible, tanto transferir calor a otras unidades de operación como, disminuir el tamaño de los intercambiadores debido a la gran superficie de transferencia útil en el lecho. Como la transferencia de calor es realizada en forma rápida, aquellas reacciones en que los reactivos no deben mantenerse a temperaturas intermedias para evitar productos no deseados, se pueden llevar a cabo en un lecho fluidizado.

c) Operación continua:

La operación de agregar y extraer sólidos del lecho fluidizado es relativamente fácil, mezclándose rápidamente estos sólidos y quedando con una composición uniforme en el lecho.

d) Catálisis:

El lecho fluidizado es excelente para la realización de fenómenos de superficie y aunque la mayoría de los catalizadores deben ser regenerados ya que con el tiempo pierden actividad, la operación de extraer los sólidos del lecho es relativamente fácil.

e) Posibilidad de agregar un inerte al sólido:

Se recurre a esta posibilidad para evitar la aglomeración de partículas durante una reacción.

f) Integración de agitadores mecánicos:

En el secado de suspensiones, la incorporación de un agitador mecánico al lecho de partículas aumenta la agitación y por ende la calidad de la fluidización, aumentando su capacidad de secado.

3.4.2- Desventajas

a) Rápido equilibrio de la temperatura:

Es perjudicial en aquellas reacciones que requieren una temperatura óptima para cada grado de conversión, por lo que no es posible usar un solo reactor.

b) By-pass del gas:

Los gases no pueden alcanzar un alto grado de conversión, ya que todo el exceso de aquel gas necesario para alcanzar el mínimo de fluidización pasa a través del lecho en forma de burbujas.

c) Abrasividad de los sólidos:

Esta situación lleva a que las unidades deban ser constantemente reparadas.

d) Aglomeración de sólidos:

La aglomeración de sólidos hace perder la condición de fluidizado al lecho, esto ocurre cuando hay producción de ceras o líquidos, o cuando el sólido se funde con una elevación de temperatura.

e) Trituración y pérdida de finos:

En el sistema de lecho fluidizado debe existir un recolector de polvo cuando haya trituración de sólidos o existan sólidos finos provenientes de la alimentación, para así evitar que éstos sean arrastrados por el fluido y que sólo los sólidos mas pesados queden para ser fluidizados con una velocidad del fluido insuficiente para lograrlo.

f) Flujo en contra corriente:

No es posible lograr un flujo en contra corriente entre el sólido y el fluido, en un lecho fluidizado.

g) Desgaste de las partículas:

Muchas partículas al ser fluidizadas tienden a desgastarse debido al roce entre ellas mismas, provocando la pérdida de partículas que abandonan el lecho.

3.5- Aplicaciones de los lechos fluidizados, (Perry, 1992)

3.5.1- Reacciones químicas

3.5.1.a- Reacciones catalíticas

a) Desintegración catalítica:

En el “craqueo” o desintegración catalítica existe un alto control de la temperatura en todas las unidades generalmente sin recurrir a mecanismos auxiliares para el control térmico.

El sistema de lecho fluidizado es uno de los procesos que ha reemplazado a los antiguos procesos térmicos de “craqueo”. En este sistema se usa polvo de gel de aluminio-sílice como catalizador. En el proceso, se pasa el petróleo a través de un lecho estacionario de partículas sólidas; a una temperatura de 450 ° a 540 °C y a una presión de 2,4 atmósferas.

b) Síntesis de cloruro de alquilo:

En un lecho fluidizado simple, se cloran olefinas para obtener cloruros de alquilo. El HCl reacciona con el O₂ con un catalizador de cloruro de cobre para producir cloro, que reacciona con la olefina para obtener cloruro de alquilo. En este proceso para obtener un control de la temperatura, se utiliza la recirculación de los finos del catalizador en solución acuosa.

c) Anhídrido ftálico:

En un reactor fluidizado de burbujeo se oxida naftaleno por medio del aire para producir anhídrido ftálico. Esta es una reacción exotérmica, aún cuando la alimentación de naftaleno sea líquida.

d) Acrilonitrilo:

En un lecho fluidizado simple reacciona propileno, amoníaco y oxígeno para producir acrilonitrilo, también se produce HCN y acetonitrilo.

e) Procesos catalíticos adicionales:

El nitrobenceno se hidrogena para producir anilina. La melamina y el isoftalonitrilo se producen en reactores catalíticos de lecho fluidizado.

3.5.1.b- Reacciones no catalíticas

a) Reacciones homogéneas:

Ejemplo de estas reacciones son la cloración de hidrocarburos o la oxidación de combustibles gaseosos. Se desarrollan en lecho fluidizado para mezclar los gases y controlar la temperatura. Los sólidos del lecho actúan como escape térmico o fuente, y facilitan la transferencia de calor desde el gas o hacia éste, o bien, de las superficies de intercambio calórico o hacia ellas.

b) Reacciones heterogéneas:

Ejemplo de éstas son las combustiones para aplicaciones metalúrgicas, también la calcinación de cal, dolomita y arcilla de rocas fosfóricas para eliminar el material carbonáceo antes de pasar a la digestión con ácido sulfúrico, de carbón para evitar la contaminación del medio ambiente, mediante la adición de piedra caliza o dolomita.

3.5.2- Contacto físico

a) Secado:

El secado por fluidización es una técnica para eliminar la humedad de un sólido mediante el paso de un gas ó líquido, a través de un lecho donde se encuentra depositado el sólido.

Se utiliza para el secado de carbón, cemento, roca y piedra caliza, principalmente. Es una de las técnicas utilizada en la industria de los alimentos, donde se consigue un secado rápido, homogéneo y controlado del producto alimenticio.

La principal ventaja de este tipo de secadores es que se pueden controlar exactamente todas las condiciones de operación, especialmente la temperatura durante el tiempo que dure el secado

b) Clasificación:

Se pueden separar partículas de diferentes tamaños en un lecho fluidizado mediante una corriente de gas.

c) Tratamiento térmico:

Puede ser tratamiento térmico de sólidos fluidizables o de objetos grandes. Se utilizan lechos fluidizados para el tratamiento térmico por la velocidad elevada de transferencia de calor y la temperatura uniforme.

d) Recubrimiento:

Los lechos fluidizados de resinas termosplásticas se han utilizado para facilitar el recubrimiento o el revestimiento de piezas metálicas, las que se sumergen en un lecho fluidizado que permite la inmersión completa de los sólidos secos.

e) Limpieza de metales:

Mediante la introducción de piezas en arena fluidizada con aire y gas es posible limpiar útiles, ganchos y bastidores, usados en las líneas de pintura industrial y, en general decapar restos orgánicos en piezas de base metálica (hierro o bronce), (Arfluid, 2005).

Las piezas se introducen en tinas calentadas a 400 – 425 °C, donde la arena en movimiento frota estas piezas suavemente, logrando el desprendimiento de las capas de pintura polimerizada sin deteriorarlas.

La ventaja radica en el hecho de que al entrar el fluido por la parte inferior del equipo, y al comportarse el sistema como un líquido, las piezas a limpiar pueden introducirse y sacarse sin mayor esfuerzo.

f) Combustión:

La combustión en lecho fluidizado es una aplicación relativamente reciente de la fluidización. Tiene ventajas como la reducción de las emisiones y la flexibilidad que ofrece para quemar combustibles de bajo poder calorífico.

En la industria del carbón, éste se incinera en un lecho fluidizado con partículas sólidas inertes, donde menos del 2% del material del lecho es el combustible y el resto son cenizas del combustible y absorbentes que se añade para capturar el azufre durante la combustión.

Los hornos con lechos fluidizados se utilizan muy a menudo para incinerar residuos o lodos de plantas de tratamiento de aguas servidas.

El principio de la combustión por lecho fluidizado es "calentar" un lecho de arena y ponerlo en suspensión por inyección de aire, y así quemar los residuos vertidos en este lecho (efecto térmico y mecánico).

En España; donde se desechan considerables cantidades de residuos de piel curtida al cromo del sector curtidos/calzado, mediante combustión en lecho fluidizado, han aprovechado el poder calorífico de los restos de piel, que se sitúa entre 4.500 y 5.000

kilocalorías/kg de piel, lo que está por encima de muchos combustibles que se utilizan en la generación de energía, recuperando a la vez los compuestos de cromo (III) procedente del proceso de curtiembre, que componen el 95% de las cenizas tras la combustión, la que a su vez es menos del 5% del peso de piel inicial. Por esto la combustión en lecho fluidizado además de ser la mejor tecnología disponible para estos efectos, es considerada como una "tecnología limpia", (Martinez S.2001)

4. METODOLOGÍA

4.1 – Materiales

Los materiales utilizados en el desarrollo de este trabajo son los que se indican a continuación:

- Una columna de acrílico de 84 cm. de largo, 10 cm de diámetro y de 3 mm de espesor.
- Soporte de lecho removible, malla de acero AISI A304 con marco.
- 966 gramos de esferas de vidrio Pyrex de 3 mm de diámetro.
- Cono de acero para la entrada de fluido.
- Cono de hojalata galvanizada para la salida de fluido.
- Malla de retención de partículas.
- 1,5 metros de manguera plástica de 1,5 pulgadas de diámetro.
- Una Válvula de compuerta de 1,5 pulgadas de diámetro.
- 1 metro de tubo de PVC de 1,5 pulgadas de diámetro.
- 4 uniones americanas de 1,5 pulgadas de diámetro.
- 2 metros de manguera plástica de 2 pulgadas de diámetro.
- Una bomba centrífuga de 1,5 Hp.
- Un set de manómetros en base a Tetracloruro de Carbono
- Estanque de plástico de 125 litros.
- Vaso precipitado de 1 litro.

- Probeta de 100 ml.
- Cronómetro

4.2- Metodología

4.2.1- Diseño del equipo de fluidización

4.2.1.1- Columna de fluidización:

El fluido a utilizar es agua en condiciones ambientales y el sólido esferas de vidrio.

Se cuenta con un tubo de acrílico, para permitir la observación del proceso, con un diámetro de 10 centímetros.

Además de la columna y las partículas que conformarán el lecho de sólidos, el equipo debe contar con una placa porosa que distribuya el fluido homogéneamente y sirva de soporte al lecho, un manómetro de ramas, una bomba que impulse el fluido y un recipiente que lo contenga debido a que el fluido se recircula, todos ellos unidos mediante mangueras plásticas y tubos de PVC.

La fabricación de la columna de fluidización se encarga a la empresa Freelab, de Quilpué, quienes recibieron las especificaciones de altura y diámetro de la columna, así como las ubicaciones de la tomas de presión a lo largo del lecho fijo y luego de estar fluidizado.

Para realizar la estimación de la altura del lecho fijo se calculan los valores teóricos de la velocidad mínima de fluidización y la velocidad terminal, para esferas de 1, 3 y 5 milímetros de diámetro, cuando las partículas cargadas en la columna alcanzan 10 y 20 centímetros de altura, con el fin de determinar si estas velocidades se encuentran dentro del caudal otorgado por la bomba centrífuga con la que se cuenta en Laboratorio de Operaciones Unitarias. Los valores obtenidos se resumen en la tabla 1 y el detalle de los cálculos realizados se encuentran en el apéndice 1.

También se verifica que la fluidización ocurrida bajo estas condiciones sea de tipo particulada.

Tabla 1: Resumen de estimaciones de velocidad mínima de fluidización y velocidad límite para partículas de vidrio de 1, 3 y 5 mm de diámetro.

D_p (mm)	\bar{V}_{0m} (m/s)	Q_m (m ³ /s)	L_f (m) $L_m=10$ cm	L_f (m) $L_m=20$ cm	V_t (m/s)	Q_t (m ³ /s)
1	$7,39 \times 10^{-3}$	$5,83 \times 10^{-5}$	0,60	1,20	$1,51 \times 10^{-1}$	$1,19 \times 10^{-3}$
3	$3,21 \times 10^{-2}$	$2,53 \times 10^{-4}$	0,91	1,198	$3,71 \times 10^{-1}$	$2,91 \times 10^{-3}$
5	$6,41 \times 10^{-2}$	$5,03 \times 10^{-3}$	1,53	0,90	$4,88 \times 10^{-1}$	$3,83 \times 10^{-3}$

Con estos resultados se optó por cargar 10 cm de partículas de vidrio de 3 mm de diámetro, las que deben alcanzar una altura de fluidización por debajo del metro de altura.

La empresa fabricante es, finalmente quien determina el largo total y el diámetro disponible de la columna, así como también el tipo de soporte de las partículas.

Una vez recibida la columna se realizan las respectivas conexiones de mangueras y tubos.

4.2.1.2- Soporte de lecho:

El soporte para el lecho de partículas proviene del fabricante de la columna y consiste en una malla de acero AISI A304 con marco, para diámetro de partículas hasta 300 μm .

4.2.1.3- Bomba centrífuga:

La bomba centrífuga de 1,5 HP y caudal máximo de 220 litros por minuto, se encuentra disponible en el Laboratorio de Operaciones Unitarias, de la Escuela de Ingeniería Ambiental de nuestra Universidad.

4.2.1.4- Manómetro:

Al igual que la bomba centrífuga y el recipiente contenedor de agua, el manómetro de ramas usado se encuentra disponible en la Universidad.

El fluido manométrico es Tetracloruro de Carbono, ya que este permite una mejor visualización de la caída de presión, debido a que la diferencia de alturas es mas amplia en comparación al Mercurio, que también fue probado.

4.2.2- Cálculos teóricos

4.2.2.1-Velocidad mínima de fluidización:

Ergun: la velocidad mínima de fluidización se determina mediante la ecuación (4), de la que se conocen los valores de viscosidad, diámetro de partículas, esfericidad de partículas y porosidad en el punto de fluidización incipiente, la que se determina según la metodología indicada posteriormente en el punto 4.2.3.4.

Wen Yu: por medio de la ecuación (8), se conoce la velocidad mínima de fluidización mediante el método de Wen Yu, donde se conocen los valores de densidad del fluido, densidad de las partículas y diámetro de las partículas.

