

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO

Colegio de Ciencias e Ingeniería

**Diseño y construcción de un Reactor de Lecho Fluidizado para el
estudio de mezcla y segregación de gases y sólidos**

Juan Pablo Castellanos Vallejo

David Escudero, Ph.D., Director de Tesis

Tesis de Grado presentada como requisito para la obtención del título de Ingeniero

Mecánico

Quito, julio de 2015

Universidad San Francisco de Quito

Colegio de Ciencias e Ingeniería

HOJA DE APROBACIÓN DE TESIS

**Diseño y construcción de un Reactor de Lecho Fluidizado para el
estudio de mezcla y segregación de gases y sólidos**

JUAN PABLO CASTELLANOS VALLEJO

David Escudero, Ph.D.,
Director de Tesis

Daniela Almeida, Ph.D.,
Miembro del Comité de Tesis

Andrea C. Landázuri, MSc.,
Miembro del Comité de Tesis

Alfredo Valarezo, Ph.D.,
Director del Programa

Ximena Córdova, Ph.D.,
Decana de la Escuela de Ingeniería
Colegio de Ciencias e Ingeniería

Quito, julio de 2015

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído la Política de Propiedad Intelectual de la Universidad San Francisco de Quito y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo de investigación quedan sujetos a lo dispuesto en la Política.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo de investigación en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en el Art. 144 de la Ley Orgánica de Educación Superior.

Firma: _____

Nombre: Juan Pablo Castellanos Vallejo

C. I.: 1720573185

Fecha: Quito, julio de 2015

DEDICATORIA

Este proyecto está dedicado a mi esposa, mis padres, mi hermano por su apoyo incondicional y su constancia, no habría podido llegar a este punto sin ellos.

AGRADECIMIENTOS

Agradezco a mis padres Víctor y Paulina por su apoyo total y ayuda incondicional, a mi hermano Esteban por toda su ayuda en diferentes momentos.

A mi esposa Marcela por ser una constante en mi vida, por hacer de mi vida universitaria única.

Al Departamento de Ingeniería Mecánica de la Universidad San Francisco de Quito por haberme recibido en sus aulas y enseñado todo lo enseñado, a David Escudero por su guía y paciencia en el proyecto. A Edison Bonifaz, Alfredo Valarezo y David Escudero por su enseñanza, pedagogía e interés.

A Juan Avilés y a la empresa Gamacril que hicieron posible este proyecto.

A mis amigos y compañeros, a Luis Eduardo por ser aparte de primo un gran amigo, Patricio, Alex y Roberto por su gran amistad.

RESUMEN

El presente trabajo de tesis presenta el diseño y construcción de un reactor de lecho fluidizado para el estudio y observación de fluidos en múltiples fases. El objetivo principal es realizar el diseño del reactor en un software CAD, los materiales usados en la construcción del mismo fueron especificados usando la información obtenida en trabajos previos realizados por David Escudero y otras referencias de la literatura. Se probaron diferentes diseños del reactor, teniendo el diseño final durante el proceso de construcción. Para el mismo se consultó con la empresa Gamacril, la cual tuvo aportes al diseño dando información sobre las limitaciones del acrílico y soluciones frente a problemas suscitados durante la construcción. Una vez terminada la construcción se procedió a realizar las pruebas del reactor en las facilidades de la Universidad San Francisco de Quito para comprobar el funcionamiento correcto del mismo. Los materiales utilizados para los experimentos fueron microesferas de vidrio de 400 a 800 micras de diámetro y cáscara de nuez molida con diámetros mayores a 800 micras, con densidades de 2500 y 1440 kg/m³ respectivamente. Se escogieron tres distintas presiones: 22.5, 30 y 45 psi, para cada presión se tuvieron diferentes porcentajes en volumen de los materiales (microesferas/ nuez) en el lecho siendo 25/75, 50/50 y 75/25. Los resultados obtenidos en los experimentos mostraron diferentes comportamientos del lecho en función de la configuración del mismo, se pudo observar mezclas heterogéneas con tendencia a una segregación del lecho, teniendo al final depósitos de microesferas en las paredes del lecho con pequeños porcentajes de cáscara de nuez.