Un ejemplo de los valores de velocidades calculados con ambas ecuaciones se presenta en el punto 1 del apéndice 4.

4.2.2.2-Caída de presión en punto de fluidización incipiente

El valor teórico de la caída de presión en el punto de fluidización incipiente se obtiene por medio de la ecuación (3), luego de despejar el valor de ΔP y reemplazar los valores de las demás variables.

En el punto 2 del apéndice 4 se presenta el correspondiente ejemplo de cálculo.

4.2.2.3- Velocidad límite del fluido:

Se obtiene por medio de la ecuación (10), previamente calculado el número de Reynolds, para determinar el régimen de flujo correspondiente.

En el punto 3 del Apéndice 4 se muestra un ejemplo de cálculo.

4.2.3- Caracterización de las partículas

4.2.3.1 - Esfericidad de las partículas:

La esfericidad de las partículas se determina a partir de su definición: “razón entre la superficie de una esfera que tiene el mismo volumen de la partícula y la superficie de la partícula”:

$$\Phi_p = \left(\frac{\text{Superficie esfera}}{\text{Superficie partícula}} \right) \quad \text{Ambas del mismo volumen} \quad (19)$$

4.2.3.2- Diámetro de partículas:

La determinación del diámetro medio de las partículas se realiza en forma directa, utilizando un pie de metro, midiendo el diámetro de 10 esferas extraídas como una muestra de la cantidad total, para luego calcular el promedio.

4.2.3.3- Densidad de las partículas:

Se pesa una masa de partículas (m) de 15.0258 g y se vierten en una probeta graduada con un volumen (V_i) de 15 ml de agua. Luego se lee el nuevo volumen alcanzado por el líquido (V_f), el que es de 21 ml.

El cálculo de la densidad de las partículas se realiza por medio de la siguiente ecuación:

$$\rho_p = \frac{m}{V_f - V_i} \quad (20)$$

4.2.3.4- Porosidad del lecho fijo:

La porosidad o fracción de huecos del lecho fijo se determina mediante la ecuación (18), donde se conoce el valor de la masa de partículas que se ha cargado a la columna de fluidización, m_p , que corresponde a 966,21 g y la altura que esta cantidad de partículas alcanza dentro de la columna, L_m , la que es de 10 cm de alto.

4.2.4- Puesta en marcha del equipo

El esquema del equipo de fluidización es el siguiente:

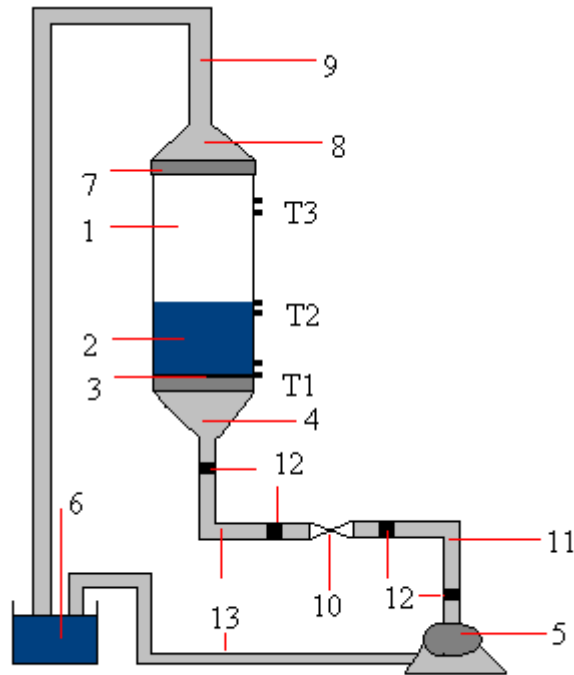


Figura 5: Esquema descriptivo del equipo de fluidización. 1- Columna de fluidización. 2- Soporte de lecho removible. 3- Lecho de partículas. 4- Etapa de entrada de fluido. 5- Bomba centrífuga. 6- Recipiente contenedor de agua. 7- Malla de retención de partículas. 8-Etapa de salida del fluido. 9-Manguera plástica. 10-Válvula de compuerta. 11-Tubos de PVC. 12- Uniones americanas. 13- Manguera para succión de fluido. T1-Toma de presión nº 1. T2-Toma de presión nº 2. T3-Toma de presión nº 3.

Para lograr el proceso de fluidización, se siguen los siguientes pasos:

1. Cargar el estanque con agua.
2. Conectar la bomba al sistema eléctrico.
3. Verificar que la válvula (10, figura 5) se encuentre cerrada.
4. Encender el interruptor de la bomba e inmediatamente abrir la válvula hasta alcanzar un caudal que permita la fluidización total de las partículas.
5. Luego de un tiempo suficiente como para observar que el lecho se agita vigorosamente, se cierra gradualmente la válvula hasta reducir el caudal a cero y se apaga el interruptor de la bomba.

La altura que alcanza el lecho una vez reducido el caudal se considera como la correspondiente al lecho fijo.

Ahora se tienen las condiciones óptimas para iniciar la verdadera fluidización.

Nuevamente se enciende la bomba y se abre la válvula (10) para obtener un mínimo de caudal circulante, en este punto se debe tener las válvulas V1 y V2 del manómetro abiertas y la válvula V3 cerrada, para medir la caída de presión solo en el lecho fijo (Figura 6). Una vez estabilizada la circulación del fluido se toma un volumen del agua recirculada al estanque con un vaso precipitado y se registra el tiempo necesario para

obtener dicha cantidad. Con estos dos datos se puede conocer el caudal circulante dentro de la columna.

Cada medición se repite 3 veces para obtener un caudal lo más representativo posible.

Luego, se lee la altura del lecho para determinar que aun no existe movimiento de partículas y la diferencia de alturas del manómetro.

Se sigue abriendo la válvula poco a poco, repitiendo los mismos pasos hasta que se observa movimiento de las partículas, momento en que se cierra la válvula V2 del manómetro y se abre la válvula V3, para obtener la caída de presión en el lecho fluidizado.

Se sigue obteniendo diferentes caudales, mediante la manipulación de la válvula, la respectiva altura que alcanza el lecho y se comprueba que la caída de presión se mantiene constante.

El proceso de fluidización termina cuando se observa que la fluidización perdió su carácter homogéneo, entonces se interrumpe la entrada de fluido y el funcionamiento de la bomba.

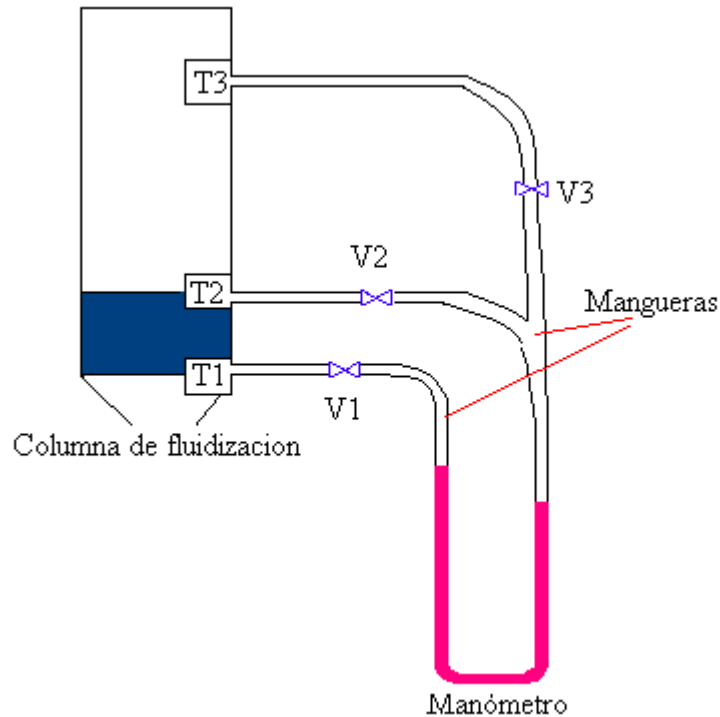


Figura 6: Esquema del sistema de medida de caída de presión.

4.2.5- Pruebas preliminares

Los resultados obtenidos de las pruebas preliminares corresponden a valores de diferencia de altura (en mm CCl_4), altura de lecho (m), volumen (l) y tiempo (s).

La diferencia de altura se transforma a caída de presión medida en N/m^2 mediante la siguiente ecuación, (Au 1995):

$$\Delta P = h * g * (\rho_p - \rho) * \frac{H}{H - C} \quad (21)$$

Esto de acuerdo a la figura 7:

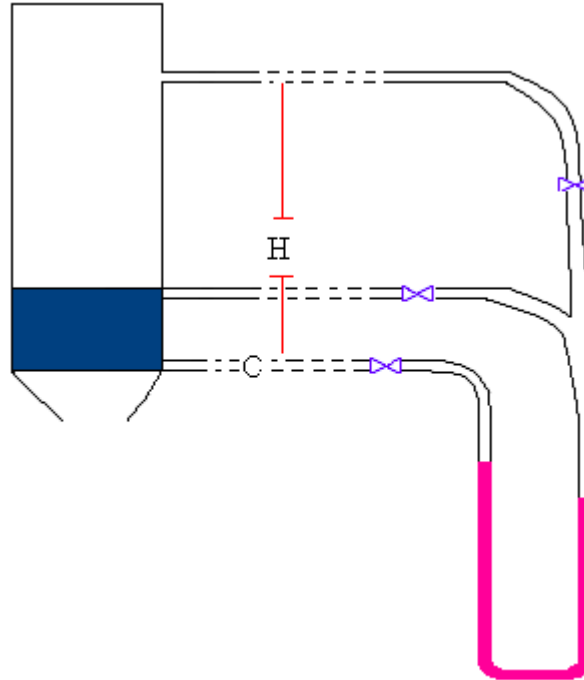


Figura 7: Diagrama de altura de las tomas manométricas.

Los datos de volumen y tiempo medidos son llevados a caudal por medio de:

$$Q = \frac{V}{t} \quad (23)$$

Este caudal es llevado a velocidad superficial mediante:

$$\bar{V}_0 = \frac{Q}{A} \quad (24)$$

Donde al área de la sección transversal se determina por:

$$A = \pi r^2 \quad (25)$$

Los parámetros considerados se miden en estado de lecho fijo y fluidizado, simultáneamente a diferentes caudales de agua, los que se representan en 2 gráficos: Velocidad Superficial frente a Caída de Presión y Velocidad Superficial frente a Altura de Lecho.

Los datos originales se encuentran en el apéndice 2 y los datos procesados en el apéndice 3.

Por medio de los gráficos se conoce la velocidad mínima de fluidización y la caída de presión en el punto de fluidización incipiente, las que ocurren cuando comienza a estabilizarse la presión y a moverse las partículas y que en los gráficos se representa por la intersección de los datos correspondientes a lecho fijo y a lecho fluidizado. Por esto es necesario determinar el punto en que se produce dicha intersección y para que ésta sea lo más representativa posible se promedian los 3 valores centrales de la intersección de cada gráfico.

4.2.4.1- Determinación experimental de la velocidad mínima de fluidización

El promedio de los tres valores centrales de la intersección de las rectas correspondientes a lecho fijo y lecho fluidizado del gráfico de velocidad superficial frente a la caída de presión, corresponde al valor de la velocidad mínima de fluidización.

También el promedio de los tres valores centrales de la intersección de las rectas correspondientes a lecho fijo y lecho fluidizado del gráfico de velocidad superficial frente a altura de lecho señala el valor de la velocidad mínima de fluidización siendo este el punto en que se produce el movimiento de las partículas.

4.2.4.2- Determinación experimental de la caída de presión en el punto de fluidización incipiente:

El promedio de los tres valores centrales de la intersección de las gráficas de caída de presión y velocidad superficial corresponde al punto en que se estabiliza la presión, entregando el valor de la caída de presión en el punto de fluidización incipiente, el que se compara con el obtenido teóricamente.

4.2.4.3- Determinación de la velocidad límite del fluido:

Los valores de velocidad superficial, junto a los de porosidad calculados por medio de la ecuación (4), se grafican obteniendo una recta que se extrapola hasta el valor de porosidad igual a 1, que corresponde a la velocidad límite del fluido, resultado que puede compararse con el obtenido teóricamente.

Todos los resultados obtenidos se comparan con los teóricos para así verificar que las condiciones en que se efectúa la fluidización son las óptimas.

4.2.4.4- Verificación de tipo de fluidización realizada:

Mediante el resultado de la ecuación (13) se determina el tipo de fluidización realizada.

4.2.4.5- Guía de trabajo:

La guía de trabajo que será desarrollada en laboratorio por los alumnos incluye dos partes: una teórica, donde se presenta la información, detallando sólo lo indispensable, para así incentivar al estudiante a su propia búsqueda de material bibliográfico y otra parte con actividades para desarrollar experimentalmente.

5. RESULTADOS Y DISCUSIÓN

5.1- Diseño y Construcción del Equipo de Fluidización

5.1.1- Descripción del equipo de fluidización

El equipo de fluidización fue concebido de acuerdo a los materiales existentes y a las especificaciones enviadas a los fabricantes de la columna de acrílico. A continuación se describe el equipo, cuyo esquema corresponde al presentado en la figura 5, del capítulo “Metodología”.

1- Columna de fluidización:

La columna usada es de acrílico, con piezas de vinilester en sus extremos, que permiten acoplarla a las etapas de entrada (4) y salida (8).

Sus dimensiones son: largo: 84 cm, diámetro: 10 cm. y espesor: 3 mm. Además cuenta con 3 terminales para medida de caída de presión (T1, T2 y T3).

2- Soporte de lecho removible:

El equipo enviado por el fabricante incluye un soporte de lecho removible, tipo malla de acero AISI A304 con marco, para diámetro de partículas hasta 300 μm .

3- Lecho de partículas:

El lecho que será fluidizado consiste en esferas de vidrio, cuyo diámetro promedio es de 3 mm.

Este lecho alcanza una altura de 10 cm. dentro de la columna, con una masa de 966,21 gramos.

4- Etapa de entrada de fluido:

Integrando la columna de fluidización, se acopla una etapa de entrada de fluido (4), mediante un sistema de perno mariposa, consistente en un cono de acero en la que se disponen esferas de vidrio de boro silicato de 6 a 10 mm de diámetro, que permiten una mejor distribución del líquido. Por el otro extremo va conectada a una manguera (13) mediante una unión americana (12), que permite la entrada del fluido.

5- Bomba centrífuga:

El fluido es impulsado por una bomba centrífuga de 1,5 HP, con un caudal máximo de 220 litros por minuto.

6- Recipiente contenedor de agua:

El recipiente que contiene el agua es plástico y tiene capacidad para 125 litros.

7- Malla de retención de partículas:

Malla metálica de 4 pulgadas de diámetro.

8-Etapa de salida del fluido:

Acoplada a la columna de fluidización (1) va una etapa de salida de fluido (8), mediante un sistema de perno mariposa y en su otro extremo va conectada a una manguera (9) que permite la salida del fluido. Esta etapa de salida consiste de un cono de hojalata galvanizada.

9-Manguera plástica:

Manguera para la descarga del agua, de 2 pulgadas de diámetro.

10-Válvula de compuerta:

Metálica, de 1,5 pulgadas de diámetro.

11-Tubos de PVC:

De 1,5 pulgadas de diámetro, para ingreso de agua a columna de fluidización.

12- Uniones americanas

13- Manguera para succión de fluido:

Plástica de 1,5 pulgadas de diámetro.

T1-Toma de presión n° 1

Ubicada inmediatamente sobre el soporte de lecho.

T2-Toma de presión n° 2

Ubicada a 10 cm. de altura. Inmediatamente sobre el nivel del lecho fijo?.

T3-Toma de presión n° 3

Ubicada a 78 cm. de altura. Que permitirá medir las presiones del sistema fluidizado.

La unión de las tomas de presión al manómetro de Tetracloruro de Carbono consiste en un sistema de mangueras y válvulas, descritos en la figura 4.

5.2- Resultados Teóricos

Los cálculos estimados mediante las ecuaciones respectivas, indican los siguientes resultados:

$$d_p = 3 \times 10^{-3} \text{ m}$$

$$\varepsilon_m = 0.51$$

$$\rho = 998.2 \text{ kg/m}^3$$

$$\rho_p = 2504 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu = 1.08 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$$

$$\Phi_p = 1$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

5.2.1- Velocidad mínima de fluidización:

5.2.1.a)- Ecuación de Ergun:

A partir de la ecuación (4), se obtiene:

$$150 \frac{\mu \bar{V}_{0m} (1 - \varepsilon_m)}{\Phi_p^2 d_p^2 \varepsilon_m^3} + 1,75 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{\Phi_p d_p \varepsilon_m^3} = g(\rho_p - \rho)$$

$$\bar{V}_{0m} = 0.051 \text{ m/s}$$

5.2.1.b)- Ecuación de Wen y Yu:

A partir de la ecuación (8) se obtiene.

$$24.5 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{d_p} + 1650 \frac{\mu \bar{V}_{0m}}{d_p^2} = g (\rho_p - \rho)$$

$$\bar{V}_{0m} = 0.032 \text{ m/s}$$

5.2.2.- Caída de presión en el punto de fluidización incipiente:

Se calcula con la ecuación (3):

$$\frac{\Delta P g_c}{L} = (1 - \varepsilon_m)(\rho_p - \rho) g$$

$$\Delta P = 73.71 \text{ kgf/m}^2 = 723.09 \text{ N/m}^2$$

5.2.3- Velocidad límite del fluido:

Se calcula con la ecuación (10):

$$V_t = \left[\frac{3.1 g (\rho_p - \rho) d_p}{\rho} \right]^{1/2}$$

$$V_t = 0.37 \text{ m/s}$$

Al calcular el valor del número de Reynolds mediante la ecuación (12) se verifica el régimen de flujo es turbulento:

$$Re = \frac{d_p \rho \bar{V}_0}{\mu}$$

$$Re = 1025.93$$

$$500 < Re < 200000$$

5.3- Caracterización del Sólido

5.3.1- Diámetro:

Por medio de la medición con el pie de metro se obtiene un promedio de 3×10^{-3} m.

5.3.2- Densidad:

Por medio de la ecuación (20) se obtiene:

$$\rho_p = \frac{m}{V_f - V_i}$$

$$\rho_p = 2504 \text{ kg/m}^3$$

5.3.3- Porosidad:

Por medio de la ecuación (18) se obtiene:

$$\varepsilon = 1 - \frac{m_p}{\pi r^2 L_m \rho}$$

$$\varepsilon_m = 0.51$$

5.4- Pruebas Preliminares:

De las pruebas preliminares se obtienen datos que se expresan mediante los siguientes gráficos:

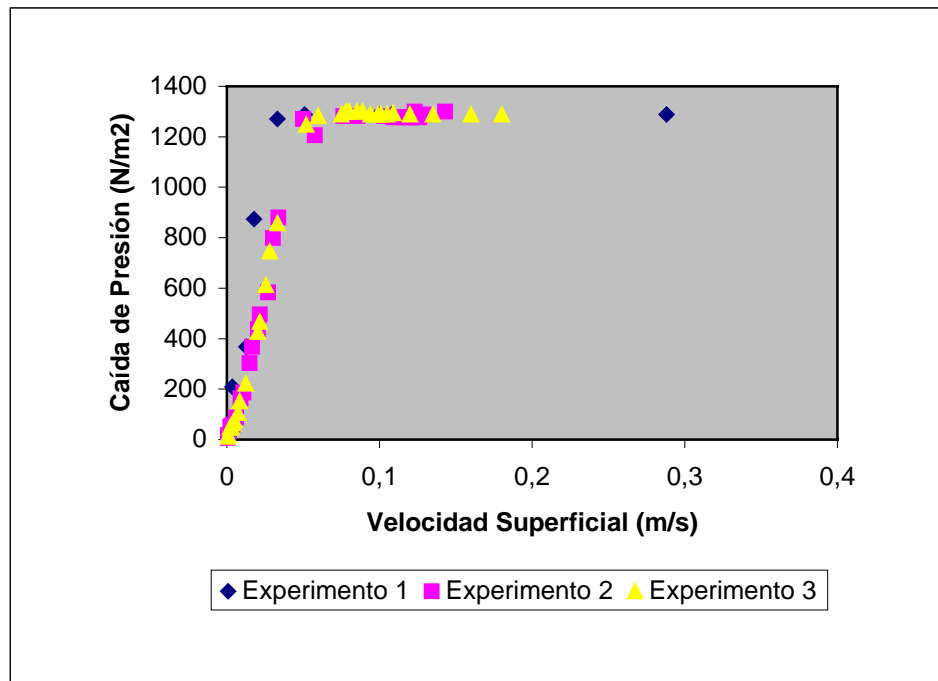


Figura 9: Gráfico Caída de presión v/s Velocidad superficial

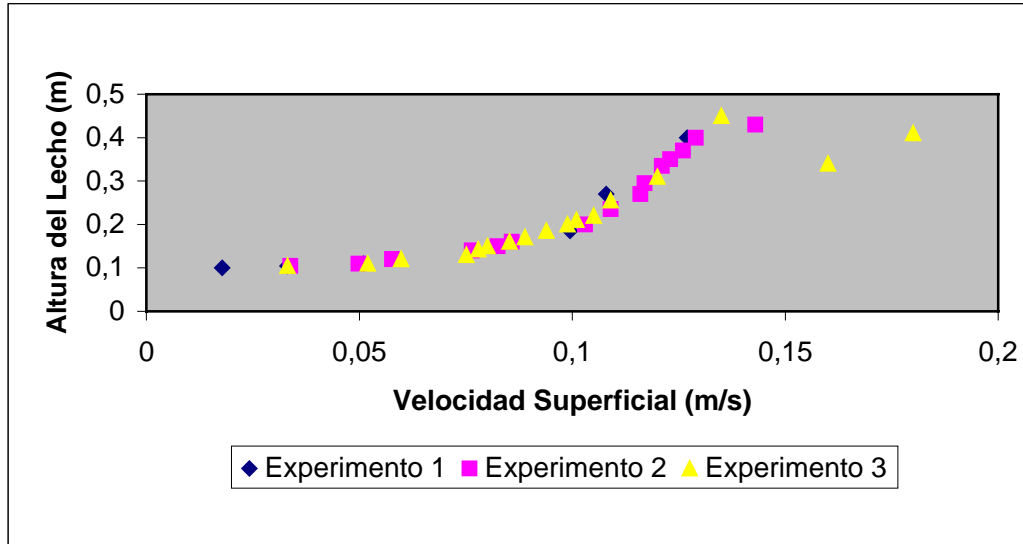


Figura 10: Gráfico Altura del Lecho v/s Velocidad Superficial.

Los 3 valores centrales que permiten determinar el punto de intersección entre los datos de lecho fijo y lecho fluidizado de cada gráfico son:

Tabla 2: Valores Centrales del Gráfico Caída de Presión v/s Velocidad Superficial.

Velocidad Superficial, V_0 (m/s)	Caída de Presión, ΔP (N/m ²)
5.10×10^{-2}	1288.22
4.98×10^{-2}	1270.73
5.20×10^{-2}	1247.41

Tabla 3: Valores centrales del Gráfico Altura del Lecho v/s Velocidad Superficial.

Velocidad Superficial, V_0 (m/s)	Altura del Lecho, L (m)
3.31×10^{-2}	0.105
3.38×10^{-2}	0.105
3.31×10^{-2}	0.105

5.4.1- Velocidad mínima de fluidización:

Mediante el promedio de los valores centrales de velocidad superficial del gráfico de la figura 9, correspondiente al punto donde comienza a estabilizarse la presión, el valor de la velocidad mínima de fluidización se de 5.1×10^{-2} m/s, la que comparada con los resultados teóricos se iguala al obtenido mediante la ecuación de Ergun, pero el valor predicho por la ecuación de Wen-Yu es menor, situación anticipada por otros autores, como Correa 1998, sin embargo se ignora si las velocidades superficiales registradas sean las reales ya que las medidas de caudal se hicieron de forma manual, por no contar con un medidor adecuado.

5.4.2- Caída de Presión en el punto de fluidización incipiente:

El promedio de los valores centrales de caída de presión del gráfico 1 indican que el valor de la caída de presión en el punto de fluidización incipiente es 1268.79 N/m^2 , valor superior al teórico.

En la figura 11 se comparan las curvas de caída de presión experimental y teórica y en ella se observa que los valores de caída de presión experimental son mayores a los valores teóricos durante toda la fluidización. Se cree que esta anomalía es particular de este trabajo experimental ya que investigadores como Correa (1982), Mendez (1998) y Peña (1993) han obtenido similitudes en sus resultados teórico y experimentales.

Los valores de caída de presión teórica se encuentran en el apéndice 5 y un ejemplo de cálculo se presenta en el punto 3 del apéndice 4.

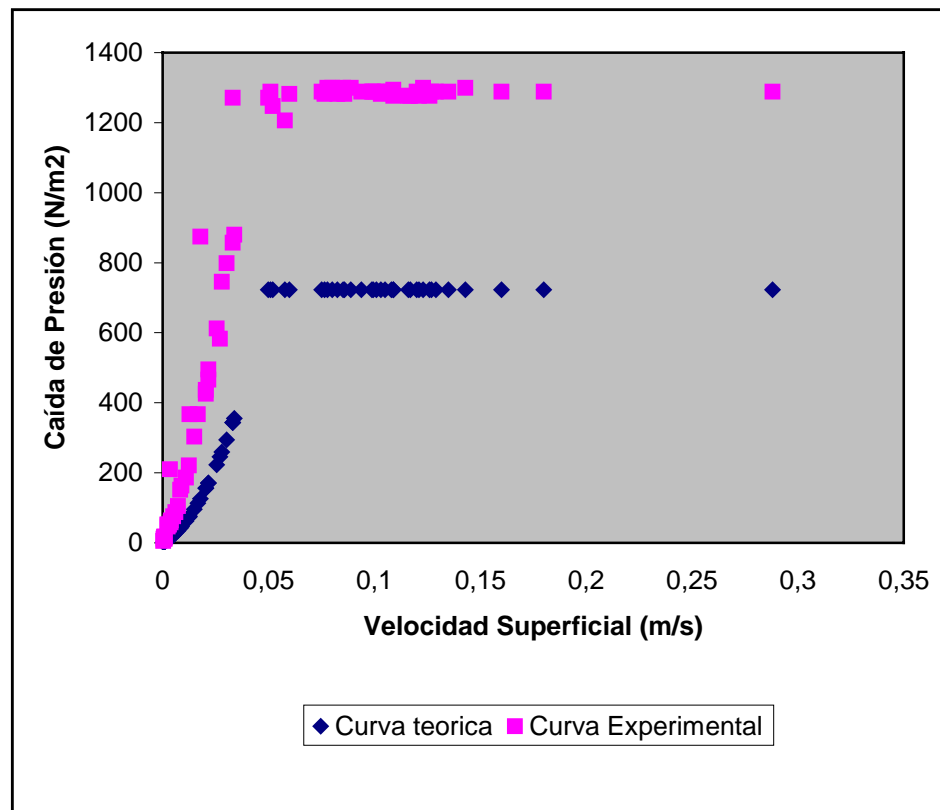


Figura 11: Gráfico comparación de valores de Caída de Presión Teórica y Experimental.