ABSTRACT

This thesis presents the design, construction and experimentation of a fluidized bed reactor to study and observe multi-phase flows. The main objective is to design the reactor using CAD software. The materials used on the construction were specified using information from previous work by David Escudero and other references in literature. Several reactor designs were proved, having the final design during the construction process. For the construction, a company called Gamacril was consulted, which gave feedback to the designs by giving information about the properties and limitations of acrylic, giving also solutions to problems risen during the construction. Once finished the construction phase, experiments were carried out using two different materials, 400-800 μm glass beads and ground walnut shell with diameter higher than 800 μm , whose densities are 2500 and 1440 kg/m^3 respectively. The tests were done at different pressures: 22.5, 30 and 45 Psi. For each pressure there were different bed configurations of glass beads/walnut: 25/75, 50/50 and 75/25 in volume percentage. Once the tests were done, the results were analyzed visually observing the behavior of the fluidized materials inside the reactor. The results obtained from the experiments showed different bed behaviors depending on its configuration. Heterogeneous mixtures were observed with tendencies from the bed materials to segregate themselves having at the end small deposits of glass beads against the bed walls with smaller deposits of ground walnut shell.

Tabla de Contenido

RESUMEN	3
ABSTRACT	4
Índice de Figuras	8
Índice de Tablas.....	11
Glosario de Términos	12
Capítulo 1: Introducción.....	13
1.1 Antecedentes.....	13
1.2 Motivación del proyecto.....	14
1.3 Objetivos del Proyecto	15
1.3.1 Objetivo General.....	15
1.3.2 Objetivos Específicos	15
1.3 Descripción general del Proyecto	15
1.5 Resumen	16
Capítulo 2: Revisión bibliográfica.....	17
2.1 Fluidización	17
2.2 Velocidad mínima de fluidización (U_{mf}).....	18
2.3 Calidad de fluidización.....	20
2.4 Clasificación de las partículas de fluidización	21
2.5 Lechos fluidizados.....	22

2.5.1 Tipos de Lechos.....	23
2.6 Segregación y Mezcla de materiales sólidos	23
Capítulo 3: Diseño y Construcción.....	25
3.1 Parámetros de Diseño	25
3.2 Diseño y Construcción	26
3.3 Partes del Reactor	28
3.3.1 Plenum.....	29
3.3.2 Lecho	30
3.3.3 Plato Distribuidor	30
3.3.4 Malla Mesh 40	32
3.3.5 Bridas y anillos	32
3.3.6 Cámara Superior	35
3.3.7 Base del Reactor	35
3.3.8 Manguera de Aire Comprimido y accesorios	36
3.3.9 Válvulas de Esfera.....	36
3.3.10 Sensor de Presión	37
3.3.11 Regulador de Presión.....	37
Capítulo 4: Experimentos y Resultados	38
4.1 Preparación de Materiales	38
4.1.1 Microesferas de Vidrio	38
4.1.2 Cáscara de Nuez	41
4.2 Experimento	43
4.3 Resultados.....	46

4.3.1 Experimento 1:	47
4.3.2 Experimento 2:	48
4.3.3 Experimento 3:	49
4.3.4 Experimento 4:	50
4.3.5 Experimento 5:	51
4.3.6 Experimento 6:	52
4.3.7 Experimento 7:	53
4.3.8 Experimento 8:	54
4.3.9 Experimento 9:	54
4.3.10 Experimento 10:	54
4.3.11 Experimento 11:	55
4.3.12 Experimento 12:	56
4.4 Análisis de los Resultados	57
5.1 Conclusiones.....	58
5.2 Recomendaciones	59
Capítulo 6: Bibliografía	60

Índice de Figuras

Fig. 2.1: Lecho vertical: a) Lecho fijo, b) Lecho con una fluidización mínima, c) Lecho con fluidización burbujeante, d) Lecho con <i>slugging</i> , e) Lecho fluidizado con fase dispersa y transporte neumático de partículas,	17
Fig. 2.2: Medida ideal de presión para determinar la velocidad mínima de fluidización.	19
Fig. 2.3: Clasificación de Geldart para partículas relacionando su densidad con su diámetro	21
Fig. 3.1: Esquema básico del reactor diseñado.....	25
Fig. 3.2: Brida cortada con láser en Gamacril	27
Fig. 3.3: Sección del plato distribuidor con agujeros de 5 mm.	27
Fig. 3.4: Sección del plato distribuidor con agujeros de 2 mm.	28
Fig. 3.5: Reactor Ensamblado.....	28
Fig. 3.6: Plenum	29
Fig. 3.7: Lecho.....	30
Fig. 3.8: Partes del Plato Distribuidor	31
Fig. 3.9: Plato ensamblado	31
Fig. 3.10: Malla Mesh 40	32
Fig. 3.11: Brida de apoyo	33
Fig. 3.12: Brida de unión	33
Fig. 3.13: Brida del Plato Distribuidor	34
Fig. 3.14: Anillo	34
Fig. 3.15: Cámara Superior.....	35
Fig. 3.16: Base del Reactor.....	35
Fig. 3.17: Manguera de Aire Comprimido y Accesorios	36

Fig.3.18: Válvula de Esfera	36
Fig. 3.19: Sensor de Presión	37
Fig. 3.20: Regulador de Presión	37
Fig. 4.1: Microesferas de vidrio	38
Fig. 4.2: Microesferas de vidrio antes de ser secadas en el horno.....	39
Fig. 4.3: Horno	39
Fig. 4.4: Microesferas después del proceso de secado	40
Fig. 4.5: Microesferas a ser tamizadas	40
Fig. 4.6: Microesferas tamizadas.....	41
Fig. 4.7: Cáscara de Nuez Molida	41
Fig. 4.8: Cáscara de Nuez Molida sin tamizar.....	42
Fig. 4.9: Cáscaras de nuez siendo tamizadas.....	43
Fig. 4.10: Instalación de los accesorios de la Base.....	44
Fig. 4.11: Preparación del Reactor	44
Fig. 4.12: Armado del Reactor y preparación del Plenum	44
Fig. 4.13: Prueba del Reactor para encontrar la presión de fluidización.....	45
Fig.4.14: Preparación del Lecho antes de ser fluidizado.....	47
Fig. 4.15: Etapas de fluidización del lecho: a) lecho a $t = 0$ segundos, b) lecho a $t = 45$ segundos, c) lecho a $t = 90$ segundos, d) lecho a $t = 135$ segundos y e) lecho a $t = 180$ segundos	48
Fig. 4.16: Preparación del Lecho con mezcla 50/50.....	49
Fig. 4.18: Lecho en proceso de fluidización.....	51
Fig. 4.19: Etapas de fluidización del lecho con proporción 50/50 de microesferas/nuez: a) lecho a $t = 0$ segundos, b) lecho a $t = 45$ segundos, c) lecho a $t = 90$ segundos, d) lecho a $t = 135$ segundos y e) lecho a $t = 180$ segundos	51

Fig. 4.20: Lecho en proceso de fluidización.....	52
Fig. 4.21: Lecho con 75% en nuez y 25% en microesferas.....	53
Fig. 4.22: Diferentes etapas en la fluidización del lecho.....	53
Fig. 4.23: lecho con estado inicial mezclado.....	54
Fig. 4.24: lecho con estado inicial mezclado al final del proceso de fluidización	55
Fig. 4.25: Lecho completamente mezclado antes de ser fluidizado	55
Fig. 4.26: Lecho completamente mezclado después de ser fluidizado.....	56
Fig. 4.27: Lecho Fluidizado con condiciones iniciales de lecho mezclado.....	56
Fig. 4.28: Lecho fluidizado experimento 1	57

Índice de Tablas

Tabla 4.1: Experimentos realizados.....	45
Tabla 4.2: Resultados de los experimentos, Estado Final.	46

Glosario de Términos

A_p Área de la partícula

ρ_g Densidad del gas

ρ_c Densidad de la partícula

d_p Diámetro de la partícula

ψ Esfericidad de la partícula

g Constante de gravedad

ε_{mf} Porosidad del lecho expandido

P_f Presión de Fluidización

U_{mf} Velocidad mínima de fluidización

μ Viscosidad dinámica del fluido

Capítulo 1: Introducción

1.1 Antecedentes

Los reactores de lecho fluidizado (*Fluidized Bed Reactor FBR*) han sido usados durante más de 60 años en la industria petroquímica, su primera aplicación fue en 1942 en la refinería de *Baton Rouge* de la *Standard Oil Company of New Jersey (Exxon Corporation)* (ACS, 2015). Estudios académicos de estos reactores se han realizado para entender cómo funcionan estos reactores, estudios más extensos en hidrodinámica o segregación y mezcla de sustancias han ayudado al uso más eficiente de estos dispositivos (Keller, 2012).