Al comparar los gráficos de las figuras 9 y 10 con las curvas de fluidización teóricas (figura 2), se observa que cualitativamente son similares, demostrando que efectivamente el fenómeno de fluidización que se ha llevado a cabo es adecuado, pero a diferencia de las curvas teóricas la caída de presión, luego del punto de fluidización incipiente, sigue aumentando, aunque en menor magnitud al aumento ocurrido durante el estado de lecho fijo lo que podría indicar que el equipo de fluidización usado no es el más adecuado, ya que al ser el diámetro de la columna demasiado grande provoca una fluidización despareja. Las tomas manométricas también son de gran diámetro lo que impide saber la exactitud del punto en que se hace la medición.

La fluidización llevada a cabo perdió su carácter homogéneo una vez alcanzada cierta altura (40 cm aprox.), donde se producía un caos en las partículas, las que ahora tenían movimientos oscilatorios provocando un alza repentina y drástica de la diferencia de presión.

5.4.3- Velocidad límite del fluido:

Al igual que todos los resultados experimentales, el valor de la velocidad límite obtenido de la extrapolación hasta el valor de porosidad igual a 1, de la gráfica de velocidad superficial y porosidad, para lecho fijo y fluidizado es mayor que el valor teórico, siendo de 1.55×10^{-1} m/s y 3.7×10^{-1} m/s, respectivamente.

La efectividad de la extrapolación hasta el valor de porosidad igual a 1 de la curva de velocidad superficial v/s porosidad fue demostrada por Peña en 1993, que usó una columna y esferas de similares características, pero con aire como fluido.

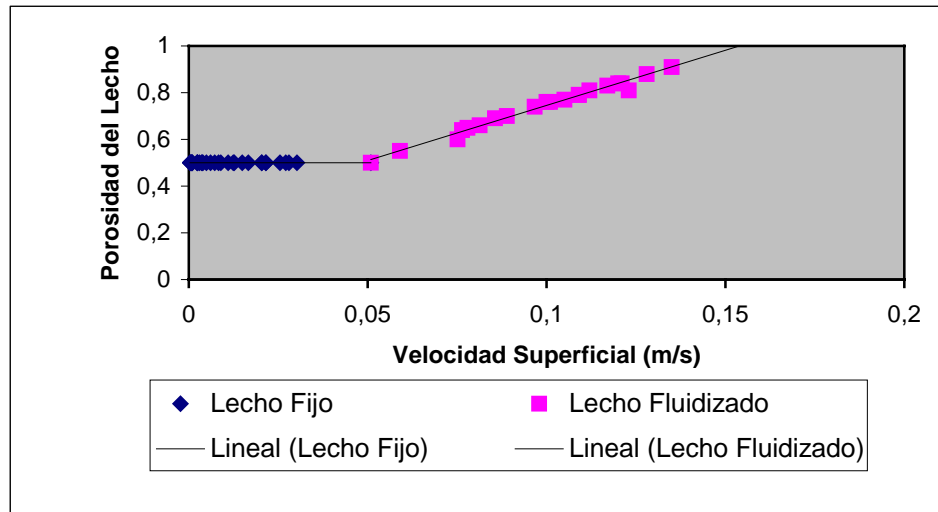


Figura 12: Gráfico Porosidad del Lecho v/s Velocidad Superficial.

Un ejemplo de calculo se halla en el punto 4 del apéndice 4.

5.4.4- Determinación del tipo de fluidización realizada:

(El desarrollo del calculo se encuentra en el punto 5 del apéndice 4).

i) Número de Froude, ecuación (15) :

$$(Fr)_m = \frac{\bar{V}_{0m}^2}{d_p g}$$

$$(Fr)_m = 8.85 \times 10^{-2}$$

ii) Número de Reynolds, ecuación (16):

$$(Re)_m = \frac{d_p \rho \bar{V}_0}{\mu}$$

$$(Re)_m = 141.41$$

iii) Reemplazando ambos valores en la ecuación (14)

$$(Fr)_m (Re)_m \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{L_m}{D} \right) < 100$$

$$18 < 100$$

Por lo tanto la fluidización ocurrida es de tipo particulada.

Este resultado se esperaba ya que la fluidización se efectuaría con partículas pequeñas y agua, las que siempre provocan una fluidización de tipo particulada, tal como se había mencionado en el capítulo: Fundamento Teórico.

5.5- Guía de Trabajo:

A continuación se presenta la guía de trabajo sugerida para el desarrollo del laboratorio de fluidización, la que se confeccionó de acuerdo a lo descrito en el capítulo “Metodología”.

SIMBOLOGIA

D : Diámetro de la columna de fluidización, (m).

d_p : Diámetro de las partículas, (m).

Fr : Número de Froude, (adimensional).

Fr_m : Número de Froude en condiciones de mínima fluidización, (adimensional).

Ga : Número de Galio, (adimensional).

g : Aceleración de gravedad, (m/s^2)

g_c : Factor de proporcionalidad a la ley de Newton, ($m\cdot kg/kg_f\cdot s^2$)

L : Altura del lecho fluidizado (m).

L_m : Altura del lecho fijo o del lecho en condiciones de mínima fluidización, (m).

\bar{V}_0 : Velocidad superficial del fluido, (m/s)

\bar{V}_{0m} : Velocidad mínima de fluidización, (m/s)

V_t : Velocidad límite o de arrastre del fluido, (m/s).

Re : Numero de Reynolds de las partículas, (adimensional).

Re_m : Número de Reynolds en condiciones de mínima fluidización, (adimensional).

ε : Porosidad del lecho fluidizado, (adimensional).

ε_m : Porosidad del lecho fijo o porosidad en el punto de fluidización incipiente, (adimensional).

ΔP : Caída de presión a través del lecho, (N/m^2).

μ : Viscosidad del agua, (/ms).

ρ : Densidad del agua, (kg/m^3).

ρ_p : Densidad de las partículas, (kg/m³).

Φ_p : Esfericidad de las partículas, (adimensional)

1- Fundamentos Teóricos

La fluidización es un sistema de contacto entre un sólido granular y un fluido, que convierte al lecho de partículas en una masa suspendida y expandida que posee muchas de las propiedades de un líquido.

Antes de comenzar la fluidización el lecho de partículas se encuentra en estado inmóvil, con una cierta *altura* L y *porosidad* (*fracción ocupada por los huecos*), ε , como lo muestra la figura 1, (a).

Considerando en este punto, la porosidad, ε , como la porosidad mínima, ε_m , la ecuación (2) es modificada a:

$$\frac{\Delta P g_c}{L} = (1 - \varepsilon_m)(\rho_p - \rho)g \quad (3)$$

Reemplazando $\frac{\Delta P g_c}{L}$ de la ecuación (3) en la ecuación (1) se obtiene:

$$150 \frac{\mu \bar{V}_{0m} (1 - \varepsilon_m)}{\Phi_p^2 d_p^2 \varepsilon_m^3} + 1,75 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{\Phi_p d_p \varepsilon_m^3} = g(\rho_p - \rho) \quad (4)$$

Esta ecuación se aplica al punto de fluidización incipiente, con el fin de conocer el valor de la velocidad mínima de fluidización.

Al aumentar la velocidad superficial más allá de la mínima de fluidización, las partículas se separan entre ellas, moviéndose en el lecho, representado por (b) en la figura 1. Ahora la caída de presión permanece constante, pero la altura del lecho aumenta al aumentar el flujo de fluido, tal como lo indica la figura 2.

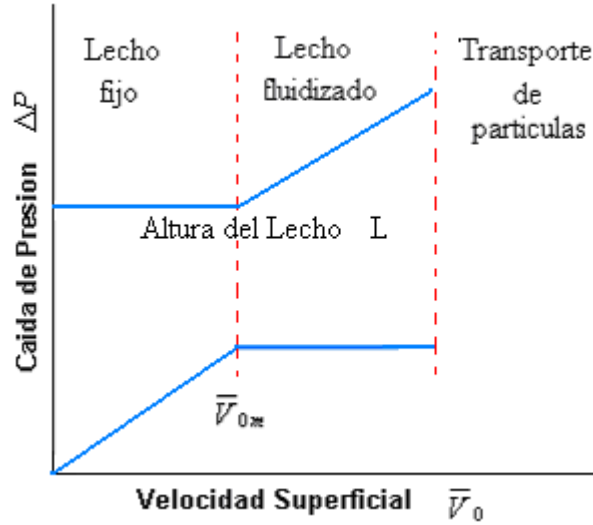


Figura 2: Caída de presión y altura del lecho frente a velocidad superficial para un lecho de sólidos.

La fluidización de sólidos termina cuando la velocidad del fluido sobrepasa la *velocidad límite* V_b , provocando el arrastre de las partículas, observado en (c) de la figura 1.

Esta velocidad puede estimarse para los diferentes regímenes de flujo:

$$\text{Flujo laminar: } V_t = \frac{g(\rho_s - \rho)d_p^2}{18\mu} \quad \text{Re} < 0.4 \quad (5)$$

$$\text{Flujo turbulento: } V_t = \left[\frac{3.1g(\rho_s - \rho)d_p}{\rho} \right]^{1/2} \quad 500 < \text{Re} < 200000 \quad (6)$$

$$\text{Flujo de Transición: } V_t = \left[\frac{4(\rho_s - \rho)^2 g^2}{225\rho\mu} \right]^{1/3} d_p \quad 0.4 < \text{Re} < 500 \quad (7)$$

1.1- Tipos de fluidización

Dependiendo del fluido usado y de la diferencia de densidades entre éste y el sólido, se distinguen 2 tipos de fluidización, la *particulada u homogénea* y la *de burbujeo o heterogénea*, siendo el criterio adecuado para decidir entre una y otra el producto de cuatro números adimensionales

$$\text{Fluidización particulada: } (Fr)_m (Re)_m \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{L_m}{D} \right) < 100 \quad (8)$$

$$\text{Fluidización de burbujeo: } (Fr)_m (Re)_m \left(\frac{\rho_s - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{L_m}{D} \right) > 100 \quad (9)$$

$$\text{Número de Froude: } Fr = \frac{\bar{V}_0^2}{d_p g} \quad (10)$$

2- Descripción y funcionamiento del equipo de fluidización

El esquema del equipo de fluidización es el siguiente:

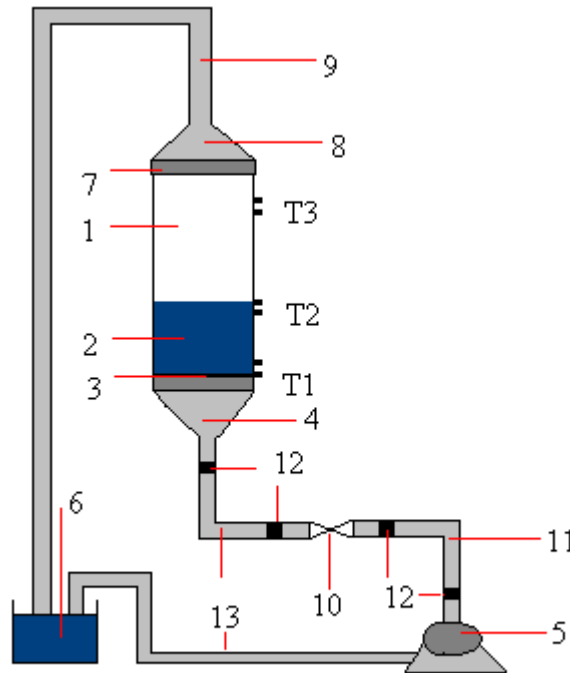


Figura 3: Esquema descriptivo del equipo de fluidización. 1) Columna de fluidización; 2) Soporte de lecho removible; 3) Lecho de partículas; 4) Etapa de entrada de fluido; 5) Bomba centrífuga; 6) Recipiente contenedor de agua; 7) Malla de retención de partículas; 8) Etapa de salida del fluido; 9) Manguera plástica; 10) Válvula de compuerta; 11) Tubos de PVC; 12) Uniones americanas; 13) Manguera para succión de fluido; T1) Toma de presión nº 1; T2) Toma de presión nº 2; T3) Toma de presión nº 3

La caída de presión se mide mediante un manómetro de tetracloruro de carbono, ya que este permite una buena de la caída de presión.

Para realizar medidas de toma de presión en estado de lecho fijo, esto es entre la toma 1 (T1) y la toma 2 (T2) deben mantenerse abiertas las válvulas V1 y V2 y cerrada la

válvula V3. Y para medir la caída de presión en estado fluidizado se cierra la válvula V2 y se abre la válvula V3, realizando la medición entre las tomas 1 y 3, de acuerdo a la figura 4.

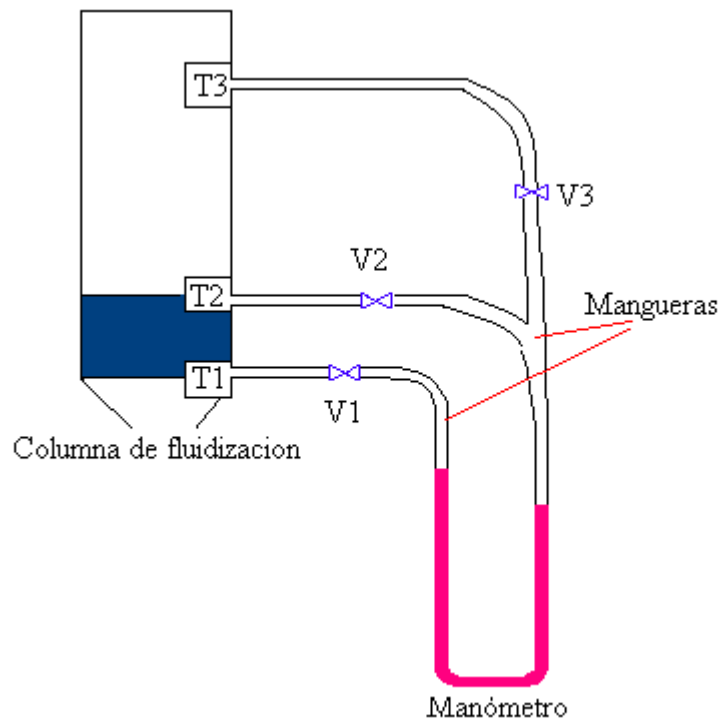


Figura 4: Esquema del sistema de medida de caída de presión.

3- Actividades experimentales

Para lograr el proceso de fluidización se siguen los siguientes pasos:

1. Cargar el estanque con agua.
2. Conectar la bomba al sistema eléctrico.
3. Verificar que la válvula se encuentre cerrada.
4. Encender el interruptor de la bomba e inmediatamente abrir la válvula hasta alcanzar un caudal que permita la fluidización total de las partículas.
5. Luego de un tiempo suficiente como para observar que el lecho se agita vigorosamente, se cierra gradualmente la válvula hasta reducir el caudal a cero y se apaga el interruptor de la bomba.

La altura que alcanza el lecho una vez reducido el caudal se considera como la correspondiente al lecho fijo.

Ahora se tienen las condiciones óptimas para iniciar la verdadera fluidización.

Nuevamente se hace funcionar la bomba y se abre la válvula lo suficiente para que circule agua a través de la columna en un mínimo caudal, en este punto se debe tener las válvulas V1 y V2 del manómetro abiertas y la válvula V3 cerrada, para medir la caída de presión solo en el lecho fijo. Una vez estabilizada la circulación del fluido se toma un volumen del agua recirculada al estanque y se registra el tiempo necesario para obtener dicha cantidad. Con estos dos datos se conoce el caudal circulante dentro de la columna. Se recomienda repetir la medición para obtener un caudal lo más representativo posible.

Luego, se lee la altura del lecho para determinar que aun no existe movimiento de partículas y la diferencia de alturas del manómetro.

Se sigue abriendo la válvula poco a poco, repitiendo los mismos pasos hasta que se observa movimiento de las partículas, momento en que se cierra la válvula V2 del manómetro y se abre la válvula V3, para obtener la caída de presión en el lecho fluidizado.

Se sigue obteniendo diferentes caudales, mediante la manipulación de la válvula, la respectiva altura que alcanza el lecho y se comprueba que la caída de presión se mantiene constante.

El proceso de fluidización termina cuando se observa que la fluidización perdió su carácter homogéneo, entonces se interrumpe la entrada de fluido y el funcionamiento de la bomba.

Con los valores obtenidos de volumen y tiempo se conoce el caudal circulante y este permite conocer la velocidad superficial en cada punto medido.

2.4- Tratamiento de datos:

Los resultados obtenidos experimentalmente se comparan con los valores teóricos, con el fin de conocer las características de la fluidización realizada.

2.4.1- Determinación experimental de la velocidad mínima de fluidización:

Se grafican los valores de caída de presión frente a velocidad superficial y altura. Los puntos donde se interceptan los valores de lecho fijo y lecho fluidizado corresponden al punto de fluidización incipiente.

2.4.2- Determinación experimental de la caída de presión en el punto de fluidización incipiente:

La intersección de los valores para lecho fijo y lecho fluidizado entregan también el valor de la caída de presión en el punto de fluidización incipiente.

2.4.3- Determinación de la velocidad límite del fluido:

Los valores de velocidad superficial medidos junto a los de porosidad calculados por medio de ecuaciones se grafican obteniendo una recta que se extrapola hasta el valor de porosidad igual a 1, que corresponde a la velocidad límite del fluido.

2.4.4- Determinación del tipo de fluidización realizada:

Mediante las ecuaciones respectivas se determina el tipo de fluidización realizada.

Bibliografía

1. Foust, A. 1998. “Principios de operaciones unitarias”. Compañía editorial Continental, México, México.
2. Mc Cabe, W. L. 1991, “Operaciones básicas de la ingeniería química”. Mc Graw-Hill, Madrid, España
3. Perry, R. 1992, “Manual del ingeniero químico”, Mc Graw-Hill, México, México.

4. CONCLUSIONES

- La columna diseñada y los materiales fluidizados permiten obtener una fluidización de tipo particulada.
- Las condiciones en que se realiza la fluidización permiten aplicar la ecuación de Ergun, concordando el valor experimental de velocidad mínima de fluidización con el obtenido mediante dicha ecuación.
- Se comprueba lo anticipado por otros autores sobre la ecuación propuesta por Wen y Yu, que predice valores de velocidad mínima menores a los experimentales, aunque del mismo orden.
- Las ecuaciones experimentales para cálculos de caída de presión en lecho fijo y fluidizado no entregan valores exactos, solo estimaciones de referencias. Al no coincidir la velocidad a la que se estabiliza la presión y a la que se produce el movimiento de las partículas se puede creer que la verdadera velocidad mínima de fluidización corresponde al promedio de ambas.
- Un diámetro grande de la columna de fluidización impide tener una operación totalmente homogénea, provocando una pérdida de carga exagerada dentro del lecho.

- Las tomas manométricas de gran diámetro impiden conocer el punto exacto de medida de presión, pudiendo llevar a resultados erróneos.

BIBLIOGRAFÍA

1. Albella, A. “Petroleo y gas” <http://tq.educ.ar/tq03028/html/cra.htm>. 2005.
2. Arfluid, S. L. “Lecho fluidizado de arena”. www.arfluid.com/lecho/index.htm. 2005.
3. Au D., M. C., 1995, “Informe de laboratorio: Fluidización”, Universidad de Concepción, concepción, Chile.
4. Brown, G. 1969, “Operaciones básicas de la Ingeniería Química”. New York, EE.UU.
5. Correa M., C. 1982. “Diseño, construcción y ensayo de una instalación experimental para congelar alimento en Lecho Fluidizado”, Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
6. De la Fuente, S. “Desarrollo de un Sistema de Secado mediante Lecho Fluido Asistido por Ultrasonidos de Potencia” www.ai.csic.es/sea/revista/VOL36-12/04.pdf. 2004.
7. Foust, A. 1998. “Principios de operaciones unitarias”. Compañía editorial Continental, México, México

8. Mc Cabe, W. L. 1991, "Operaciones básicas de la ingeniería química". Mc Graw-Hill, Madrid, España.
9. Mendez C., C. 1998. "Gasificador de aserrín en lecho Fluidizado". Universidad de Concepción. Concepción, Chile
10. Peña A., M. A. 1993, "Diseño de una columna de lecho fluidizado". Universidad de Concepción. Concepción, Chile.
11. Perry, R. 1992, "Manual del ingeniero químico", Mc Graw-Hill, México, México.
12. Martinez S. M. A., "Planta de incineración en lecho fluidizado para tratamiento
13. de recortes de piel curtida".
14. www.icp.csis.es/cyted/Monografias/Monografias2001/C1-323.pdf. 2001.
15. Unvirtual, "Energía química"
www.virtual.unal.edu.co/cursos/sedes/arauca/87061/docs_cursos/C11_L1.htm.2004.
16. Reyes S., A."Innovaciones en un secador de lecho fluidizado"
17. www.conicyt.cl/bases/fondecyt/proyectos/01/2001/1010700.html. 2004.

18. http://www.continentalindustrie.com/html_ver/imgs/applications/four%20a%20lit%20fluidise%20FR.jpg. 2005.

APENDICES

APENDICE 1

Estimaciones de velocidad mínima de fluidización y velocidad límite para partículas de 1, 3 y 5 mm de diámetro.

$$\rho_{H_2O} = 998.2 \text{ kg/m}^3$$

$$*\rho \text{ esferas (1 mm)} = 2480 \text{ kg/m}^3$$

$$\mu_{H_2O} = 1.08 \times 10^{-3} \text{ kg/ms}$$

$$*\rho \text{ esferas (3 mm)} = 2504 \text{ kg/m}^3$$

$$g = 9.8 \text{ m/s}^2$$

$$*\rho \text{ esferas (5 mm)} = 2560 \text{ kg/m}^3$$

$$D = 0.1 \text{ m}$$

* valores experimentales, (Peña, 1993).

I- Cálculo de velocidad, porosidad y caudal en condiciones de mínima fluidización

1- Partículas de 1 mm

1.a)-Velocidad mínima de fluidización, con ecuación (8):

$$24.5 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{d_p} + 1650 \frac{\mu \bar{V}_{0m}}{d_p^2} = g (\rho_p - \rho)$$

$$24.5 \frac{998.2 * \bar{V}_{0m}^2}{1 \times 10^{-3}} + 1650 \frac{3.89 * \bar{V}_{0m}}{(1 \times 10^{-3})^2} = 9.8 (2480 - 998.2)$$

$\bar{V}_{0m} = 7.39 \times 10^{-3}$ m/s Reemplazando el valor de la velocidad calculada en la ecuación

(12):

$$Re_m = \frac{d_p \rho \bar{V}_0}{\mu}$$

$$Re_m = \frac{1 \times 10^{-3} * 998.2 * 7.39 \times 10^{-3}}{1.08 \times 10^{-3}}$$

$$Re_m = 6.83$$

1. b)- Porosidad en mínima fluidización, con ecuación (4):

$$150 \frac{\mu \bar{V}_{0m} (1 - \varepsilon_m)}{\Phi_p^2 d_p^2 \varepsilon_m^3} + 1,75 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{\Phi_p d_p \varepsilon_m^3} = g(\rho_p - \rho)$$

$$\varepsilon^3 + 150 \frac{\mu * \bar{V}_{0m} * \varepsilon}{d_p^2 * g * (\rho_p - \rho)} - 150 \frac{\mu * \bar{V}_0}{d_p^2 * g * (\rho_p - \rho)} - 1,75 \frac{g * \bar{V}_0^2}{d_p * g * (\rho_p - \rho)} = 0$$

$$\varepsilon^3 + 150 * \frac{1.08 \times 10^{-3} * 7.39 \times 10^{-3} * \varepsilon}{(1 \times 10^{-3})^2 * 9.8 * (2480 - 998.2)} - 150 \frac{1.08 \times 10^{-3} * 7.39 \times 10^{-3}}{(1 \times 10^{-3})^2 * 9.8 * (2504 - 998.2)} -$$

$$1,75 \frac{9.8 * (7.39 \times 10^{-3})^2}{1 \times 10^{-3} * 9.8 * (2480 - 998.2)} = 0$$

$$\varepsilon = 0.37$$

1.c)- Caudal en condiciones de mínima fluidización con ecuación (23):

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q_m = 7.39 \times 10^{-3} * \pi * (0.05)^2$$

$$Q_m = 5.83 \times 10^{-5} \text{ m}^3/\text{s}$$

2)- Partículas de 3mm:

2.a)- Velocidad mínima de fluidización con ecuación (8):

$$24.5 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{d_p} + 1650 \frac{\mu \bar{V}_{0m}}{d_p^2} = g (\rho_p - \rho)$$

$$24.5 \frac{998.2 * \bar{V}_{0m}^2}{3 \times 10^{-3}} + 1650 \frac{1.08 \times 10^{-3} * \bar{V}_{0m}}{(3 \times 10^{-3})^2} = 9.8 * (2504 - 998.2)$$

$$\bar{V}_{0m} = 3.21 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

Reemplazando el valor de la velocidad calculada en la ecuación (12):

$$Re_m = \frac{d_p \rho \bar{V}_0}{\mu}$$

$$Re_m = \frac{3 \times 10^{-3} * 998.2 * 3.21 \times 10^{-2}}{3.89}$$

$$Re_m = 88.95$$

2. b)- Porosidad en mínima fluidización, con ecuación (4):

$$150 \frac{\mu \bar{V}_{0m} (1 - \varepsilon_m)}{\Phi_p^2 d_p^2 \varepsilon_m^3} + 1.75 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{\Phi_p d_p \varepsilon_m^3} = g (\rho_p - \rho)$$

$$\varepsilon^3 + 150 \frac{\mu * \bar{V}_{0m} * \varepsilon}{d_p^2 * g * (\rho_p - \rho)} - 150 \frac{\mu * \bar{V}_0}{d_p^2 * g * (\rho_p - \rho)} - 1.75 \frac{g * \bar{V}_0^2}{d_p * g * (\rho_p - \rho)} = 0$$

$$\varepsilon^3 + 150 * \frac{1.08 \times 10^{-3} * 3.21 \times 10^{-2} * \varepsilon}{(3 \times 10^{-3})^2 * 9.8 * (2504 - 998.2)} - 150 \frac{1.08 \times 10^{-3} * 3.21 \times 10^{-2}}{(3 \times 10^{-3})^2 * 9.8 * (2504 - 998.2)} -$$

$$1.75 \frac{9.8 * (3.21 \times 10^{-2})^2}{3 \times 10^{-3} * 9.8 * (2504 - 998.2)} = 0$$

$$\varepsilon = 0.30$$

2.c)- Caudal en condiciones de mínima fluidización con ecuación (23):

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q_m = 3.21 \times 10^{-2} * \pi * (0.05)^2$$

$$Q_m = 253 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

3)- Partículas de 5 mm:

3.a)- Velocidad mínima de fluidización con ecuación (8):

$$24.5 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{d_p} + 1650 \frac{\mu \bar{V}_{0m}}{d_p^2} = g (\rho_p - \rho)$$

$$24.5 \frac{998.2 * \bar{V}_{0m}^2}{5 \times 10^{-3}} + 1650 \frac{1.08 \times 10^{-3} * \bar{V}_{0m}}{(5 \times 10^{-3})^2} = 9.8 (2560 - 998.2)$$

$$\bar{V}_{0m} = 6.41 \times 10^{-2} \text{ m/s}$$

Reemplazando el valor de la velocidad calculada en la ecuación (12):

$$Re_m = \frac{d_p \rho \bar{V}_0}{\mu}$$

$$Re_m = \frac{5 \times 10^{-3} * 998.2 * 6.41 \times 10^{-2}}{1.08 \times 10^{-3}}$$

$$Re_m = 296.23$$

3. b)- Porosidad en mínima fluidización, con ecuación (4):

$$150 \frac{\mu \bar{V}_{0m} (1 - \varepsilon_m)}{\Phi_p^2 d_p^2 \varepsilon_m^3} + 1,75 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{\Phi_p d_p \varepsilon_m^3} = g(\rho_p - \rho)$$

$$\varepsilon^3 + 150 \frac{\mu^* \bar{V}_{0m}^* \varepsilon}{d_p^2 * g^* (\rho_p - \rho)} - 150 \frac{\mu^* \bar{V}_0}{d_p^2 * g^* (\rho_p - \rho)} - 1,75 \frac{g^* \bar{V}_0^2}{d_p * g^* (\rho_p - \rho)} = 0$$

$$\varepsilon^3 + 150 * \frac{1,08 \times 10^{-3} * 6,41 \times 10^{-2} * \varepsilon}{(5 \times 10^{-3})^2 * 9,8 * (2560 - 998,2)} - 150 \frac{1,08 \times 10^{-3} * 6,41 \times 10^{-2}}{(5 \times 10^{-3})^2 * 9,8 * (2560 - 998,2)} - 1,75 \frac{9,8 * (6,41 \times 10^{-2})^2}{5 \times 10^{-3} * 9,8 * (2560 - 998,2)} = 0$$

$$\varepsilon = 27$$

3.c)- Caudal en condiciones de mínima fluidización con ecuación (23)

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q_m = 6,41 \times 10^{-2} * \pi * (0,05)^2$$

$$Q_m = 5,03 \times 10^{-4} \text{ m}^3/\text{s}$$

II- Cálculo de altura que alcanza el lecho de partículas en estado de fluidización con ecuación (17), cuando:

- 1) Fluidización de 90%, por lo tanto porosidad en estado de fluidización , $\varepsilon_m = 0.9$.
- 2) Lecho fijo de partículas, $L = 10$ cm.
- 3) Lecho fijo de partículas, $L = 20$ cm.
- 4) Porosidad mínima de fluidización calculada igual a porosidad en estado fijo, $\varepsilon_m = \varepsilon$.