Un reactor de lecho fluidizado parte del principio de la fluidización de un sólido, lo cual favoreció la aparición de métodos eficientes para el craqueo de crudos pesados para obtener derivados de alto octanaje como gasolina de avión. El fenómeno de la fluidización es hacer que un sólido tenga el comportamiento de un fluido al ser atravesado por un fluido líquido o gas a diferentes velocidades o presiones. Este fenómeno crea una homogeneización entre el sólido y el fluido. La velocidad mínima de fluidización es uno de los más importantes parámetros a tenerse en cuenta para entender la hidrodinámica del lecho fluidizado (Escudero, 2014). Cuando el fluido llega a la velocidad mínima de fluidización del sólido se producen burbujas de gas que fluyen a través del sólido. Este movimiento ayuda a tener mezclas sólidas rápidas, buen contacto entre el sólido y el gas y una uniformidad en temperatura y composición, con pocas caídas de presión en todo el lecho. Estas propiedades hacen que la fluidización de sólidos en los reactores FBR sea útil en operaciones como reacciones químicas, intercambio de calor, transferencia de masa, entre otras, por ejemplo combustión y gasificación del carbón, craqueo de crudos pesados, etc. (Cabrera, 2004)

Para realizar medidas experimentales de los fenómenos que ocurren dentro de un reactor se utilizan métodos de medición no invasivos para evitar una intervención en los procesos que ocurren dentro del reactor que resultarían en la alteración de los mismos teniendo datos erróneos y resultados desfavorables, pero se debe tener en cuenta que los mismos pueden tener errores por su falta de contacto directo lo cual hace que se dividan en maneras como el cambio de las formas, tamaños o parámetros de operación de los lechos fluidizados que se usan en la industria (Keller, 2012). Por esta misma razón se tuvieron en cuenta, dentro de este experimento, que los métodos de medición a usarse no alteren de ninguna manera los procesos a realizarse y que sean lo suficientemente precisos para tener resultados favorables.

1.2 Motivación del proyecto

Los reactores de lecho fluidizado son ampliamente usados en la industria pero el comportamiento de las partículas dentro del lecho es un campo que no ha sido investigado a fondo. La importancia de entender el comportamiento de las partículas en los procesos de mezcla o segregación dentro del lecho del reactor es de bastante peso frente a las necesidades de diseño de los reactores. Teniendo una vez el conocimiento de estos fenómenos, se podrían mejorar los diseños de los reactores, teniendo como enfoque de uso de los mismos diferentes áreas como transferencia de masa y calor, reacciones químicas, etc. Los lechos fluidizados fueron de gran interés cuando fueron adaptados catalizadores fluidizados en la industria petrolera, para craqueo de hidrocarburos pesados y reacciones químicas. Durante la fluidización del lecho el intercambio de calor es violento lo que produce un equilibrio térmico dentro del sistema en poco tiempo por lo

que estos reactores son altamente usados en procesos fuertemente exotérmicos donde el control de la temperatura es vital. (Conesa, 2010)

1.3 Objetivos del Proyecto

En base a la motivación del presente proyecto los siguientes son el objetivo general y los objetivos específicos del mismo.

1.3.1 Objetivo General

Analizar visualmente el proceso de fluidización y los procesos de mezcla/segregación de partículas sólidas mediante el diseño y construcción de un reactor de lecho fluidizado.

1.3.2 Objetivos Específicos

Dentro de los objetivos específicos se encuentran:

- Diseñar mediante el uso de un software CAD (AutoCAD Inventor), un reactor de lecho fluidizado frío.
- Analizar los procesos de fluidización y mezcla/segregación de microesferas de vidrio entre 400 a 800 micras junto con cáscara de nuez molida.
- Realizar diferentes experimentos en los cuales se variarán los porcentajes de mezcla entre las microesferas con las cascaras de nuez y evaluar los resultados visualmente.