1) Partículas de 1 mm:

Cuando $L_m = 10$ cm:

$$L = \frac{(1-0.37)}{(1-0.9)} \times 0.1$$

$$L = 0.63 \text{ m}$$

Cuando $L_m = 20$ cm:

$$1.b) L = \frac{(1-0.37)}{(1-0.9)} * 0,2$$

$$L = 1.26 \text{ m}$$

2) Partículas de 3 mm:

Cuando $L_m = 10$ cm:

$$L = \frac{(1-0.3)}{(1-0.9)} * 0.1$$

$$L = 0.7 \text{ m}$$

Cuando $L_m = 20 \text{ cm}$:

$$L = \frac{(1-0.3)}{(1-0.9)} * 0.2$$

$$L = 1,4 \text{ m}$$

3) Partículas de 5 mm:

Cuando $L_m = 10 \text{ cm}$:

$$L = \frac{(1-0.27)}{(1-0.9)} * 0.1$$

$$L = 0.73 \text{ m}$$

Cuando $L_m = 20 \text{ cm}$:

$$L = \frac{(1-0.27)}{(1-0.9)} * 0.2$$

$$L = 0.46 \text{ m}$$

III- Verificación de cumplimiento de fluidización homogénea con ecuación (13):

1)-Partículas de 1 mm y $L_{0m} = L = 10$ cm

$$(Fr)_m = \frac{(7.39 \times 10^{-3})^2}{1 \times 10^{-3} * 9.8}$$

$$(Fr)_m = 5.58 \times 10^{-3}$$

Al reemplazar en la ecuación:

$$(Fr)_m (Re)_m \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{L_m}{D} \right) < 100$$

$$5.58 \times 10^{-3} * 6.83 * \frac{(2480 - 998,2)(0.1)}{998.2} < 100$$

$$1.21 \times 10^{-3} < 100$$

Por lo tanto la fluidización que se produce es homogénea.

2)- Partículas de 5 mm y $L_{0M} = L = 20$ cm

$$(Fr)_m = \frac{\bar{V}_{0m}^2}{d_p g}$$

$$(Fr)_m = \frac{(6.41 \times 10^{-2})^2}{5 \times 10^{-3} * 9.8}$$

$$(Fr)_m = 8.39 \times 10^{-2}$$

Reemplazando en la ecuación:

$$(Fr)_m (Re)_m \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{L_m}{D} \right) < 100$$

$$2.10 \times 10^{-2} * 250.42 * \frac{(2560 - 998.2)(0.2)}{998.2 * 0.1} < 100$$

$$16.46 < 100$$

Por lo tanto la fluidización que se produce es homogénea.

III- Cálculo de velocidad y caudal en condiciones límites:

1)-Partículas de 1 mm:

1.a)- Velocidad límite, con ecuación (11):

$$V_t = \left[\frac{4(\rho_p - \rho)g^2}{225\rho\mu} \right]^{1/3} d_p$$

$$V_t = \left[\frac{4(2480 - 998.2)^2 * 9.8^2}{225 * 998.2 * 1.08 \times 10^{-3}} \right]^{1/3} 1 \times 10^{-3} \quad 0.4 < Re < 500$$

$$V_t = 1.51 \times 10^{-1} \text{ m/s}$$

Reemplazando el valor de la velocidad calculada en la ecuación (12):

$$Re = \frac{d_p \rho \bar{V}_t}{\mu}$$

$$Re = \frac{1 \times 10^{-3} * 998.2 * 1.51 \times 10^{-1}}{1.08 \times 10^{-3}}$$

$$Re = 139.56$$

1.b)- Caudal en condiciones límites:

$$Q_t = V_t * \pi * r^2$$

$$Q_t = 1.51 \times 10^{-1} * \pi * (0.05)^2$$

$$Q_t = 1.19 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

2)-Partículas de 3 mm, con ecuación (10):

$$V_t = \left[\frac{3.1 g (\rho_p - \rho) d_p}{\rho} \right]^{1/2}$$

$$V_t = \left[\frac{3.1 * 9.8 * (2504 - 998.2) 3 \times 10^{-3}}{998.2} \right]^{1/2}$$

$$500 < \text{Re} < 200000$$

$$V_t = 3.71 \times 10^{-1} \text{ m/s}$$

Reemplazando el valor de la velocidad calculada en la ecuación (12):

$$\text{Re} = \frac{d_p \rho \bar{V}_t}{\mu}$$

$$\text{Re} = \frac{3 \times 10^{-3} * 998.2 * 3.71 \times 10^{-1}}{1.08 \times 10^{-3}}$$

$$\text{Re} = 1027.56$$

2.b)- Caudal en condiciones límites:

$$Q_t = V_t * \pi * r^2$$

$$Q_t = 3.71 \times 10^{-1} * \pi * (0.05)^2$$

$$Q_t = 2.91 \times 10^{-3} \text{ m}^3/\text{s}$$

3)-Partículas de 5 mm, con ecuación (10):

$$V_t = \left[\frac{3.1 g (\rho_p - \rho) d_p}{\rho} \right]^{1/2}$$

$$V_t = \left[\frac{3.1 \times 9.8 * (2560 - 998.2) * 5 \times 10^{-3}}{998.2} \right]^{1/2} \quad 500 < \text{Re} < 200000$$

$$V_t = 4.88 \times 10^{-1} \text{ m/s}$$

Reemplazando el valor de la velocidad calculada en la ecuación (12):

$$\text{Re} = \frac{d_p \rho \bar{V}_t}{\mu}$$

$$\text{Re} = \frac{5 \times 10^{-3} * 998.2 * 4.88 \times 10^{-1}}{1.08 \times 10^{-3}}$$

$$\text{Re} = 2255.19$$

3.b)- Caudal en condiciones límites:

$$Q_t = V_t * \pi * r^2$$

$$Q_t = 4.88 \times 10^{-1} * \pi * (0.05)^2$$

$$Q_t = 3.83 \times 10^{-3}$$

APÉNDICE 2

Resultados obtenidos en laboratorio.

Experimento 1:

Medición (n°)	Volumen (l)	Tiempo (s)	Caudal (l/s)	Altura Lecho (m)	Caída de Presión (mmCCl ₄)
1	0.049	9.6	5.10×10^{-3}	0.1	2
	0.044	9.53	4.62×10^{-3}	0.1	2
	0.043	9.34	4.60×10^{-3}	0.1	2
2	0.080	9.47	8.45×10^{-3}	0.1	2
	0.076	9.69	7.84×10^{-3}	0.1	2
	0.069	9.50	7.26×10^{-3}	0.1	2
3	0.150	5.44	2.76×10^{-2}	0.1	26
	0.155	5.41	2.87×10^{-2}	0.1	26
	0.147	5.41	2.72×10^{-2}	0.1	26
4	0.294	2.97	9.90×10^{-2}	0.1	63
	0.380	3.45	1.10×10^{-2}	0.1	63
	0.237	2.63	9.01×10^{-2}	0.1	63
5	0.328	2.35	1.40×10^{-1}	0.1	150
	0.327	2.31	1.42×10^{-1}	0.1	150
	0.310	2.25	1.38×10^{-1}	0.1	150
6	0.445	1.75	2.54×10^{-1}	0.105	207
	0.400	1.57	2.55×10^{-1}	0.105	207
	0.458	1.69	2.71×10^{-1}	0.105	207
7	0.549	1.37	4.01×10^{-1}	0.110	221
	0.617	1.50	4.11×10^{-1}	0.110	221
	0.465	1.19	3.91×10^{-1}	0.110	221
8	1.189	1.49	7.98×10^{-1}	0.185	221
	1.077	1.41	7.64×10^{-1}	0.185	221
	1.160	1.48	7.84×10^{-1}	0.185	221
9	1.363	1.56	8.74×10^{-1}	0.27	221
	1.300	1.59	8.18×10^{-1}	0.27	221
	1.246	1.47	8.48×10^{-1}	0.27	221

10	1.422	1.43	9.94×10^{-1}	0.40	221
	1.732	1.73	1.00	0.40	221
	1.505	1.51	9.97×10^{-1}	0.40	221
11	2.094	0.97	2.16	0.63	221
	1.679	0.75	2.24	0.63	221
	1.467	0.72	2.38	0.63	221

Experimento 2:

Medición n°	Volumen (l)	Tiempo (s)	Caudal (l/s)	Altura Lecho (m)	Caída de Presión (mmCCl ₄)
1	0.005	2.28	2.19×10^{-3}	0.1	1
	0.007	2.47	2.83×10^{-3}	0.1	1
	0.006	2.38	2.52×10^{-3}	0.1	1
2	0.022	3.19	6.89×10^{-3}	0.1	3
	0.021	3.03	6.93×10^{-3}	0.1	3
	0.021	3.04	6.91×10^{-3}	0.1	3
3	0.057	3.00	1.90×10^{-2}	0.1	9
	0.058	3.34	1.74×10^{-2}	0.1	9
	0.059	3.23	1.83×10^{-2}	0.1	9
4	0.055	1.88	2.93×10^{-2}	0.1	10
	0.067	2.25	2.98×10^{-2}	0.1	10
	0.059	1.99	2.96×10^{-2}	0.1	10
5	0.114	2.35	4.70×10^{-2}	0.1	15
	0.071	1.31	4.90×10^{-2}	0.1	15
6	0.063	0.9	7.00×10^{-2}	0.1	28
	0.084	1.19	7.06×10^{-2}	0.1	28
7	0.074	0.75	9.87×10^{-2}	0.1	32
	0.095	1.25	7.60×10^{-2}	0.1	32
	0.089	1.06	8.39×10^{-2}	0.1	32
8	0.112	0.91	1.23×10^{-1}	0.1	52
	0.075	0.65	1.15×10^{-1}	0.1	52
	0.096	0.84	1.14×10^{-1}	0.1	52
9	0.173	1.27	1.36×10^{-1}	0.1	63
	0.136	1.04	1.31×10^{-1}	0.1	63
	0.129	1.05	1.23×10^{-1}	0.1	63
10	0.157	1.00	1.57×10^{-1}	0.1	75
	0.183	1.09	1.68×10^{-1}	0.1	75
	0.254	1.69	1.50×10^{-1}	0.1	75

11	0.190	1.12	1.69×10^{-1}	0.1	85
	0.277	1.60	1.73×10^{-1}	0.1	85
	0.185	1.10	1.68×10^{-1}	0.1	85
12	0.180	0.80	2.25×10^{-1}	0.1	100
	0.235	1.10	2.14×10^{-1}	0.1	100
	0.225	1.13	1.99×10^{-1}	0.1	100
13	0.178	0.75	2.37×10^{-1}	0.1	137
	0.207	0.85	2.44×10^{-1}	0.1	137
	0.148	0.64	2.31×10^{-1}	0.1	137
14	0.174	0.63	2.76×10^{-1}	0.105	151
	0.154	0.56	2.75×10^{-1}	0.105	151
	0.276	1.12	2.46×10^{-1}	0.105	151
15	0.240	0.53	4.53×10^{-1}	0.11	218
	0.226	0.63	3.59×10^{-1}	0.11	218
	0.282	0.78	3.62×10^{-1}	0.11	218
16	0.282	0.75	3.76×10^{-1}	0.12	207
	0.320	0.59	5.43×10^{-1}	0.12	207
	0.300	0.68	4.41×10^{-1}	0.12	207
17	0.400	0.69	5.79×10^{-1}	0.14	220
	0.426	0.72	5.92×10^{-1}	0.14	220
	0.335	0.53	6.32×10^{-1}	0.14	220
18	0.326	0.53	6.52×10^{-1}	0.15	220
	0.355	0.52	6.83×10^{-1}	0.15	220
	0.347	0.57	6.09×10^{-1}	0.15	220
19	0.384	0.55	6.98×10^{-1}	0.16	220
	0.322	0.50	6.44×10^{-1}	0.16	220
	0.388	0.57	6.80×10^{-1}	0.16	220
20	0.513	0.63	8.14×10^{-1}	0.2	220
	0.397	0.52	7.63×10^{-1}	0.2	220
	0.459	0.62	8.49×10^{-1}	0.2	220
21	0.557	0.63	8.84×10^{-1}	0.235	219
	0.517	0.62	8.34×10^{-1}	0.235	219
	0.484	0.57	8.49×10^{-1}	0.235	219
22	0.427	0.46	9.28×10^{-1}	0.27	219
	0.368	0.42	8.76×10^{-1}	0.27	219
	0.455	0.49	9.29×10^{-1}	0.27	219
23	0.397	0.43	9.23×10^{-1}	0.295	219
	0.366	0.40	9.15×10^{-1}	0.295	219
	0.377	0.41	9.20×10^{-1}	0.295	219
24	0.465	0.45	1.03	0.335	219
	0.435	0.50	8.70×10^{-1}	0.335	219
25	0.479	0.48	9.98×10^{-1}	0.37	219
	0.394	0.40	9.85×10^{-1}	0.37	219
	0.423	0.43	9.88×10^{-1}	0.37	219