1.3 Descripción general del Proyecto

El reactor consta de tres secciones: el plenum, el lecho y la cámara superior. En el plenum se encuentran esferas de vidrio de tamaño regular de 1 cm de diámetro, las cuales permitirán que el flujo de aire sea homogéneo en la entrada al distribuidor; en el plenum igualmente se encontrara la entrada de aire comprimido junto con el sensor de presión.

En el lecho se encuentra el distribuidor, el cual se encarga de distribuir uniformemente el flujo de aire directo a las partículas con las que se trabajarán. La cámara superior se usará para evitar que las partículas que vuelen por encima del lecho salgan del reactor. Las tres secciones estarán unidas por platos de unión o bridas realizadas a medida.

Las partes más importantes del reactor serán realizadas en acrílico transparente para facilitar la evaluación visual de los procesos de fluidización y mezcla/segregación de las partículas a usarse. Las partículas a usarse son: microesferas de vidrio de diámetros entre 400 a 800 micras y cascara de nuez molida con dimensiones de 800 micras igualmente.

Los experimentos serán realizados bajo varios parámetros de evaluación.

Para la fluidización se usaran diversos flujos de aire a diferentes presiones tanto para las microesferas como para la cáscara de nuez molida para visualizar experimentalmente los comportamientos de los lechos con diferentes configuraciones de materiales en porcentaje de volumen.

1.5 Resumen

El presente trabajo consta de 5 capítulos. En el capítulo 1 se hizo la introducción del proyecto en el cual se encuentra la motivación del proyecto y los objetivos a cumplirse para este proyecto. El capítulo 2 está destinado a la literatura consultada para el presente trabajo y describe conceptos básicos del tema tratado en el mismo. El capítulo 3 trata la parte de diseño presentando el modelo del reactor realizado en AutoCad Inventor. El capítulo 4 trata con la parte experimental, resultados y la discusión de los mismos. En el capítulo 5 se presentan las conclusiones y recomendaciones para futuros trabajos con reactores de lecho fluidizado basadas en las experiencias vividas durante el desarrollo del proyecto.

Capítulo 2: Revisión bibliográfica

2.1 Fluidización

Se considera un lecho vertical, a un reactor lleno de partículas sólidas apoyadas sobre un distribuidor poroso por el cual va a fluir aire o gas en dirección hacia arriba del lecho como se muestra en la Figura 2.1.

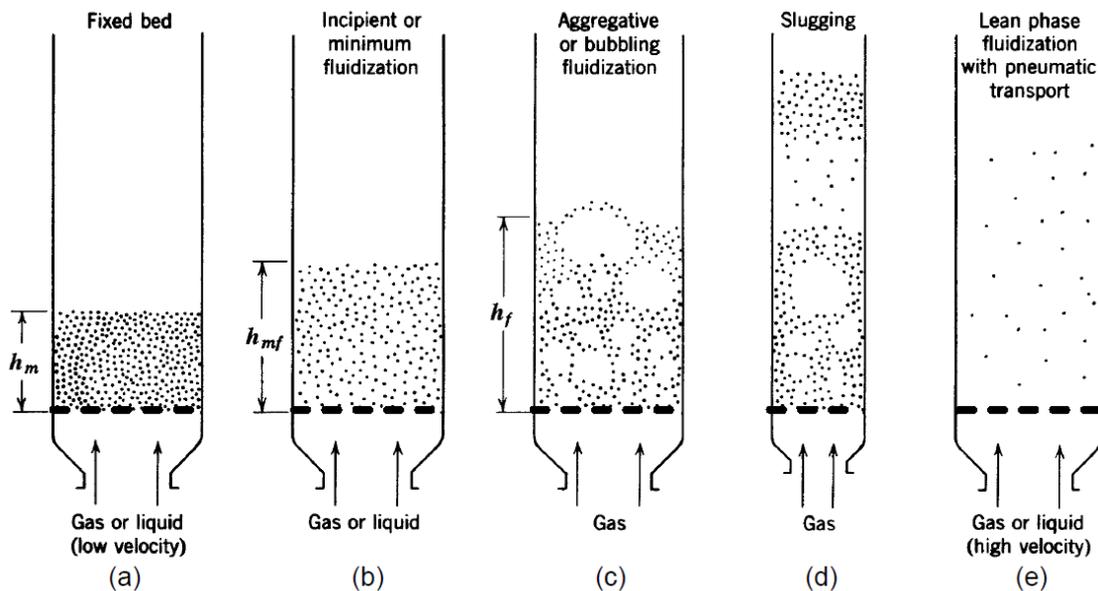


Fig. 2.1: Lecho vertical: a) Lecho fijo, b) Lecho con una fluidización mínima, c) Lecho con fluidización burbujeante, d) Lecho con *slugging*, e) Lecho fluidizado con fase dispersa y transporte neumático de partículas, (Fogler, 2006)