26	0.490	0.50	1.02	0.4	221
	0.580	0.57	1.03	0.4	221
	0.565	0.55	1.11	0.4	221
27	0.597	0.54	1.11	0.43	223
	0.611	0.50	1.22	0.43	223
	0.602	0.59	1.01	0.43	223
28	0.429	0.46	9.33×10^{-1}	0.35	223
	0.407	0.42	9.69×10^{-1}	0.35	223
	0.401	0.41	9.98×10^{-1}	0.35	223

Experimento 3:

Medición n°	Volumen (l)	Tiempo (s)	Caudal (l/s)	Altura Lecho (m)	Caída de Presión (mmCCl ₄)
1	0.021	5.97	3.52×10^{-3}	0.1	2
	0.018	5.79	3.11×10^{-3}	0.1	2
	0.022	6.06	3.63×10^{-3}	0.1	2
2	0.028	3.72	7.53×10^{-2}	0.1	3
	0.024	3.53	6.79×10^{-2}	0.1	3
	0.023	3.78	6.08×10^{-2}	0.1	3
3	0.025	4.07	6.14×10^{-2}	0.1	3
	0.025	4.43	5.65×10^{-2}	0.1	3
	0.023	4.06	6.67×10^{-2}	0.1	3
4	0.045	2.41	1.87×10^{-2}	0.1	9
	0.048	2.56	1.88×10^{-2}	0.1	9
	0.047	2.53	1.86×10^{-2}	0.1	9
5	0.044	2.31	1.90×10^{-2}	0.1	8
	0.041	2.18	1.88×10^{-2}	0.1	8
	0.035	1.88	1.86×10^{-2}	0.1	8
6	0.056	2.41	2.32×10^{-2}	0.1	9
	0.061	2.63	2.32×10^{-2}	0.1	9
	0.056	2.41	2.32×10^{-2}	0.1	9
7	0.066	2.13	3.09×10^{-2}	0.1	11
	0.067	2.15	3.12×10^{-2}	0.1	11
	0.082	2.62	3.13×10^{-2}	0.1	11
8	0.076	2.03	3.74×10^{-2}	0.1	13
	0.084	2.22	3.78×10^{-2}	0.1	13
	0.078	1.88	4.15×10^{-2}	0.1	13
9	0.081	1.43	5.66×10^{-2}	0.1	18
	0.075	1.32	5.68×10^{-2}	0.1	18
	0.078	1.34	5.82×10^{-2}	0.1	18

10	0.093	1.46	6.37×10^{-2}	0.1	26
	0.080	1.22	6.56×10^{-2}	0.1	26
	0.091	1.38	6.59×10^{-2}	0.1	26
11	0.093	0.99	9.39×10^{-2}	0.1	38
	0.110	1.07	1.03×10^{-1}	0.1	38
	0.104	1.09	9.54×10^{-2}	0.1	38
12	0.157	1.00	1.57×10^{-1}	0.1	73
	0.183	1.09	1.68×10^{-1}	0.1	73
	0.262	1.69	1.55×10^{-1}	0.1	73
13	0.178	1.03	1.73	0.1	80
	0.120	0.75	1.60	0.1	80
	0.174	1.00	1.74	0.1	80
14	0.176	0.88	2.00	0.1	105
	0.176	0.88	2.00	0.1	105
	0.156	0.78	2.00	0.1	105
15	0.154	0.69	2.23	0.1	128
	0.141	0.65	2.17	0.1	128
	0.131	0.60	2.18	0.1	128
16	0.189	0.72	2.63	0.105	147
	0.135	0.50	2.70	0.105	147
	0.164	0.66	2.48	0.105	147
17	0.413	1.03	4.01	0.11	214
	0.310	0.76	4.08	0.11	214
	0.517	1.25	4.14	0.11	214
18	0.377	0.81	4.65	0.12	220
	0.543	1.19	4.56	0.12	220
	0.610	1.25	4.88	0.12	220
19	0.711	1.22	5.83	0.13	221
	0.597	1.00	5.97	0.13	221
	0.677	1.15	5.89	0.13	221
20	0.783	1.25	6.26	0.142	223
	0.918	1.52	6.04	0.142	223
	0.873	1.44	6.06	0.142	223
21	0.752	1.15	6.54	0.15	223
	0.593	0.98	6.05	0.15	223
	0.627	1	6.27	0.15	223
22	0.602	0.86	7.00	0.16	223
	0.661	1.03	6.42	0.16	223
	0.657	0.99	6.64	0.16	223
23	0.655	0.95	6.89	0.17	223
	0.695	0.98	7.09	0.17	223
	0.643	0.92	6.99	0.17	223
24	0.656	0.89	7.37	0.185	221
	0.600	0.82	7.32	0.185	221
	0.631	0.85	7.42	0.185	221

25	0.703	0.88	7.99	0.2	221
	0.626	0.81	7.73	0.2	221
	0.622	0.82	7.58	0.2	221
26	0.594	0.75	7.92	0.21	221
	0.588	0.74	7.95	0.21	221
	0.600	0.75	8.00	0.21	221
27	0.685	0.83	8.25	0.22	223
	0.665	0.81	8.21	0.22	223
	0.600	0.72	8.33	0.22	223
28	0.570	0.66	8.64	0.255	222
	0.600	0.71	8.45	0.255	222
	0.606	0.71	8.54	0.255	222
29	0.625	0.68	9.19	0.31	221
	0.715	0.75	9.53	0.31	221
	0.630	0.66	9.55	0.31	221
30	0.833	0.66	1.26	0.34	221
	0.900	0.72	1.25	0.34	221
31	1.030	0.72	1.43	0.41	221
	1.120	0.81	1.38	0.41	221
32	0.837	0.78	1.07	0.45	221
	0.720	0.69	1.04	0.45	221

APENDICE 3

Valores usados para análisis de resultados.

Experimento 1:

Resultado (n°)	Caudal promedio (l/s)	Velocidad promedio (m/s)	Caída de presión (mm CCl ₄)	Caída de Presión (N/m ²)
1	4.77×10^{-3}	6.07×10^{-4}	2	11.66
2	7.85×10^{-3}	9.99×10^{-4}	2	11.66
3	2.78×10^{-2}	3.54×10^{-3}	26	209.84
4	9.97×10^{-2}	1.27×10^{-2}	63	367.23
5	1.40×10^{-1}	1.78×10^{-2}	150	874.36
6	2.60×10^{-1}	3.31×10^{-2}	207	1270.73
7	4.01×10^{-1}	5.10×10^{-2}	221	1288.22
8	7.82×10^{-1}	9.95×10^{-2}	221	1288.22
9	8.47×10^{-1}	1.08×10^{-1}	221	1288.22
10	9.97×10^{-1}	1.27×10^{-1}	221	1288.22
11	2.26	2.88×10^{-1}	221	1288.22

Experimento 2:

Resultado (n°)	Caudal promedio (l/s)	Velocidad promedio (m/s)	Caída de presión (mmHg)	Caída de Presión (N/m ²)
1	2.51×10^{-3}	3.19×10^{-4}	1	5.83
2	6.91×10^{-3}	8.79×10^{-4}	3	17.49
3	1.82×10^{-2}	2.32×10^{-3}	9	52.46

4	2.95×10^{-2}	3.76×10^{-3}	10	58.29
5	4.80×10^{-2}	6.11×10^{-3}	15	87.44
6	7.03×10^{-2}	8.95×10^{-3}	28	163.21
7	8.62×10^{-2}	1.10×10^{-2}	32	186.53
8	1.17×10^{-1}	1.49×10^{-2}	52	303.11
9	1.30×10^{-1}	1.66×10^{-2}	63	367.23
10	1.60×10^{-1}	2.04×10^{-2}	75	437
11	1.70×10^{-1}	2.16×10^{-2}	85	495.47
12	2.13×10^{-1}	2.71×10^{-2}	100	582.90
13	2.37×10^{-1}	3.02×10^{-2}	137	798.58
14	2.66×10^{-1}	3.38×10^{-2}	151	880.10
15	3.91×10^{-1}	4.98×10^{-2}	218	1270.73
16	4.53×10^{-1}	5.77×10^{-2}	207	1206.61
17	6.00×10^{-1}	7.64×10^{-2}	220	1282.39
18	6.48×10^{-1}	8.25×10^{-2}	220	1282.39
19	6.74×10^{-1}	8.58×10^{-2}	220	1282.39
20	8.09×10^{-1}	1.03×10^{-1}	220	1282.39
21	8.56×10^{-1}	1.09×10^{-1}	219	1276.56
22	9.11×10^{-1}	1.16×10^{-1}	219	1276.56
23	9.19×10^{-1}	1.17×10^{-1}	219	1276.56
24	9.50×10^{-1}	1.21×10^{-1}	219	1276.56
25	9.89×10^{-1}	1.26×10^{-1}	219	1276.56
26	1.01×10^{-1}	1.29×10^{-1}	221	1288.22
27	1.12×10^{-1}	1.43×10^{-1}	223	1299.88
28	9.66×10^{-1}	1.23×10^{-1}	223	1299.88

Experimento 3:

Resultado (n°)	Caudal promedio (l/s)	Velocidad promedio (m/s)	Caída de presión (mmHg)	Caída de Presión (N/m ²)
1	3.42×10^{-3}	4.35×10^{-4}	2	11.66
2	6.79×10^{-3}	8.66×10^{-4}	3	17.49
3	5.81×10^{-3}	7.42×10^{-4}	3	17.49
4	6.22×10^{-3}	2.38×10^{-3}	9	52.46
5	6.28×10^{-3}	2.40×10^{-3}	8	46.63
6	2.32×10^{-2}	2.95×10^{-3}	9	52.46
7	3.12×10^{-2}	3.96×10^{-3}	11	64.12

8	3.88×10^{-2}	4.95×10^{-3}	13	75.78
9	5.72×10^{-2}	7.28×10^{-3}	18	104.92
10	6.50×10^{-2}	8.29×10^{-3}	26	151.56
11	9.75×10^{-2}	1.24×10^{-2}	38	221.50
12	1.59×10^{-1}	2.04×10^{-1}	73	425.52
13	1.69×10^{-1}	2.16×10^{-1}	80	466.32
14	2.00×10^{-1}	2.55×10^{-1}	105	612.05
15	2.19×10^{-1}	2.80×10^{-1}	128	746.12
16	2.59×10^{-1}	3.31×10^{-1}	147	856.87
17	4.08×10^{-1}	5.20×10^{-1}	214	1247.41
18	4.71×10^{-1}	5.98×10^{-1}	220	1282.39
19	5.89×10^{-1}	7.51×10^{-1}	221	1288.22
20	6.11×10^{-1}	7.79×10^{-1}	223	1299.88
21	6.30×10^{-1}	8.01×10^{-1}	223	1299.88
22	6.67×10^{-1}	8.53×10^{-1}	223	1299.88
23	6.99×10^{-1}	8.89×10^{-1}	223	1299.88
24	7.37×10^{-1}	9.39×10^{-1}	221	1288.22
25	7.77×10^{-1}	9.89×10^{-1}	221	1288.22
26	7.68×10^{-1}	1.01×10^{-1}	221	1288.22
27	8.26×10^{-1}	1.05×10^{-1}	223	1288.22
28	8.54×10^{-1}	1.09×10^{-1}	222	1294.05
29	9.42×10^{-1}	1.20×10^{-1}	221	1288.22
30	1.26	1.60×10^{-1}	221	1288.22
31	1.41	1.80×10^{-1}	221	1288.22
32	1.06	1.35×10^{-1}	221	1288.22

APENDICE 4

Ejemplos de cálculos.

1- Velocidad mínima de fluidización:

1.a)- Ecuación de Ergun:

A partir de la ecuación (4), se obtiene:

$$150 \frac{\mu \bar{V}_{0m} (1 - \varepsilon_m)}{\Phi_p^2 d_p^2 \varepsilon_m^3} + 1,75 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{\Phi_p d_p \varepsilon_m^3} = g(\rho_p - \rho)$$

$$1,75 \frac{\rho}{\Phi_p d_p \varepsilon_m^3 g(\rho_p - \rho)} \bar{V}_{0m}^2 + 150 \frac{\mu (1 - \varepsilon_m)}{\Phi_p^2 d_p^2 \varepsilon_m^3 g(\rho_p - \rho)} \bar{V}_{0m} - 1 = 0$$

$$1,75 \frac{998.2}{1 * 3 \times 10^{-3} * (0.51)^3 * 9.8 * (2504 - 998.2)} \bar{V}_{0m}^2 +$$

$$150 \frac{1.08 \times 10^{-3} * (1 - 0.51) *}{(3 \times 10^{-3})^2 * (0.51)^3 * 9.8 * (2504 - 998.2) * 1^2} \bar{V}_{0m} - 1 = 0$$

$$\bar{V}_{0m} = 0.051 \text{ m/s}$$

1.b)- Ecuación de Wen y Yu:

A partir de la ecuación (8) se obtiene.

$$24.5 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{d_p} + 1650 \frac{\mu \bar{V}_{0m}}{d_p^2} = g (\rho_p - \rho)$$

$$24.5 \frac{998.2}{3 \times 10^{-3} * 9.8 * (2504 - 998.2)} \bar{V}_{0m}^2 + 1650 \frac{1.08 \times 10^{-3}}{(3 \times 10^{-3})^2 * 9.8 * (2504 - 998.2)} \bar{V}_{0m} - 1 = 0$$

$$\bar{V}_{0m} = 0.032 \text{ m/s}$$

2- Caída de presión en el punto de fluidización incipiente:

Se calcula con la ecuación (3):

$$\frac{\Delta P g_c}{L} = (1 - \epsilon_m)(\rho_p - \rho) g$$

$$\Delta P = \frac{9.8}{9.81} * (1 - 0.51) * (2504 - 998.2) * 0.1$$

$$\Delta P = 73.71 \text{ kg}_f/\text{m}^2 = 723.09 \text{ N/ m}^2$$

3- Caída de presión en el lecho fluidizado:

Se calcula con la ecuación (1), considerando el primer valor de velocidad superficial del experimento 1:

$$\frac{\Delta P g_c \Phi_s d_p \varepsilon^3}{L \rho \bar{V}_0^2 (1-\varepsilon)} = 150 \frac{(1-\varepsilon) \mu}{\Phi_p d_p \bar{V}_0^2 \rho} + 1,75$$

$$\Delta P = L \left(1,75 \frac{\rho \bar{V}_0^2 (1-\varepsilon)}{d_p \varepsilon^3} + 150 \frac{(1-\varepsilon)^2 \mu \bar{V}_0}{\varepsilon^3 d_p^2} \right)$$

$$\Delta P = 0,1 \left(1,75 \frac{998,2 * (6,07 \times 10^{-4})^2 * (1-0,51)}{3 \times 10^{-3} * 0,51^3} + 150 \frac{(1-0,51)^2 * 1,08 \times 10^{-3} * 6,07 \times 10^{-4}}{0,51^3 * (3 \times 10^{-3})^2} \right)$$

$$\Delta P = 2,06 \text{ N/m}^2$$

4- Velocidad límite del fluido:

Con la ecuación (10):

$$V_t = \left[\frac{3,1 g (\rho_p - \rho) d_p}{\rho} \right]^{1/2}$$

$$V_t = \left[\frac{3,1 * 9,8 * (2504 - 998,2) * 3 \times 10^{-3}}{998,2} \right]^{1/2}$$

$$V_t = 0,37 \text{ m/s}$$

Al calcular el valor del número de Reynolds mediante la ecuación (12) se verifica el régimen de flujo es turbulento:

$$Re = \frac{d_p \rho \bar{V}_0}{\mu}$$

$$Re = \frac{3 \times 10^{-3} * 998.2 * 0.37}{1.08 \times 10^{-3}}$$

$$Re = 1025.93$$

4- Porosidad en el lecho fluidizado:

Se calcula con la ecuación (4), para el octavo valor de velocidad superficial del experimento 1 (9.95×10^{-2}):

$$150 \frac{\mu \bar{V}_{0m} (1 - \varepsilon_m)}{\Phi_p^2 d_p^2 \varepsilon_m^3} + 1.75 \frac{\rho \bar{V}_{0m}^2}{\Phi_p d_p \varepsilon_m^3} = g(\rho_p - \rho)$$

$$\varepsilon^3 + 150 \frac{\mu * \bar{V}_{0m} * \varepsilon}{d_p^2 * g * (\rho_p - \rho)} - 150 \frac{\mu * \bar{V}_0}{d_p^2 * g * (\rho_p - \rho)} - 1.75 \frac{g * \bar{V}_0^2}{d_p * g * (\rho_p - \rho)} = 0$$

$$\varepsilon^3 + 150 * \frac{1.08 \times 10^{-3} * 9.95 \times 10^{-2} * \varepsilon}{(3 \times 10^{-3})^2 * 9.8 * (2504 - 998.2)} - 150 \frac{1.08 \times 10^{-3} * 9.95 \times 10^{-2}}{(3 \times 10^{-3})^2 * 9.8 * (2504 - 998.2)} -$$

$$1.75 \frac{9.8 * (9.95 \times 10^{-2})^2}{3 \times 10^{-3} * 9.8 * (2504 - 998.2)} = 0$$

$$\varepsilon = 0.75$$

5- Determinación del tipo de fluidización realizada:

Con las ecuaciones (15), (16) y (13):

Primero se determina el número de Froude :

$$(Fr)_m = \frac{\bar{V}_{0m}^2}{d_p g}$$

$$(Fr)_m = \frac{0.051^2}{3 \times 10^{-3} * 9.8}$$

$$(Fr)_m = 8.85 \times 10^{-2}$$

Luego se calcula el número de Reynolds:

$$(Re)_m = \frac{3 \times 10^{-3} * 998.2 * 0.051}{1.08 \times 10^{-3}}$$

$$(Re)_m = 141.41$$

Y finalmente ambos valores se reemplazan en la ecuación (14)

$$(Fr)_m (Re)_m \left(\frac{\rho_p - \rho}{\rho} \right) \left(\frac{L_m}{D} \right) < 100$$

$$8.85 \times 10^{-2} * 141.41 * \left(\frac{2504 - 998.2}{998.2} \right) \left(\frac{0.1}{0.1} \right) < 100$$

$$18 < 100$$

Por lo tanto la fluidización ocurrida es de tipo particulada.

6- Densidad de las partículas:

Se determina con la ecuación (20):

$$\rho_p = \frac{m}{V_f - V_i}$$

$$\rho_p = \frac{15.0258}{21-15}$$

$$\rho_p = 2504 \text{ kg/m}^3$$

7- Porosidad del lecho fijo o porosidad en el punto de fluidización incipiente:

Con la ecuación (18):

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{m_p}{\pi r^2 h \rho}$$

$$\varepsilon_m = 1 - \frac{966.21}{\pi (5)^2 * 10 * 2.504}$$

$$\varepsilon_m = 0.51$$

8- Determinación de caudales promedios:

Con la ecuación (22), para la primera medición del Experimento 1:

$$Q = \frac{V}{t}$$

$$Q = \frac{(0.049 + 0.044 + 0.043)}{(9.6 + 9.53 + 9.34)}$$

$$Q = 4.77E-3 \text{ l/s}$$

9- Determinación de velocidad superficial promedio:

Para la primera medición del Experimento 1, con la ecuación (23):

$$\bar{V}_0 = \frac{Q}{A}$$

$$\bar{V}_0 = \frac{4.77E-3}{\pi * 0.05^2}$$

$$\bar{V}_0 = 6.07E-4 \text{ m/s}$$

APENDICE 5

Valores de caída de presión teórica a cada altura y velocidad medidas.

Experimento 1:

Velocidad superficial (m/s)	Altura del lecho (m)	Caída de presión (N/m ²)
6,07E-04	0,1	2,06
9,99E-04	0,1	3,47
3,54E-03	0,1	14,23
1,27E-02	0,1	76,07
1,78E-02	0,1	126,14
3,31E-02	0,105	343,49
5,10E-02	0,11	723,09
9,95E-02	0,185	723,09
1,08E-01	0,27	723,09
1,27E-01	0,4	723,09
2,88E-01	0,63	723,09

Experimento 2:

Velocidad superficial (m/s)	Altura del lecho (m)	Caída de presión (N/m ²)
3,19E-04	0,1	1,06
8,79E-04	0,1	3,03
2,32E-03	0,1	8,72
3,76E-03	0,1	15,29
6,11E-03	0,1	27,94
8,95E-03	0,1	46,39
1,10E-02	0,1	61,86
1,49E-02	0,1	96,29
1,66E-02	0,1	113,35
2,04E-02	0,1	155,98
2,16E-02	0,1	170,73

2,71E-02	0,1	246,26
3,02E-02	0,1	294,56
3,38E-02	0,105	355,85
4,98E-02	0,11	723,09
5,77E-02	0,12	723,09
7,64E-02	0,14	723,09
8,25E-02	0,15	723,09
8,58E-02	0,16	723,09
1,03E-01	0,2	723,09
1,09E-01	0,235	723,09
1,16E-01	0,27	723,09
1,17E-01	0,295	723,09
1,21E-01	0,335	723,09
1,26E-01	0,37	723,09
1,29E-01	0,4	723,09
1,43E-01	0,43	723,09
1,23E-01	0,35	723,09

Experimento 3:

Velocidad superficial (m/s)	Altura del lecho (m)	Caída de presión (N/m ²)
4,35E-04	0,1	1,46
8,66E-04	0,1	2,98
7,42E-04	0,1	2,54
2,38E-03	0,1	8,97
2,40E-03	0,1	9,06
2,95E-03	0,1	11,48
3,96E-03	0,1	16,27
4,95E-03	0,1	21,39
7,28E-03	0,1	35,12
8,29E-03	0,1	41,79
1,24E-02	0,1	73,47
2,04E-02	0,1	155,98
2,16E-02	0,1	170,73
2,55E-02	0,1	222,94
2,80E-02	0,1	259,86
3,31E-02	0,105	343,49
5,20E-02	0,11	723,09
5,98E-02	0,12	723,09
7,51E-02	0,13	723,09
7,79E-02	0,142	723,09

8,01E-02	0,15	723,09
8,53E-02	0,16	723,09
8,89E-02	0,17	723,09
9,39E-02	0,185	723,09
9,89E-02	0,2	723,09
1,01E-01	0,21	723,09
1,05E-01	0,22	723,09
1,09E-01	0,255	723,09
1,20E-01	0,31	723,09
1,60E-01	0,34	723,09
1,80E-01	0,41	723,09
1,35E-01	0,45	723,09

APENDICE 6

Valores de porosidad del lecho a cada velocidad medida.

Experimento 1:

Velocidad Superficial (m / s)	Porosidad
6,07E-04	0,51
9,99E-04	0,51
3,54E-03	0,51
1,27E-02	0,51
1,78E-02	0,51
3,31E-02	0,51
5,10E-02	0,51
9,95E-02	0,75
1,08E-01	0,79
1,27E-01	0,87

Experimento 2:

Velocidad Superficial (m / s)	Porosidad
3,19E-04	0,51
8,79E-04	0,51
2,32E-03	0,51
3,76E-03	0,51
6,11E-03	0,51
8,95E-03	0,51
1,10E-02	0,51
1,49E-02	0,51
1,66E-02	0,51
2,04E-02	0,51

2,16E-02	0,51
2,71E-02	0,51
3,02E-02	0,51
3,38E-02	0,51
4,98E-02	0,51
5,77E-02	0,55
7,64E-02	0,64
8,25E-02	0,67
8,58E-02	0,69
1,03E-01	0,77
1,09E-01	0,79
1,16E-01	0,82
1,17E-01	0,83
1,21E-01	0,84
1,26E-01	0,87
1,29E-01	0,88
1,43E-01	0,94
1,23E-01	0,85

Experimento 3:

Velocidad Superficial (m / s)	Porosidad
4,35E-04	0,51
8,66E-04	0,51
7,42E-04	0,51
2,38E-03	0,51
2,40E-03	0,51
2,95E-03	0,51
3,96E-03	0,51
4,95E-03	0,51
7,28E-03	0,51
8,29E-03	0,51
1,24E-02	0,51
2,04E-02	0,51
2,16E-02	0,51
2,55E-02	0,51
2,80E-02	0,51
3,31E-02	0,51
9,95E-02	0,75
1,08E-01	0,79

1,27E-01	0,87
5,20E-02	0,52
5,98E-02	0,56
7,51E-02	0,63
7,79E-02	0,65
8,01E-02	0,66
8,53E-02	0,68
8,89E-02	0,7
9,39E-02	0,71
9,89E-02	0,75
1,01E-01	0,76
1,05E-01	0,77
1,09E-01	0,79
1,20E-01	0,84
1,35E-01	0,9

APENDICE 6

Valores de porosidad del lecho a cada velocidad medida.

Experimento 1:

Velocidad Superficial (m / s)	Porosidad
6,07E-04	0,51
9,99E-04	0,51
3,54E-03	0,51
1,27E-02	0,51
1,78E-02	0,51
3,31E-02	0,51
5,10E-02	0,51
9,95E-02	0,75
1,08E-01	0,79
1,27E-01	0,87

Experimento 2:

Velocidad Superficial (m / s)	Porosidad
3,19E-04	0,51
8,79E-04	0,51
2,32E-03	0,51
3,76E-03	0,51
6,11E-03	0,51
8,95E-03	0,51
1,10E-02	0,51
1,49E-02	0,51
1,66E-02	0,51
2,04E-02	0,51

2,16E-02	0,51
2,71E-02	0,51
3,02E-02	0,51
3,38E-02	0,51
4,98E-02	0,51
5,77E-02	0,55
7,64E-02	0,64
8,25E-02	0,67
8,58E-02	0,69
1,03E-01	0,77
1,09E-01	0,79
1,16E-01	0,82
1,17E-01	0,83
1,21E-01	0,84
1,26E-01	0,87
1,29E-01	0,88
1,43E-01	0,94
1,23E-01	0,85

Experimento 3:

Velocidad Superficial (m / s)	Porosidad
4,35E-04	0,51
8,66E-04	0,51
7,42E-04	0,51
2,38E-03	0,51
2,40E-03	0,51
2,95E-03	0,51
3,96E-03	0,51
4,95E-03	0,51
7,28E-03	0,51
8,29E-03	0,51
1,24E-02	0,51
2,04E-02	0,51
2,16E-02	0,51
2,55E-02	0,51
2,80E-02	0,51
3,31E-02	0,51
9,95E-02	0,75
1,08E-01	0,79

1,27E-01	0,87
5,20E-02	0,52
5,98E-02	0,56
7,51E-02	0,63
7,79E-02	0,65
8,01E-02	0,66
8,53E-02	0,68
8,89E-02	0,7
9,39E-02	0,71
9,89E-02	0,75
1,01E-01	0,76
1,05E-01	0,77
1,09E-01	0,79
1,20E-01	0,84
1,35E-01	0,9