La fluidización es el fenómeno donde un lecho de partículas sólidas se suspenden o se fluidizan mediante el paso de un gas entre ellas a diferentes velocidades (Barreira Moreno, 2007). Existen distintos tipos de fluidización dentro de un lecho; como se observa en la figura 2.1a, cuando el flujo de gas tiene una velocidad baja, el gas se filtra a través de las partículas sólidas las cuales permanecen estacionarias, creando un estado que se conoce como un lecho fijo. En la figura 2.1b se observa un cambio en el estado de las partículas dado por el aumento de la velocidad del flujo de aire, lo que provoca que las partículas se

suspendan en el gas al equilibrarse la fuerza de fricción de las partículas con el gas y el peso de las mismas desapareciendo de este modo la componente vertical de la fuerza que las partículas tienen entre si al estar comprimidas (Escudero, 2014). Este estado es el intermedio entre el lecho fijo y el lecho completamente fluidizado, llamado lecho de fluidización mínima (Universidad Nacional del Sur, 2013) (Barreira Moreno, 2007). A medida que la velocidad del aire aumenta el lecho cambia de naturaleza, en la figura 2.1c, se tiene un lecho con fluidización burbujeante donde las burbujas se originan a partir de una agitación más violenta de las partículas; en la figura 2.1d se tiene un lecho con slugging, los llamados slugs son burbujas de aire con un tamaño parecido al del depósito del lecho y finalmente el lecho fluidizado con fase dispersa y transporte neumático de partículas (Figura 2.1e) las cuales se deben recuperar de alguna manera para regresarlas al depósito. (Universidad Nacional del Sur, 2013) (Barreira Moreno, 2007).

En el presente trabajo el reactor trabajará en los estados de lecho de fluidización mínima, el cual es determinado por un parámetro conocido como la velocidad mínima de fluidización (U_{mf}), y el estado de lecho burbujeante.

2.2 Velocidad mínima de fluidización (U_{mf})

La velocidad mínima de fluidización es la velocidad superficial del fluido, gas o aire, a la cual las partículas están apenas suspendidas en el medio fluidizado. Esta velocidad es uno de los parámetros más importantes en el estudio de los comportamientos hidrodinámicos en los reactores de lecho fluidizado, tanto en el ámbito de la investigación como en el ámbito industrial, ya que ayuda a establecer el límite inferior de fluidización para diferentes lechos (Escudero, 2014) (Keller, 2012).

Esta velocidad se obtiene usualmente de manera experimental y depende de varios parámetros como los tamaños y composiciones de la partículas, las propiedades del medio fluidizado, el tamaño y forma de la cámara del reactor que contiene al lecho (Escudero, 2014) (Keller, 2012).

Hay varios métodos para obtener esta velocidad (Escudero, 2014) pero usualmente se usa el de caída de presión (Keller, 2012). Este método mide la caída de presión a lo largo del lecho en función de la velocidad superficial del gas, el punto de transición entre un lecho fijo y uno burbujeante es denotado por una línea a presión constante en un gráfico comparando la velocidad superficial del gas con la caída de presión (Escudero, 2014).

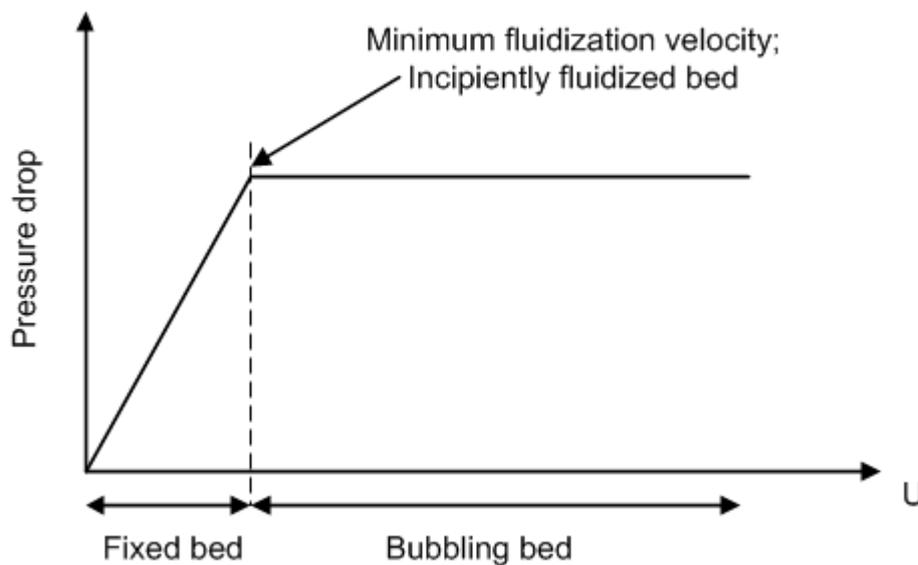


Fig. 2.2: Medida ideal de presión para determinar la velocidad mínima de fluidización.

(Keller, 2012)

Analíticamente existen varias correlaciones matemáticas que permiten calcular esta velocidad, una de las correlaciones es la planteada por Fogler. (Fogler, 2006)

$$U_{mf} = \frac{(\psi d_p)^2}{150\mu} [g(\rho_c - \rho_g)] \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \quad (2.1)$$

Para la esfericidad de la partícula y la porosidad del lecho expandido se tienen las siguientes fórmulas (Fogler, 2006):

$$\psi = \frac{\pi \left(\frac{6V_p}{\pi} \right)^{2/3}}{A_p} \quad (2.2)$$

$$\varepsilon_{mf} = \left(\frac{0.0071}{\psi} \right)^{1/3} \quad (2.3)$$

2.3 Calidad de fluidización

El término fluidización hace referencia tanto a los sistemas en fase densa, fase en la que empieza la fluidización del lecho y se obtiene la velocidad mínima de fluidización, y sistemas en fase dispersa (Barreira Moreno, 2007). La calidad de la fluidización depende de varios factores al igual que la velocidad mínima de fluidización, como el tamaño de los sólidos y su distribución en el lecho. En el caso de partículas pequeñas, las cuales van a ser usadas en este proyecto, se debe tener en cuenta que si existe humedad tenderán a aglomerarse para lo cual es recomendable realizar una agitación de las partículas usando métodos como agitadores mecánicos para mantener la fluidización (Barreira Moreno, 2007). Un segundo factor importante es la relación de densidades entre el gas que fluye y el medio donde fluye, para los sistemas líquido-sólidos existe homogeneidad mientras que en los sistemas gas-sólido se mira partes heterogéneas a lo largo del medio fluidizado. Otros factores son la geometría del lecho, el tipo de partícula usada, entre otros.

2.4 Clasificación de las partículas de fluidización

La capacidad y el modo en que las partículas se fluidizan varían según su composición y geometría, Geldart las agrupa en 4 grupos distintos y es esta clasificación la más usada en los campos de tecnología de partículas. Para el presente proyecto se usaran microesferas de vidrio y cáscara de nuez molida.

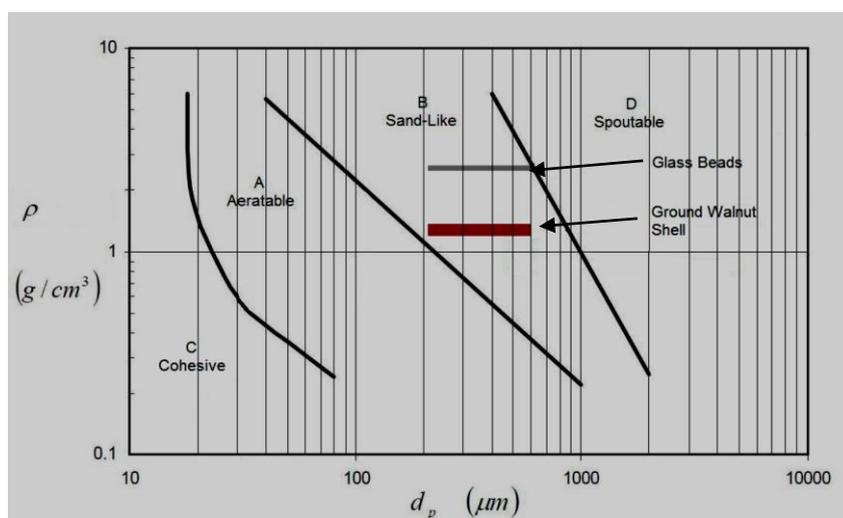


Fig. 2.3: Clasificación de Geldart para partículas relacionando su densidad con su diámetro (Escudero, 2014)

Los grupos se definen de la siguiente manera (Universidad Nacional del Sur, 2013) (Barreira Moreno, 2007):

- Grupo A: contiene las partículas que se fluidizan fácilmente por aire en condiciones ambiente mostrando un estado no burbujeante a medida que la velocidad del gas aumenta. La velocidad mínima de fluidización es la misma que la velocidad mínima de burbujeo.
- Grupo B: contiene a las partículas que se fluidizan bien, formando burbujas vigorosas y de gran tamaño, las burbujas aparecen tan pronto como se alcanza la velocidad mínima de fluidización.

- Grupo C: contiene a las partículas muy finas cohesivas o polvos que son incapaces de ser fluidizadas en un sentido estricto y necesitan ser mezcladas con partículas de mayor tamaño.
- Grupo D: contiene a las partículas de gran tamaño que se caracterizan por formar lechos de chorro, en general el gas se canaliza necesitando un mayor caudal de aire para lograr la fluidización.

Para el comportamiento de las partículas basadas en la clasificación Geldart se tiene la siguiente tabla:

	Grupo A	Grupo B	Grupo C	Grupo D
Características principales	Ideales para fluidización Muestran un rango de no burbujeo	Comienzo del burbujeo a U_{mf}	Cohesivas, dificultad para fluidizar	Tamaño elevado
Partículas típicas	Catalizadores de craqueo	Arena de construcción	Harina Cemento	Grava Granos de café
Expansión del lecho	Alta	Moderada	Baja por aparición de canales	Baja
Velocidad de desaireación	Lenta, lineal	Rápida	Inicialmente rápida, luego exponencial	Rápida
Propiedades de burbujas	Formación y coalescencia de burbujas hasta tamaño máximo	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite	No hay burbujas, sólo canales	Crecimiento de burbujas sin tamaño límite
Mezcla de partículas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Mezcla de gas	Alta	Moderada	Muy baja	Baja
Aparición de chorros	No	Sólo en lechos poco profundos	No	Sí, incluso en lechos profundos

Tabla 2.1: Clasificación Geldart según el comportamiento de las partículas (Barreira Moreno, 2007)

2.5 Lechos fluidizados

Los lechos fluidizados son reactores donde se produce la fluidización de las partículas. Tienen varias formas y variaciones pero todos siguen en esencia la misma estructura

(Escudero, 2014):

- **Plenum:** es la cámara base donde se introduce el aire que va a fluidizar al lecho, contiene esferas de vidrio de tamaño regular entre 1 y 1.2 cm de diámetro para tener homogeneidad del flujo al llegar al distribuidor
- **Distribuidor:** es un plato intermedio entre el plenum y el lecho, consta de un patrón de agujeros con cambio de diámetro interno a través de los cuales va a pasar el gas de fluidización hacia el lecho.
- **Lecho:** es donde se encuentran las partículas sólidas a fluidizar encima del plato distribuidor.
- **Cámara superior:** es la cámara localizada por encima del lecho, su utilidad se basa en evitar el escape de las partículas sólidas que se desprenden del lecho a causa del flujo de gas o aire de fluidización.

2.5.1 Tipos de Lechos

Los tipos más comunes de lechos fluidizados son: Estacionario o Fijo y Circulatorio. El lecho Estacionario se refiere al lecho donde las partículas se mantienen dentro de la región del lecho, mientras que el Circulatorio se refiere a los lechos donde las partículas dejan la región del lecho y tienen que ser recuperadas mediante dispositivos o canales adaptados al reactor (Escudero, 2014).

2.6 Segregación y Mezcla de materiales sólidos

La mezcla y segregación de materiales granulares es importante para muchas aplicaciones, el estudio de estos fenómenos están lejos de ser completamente entendidos y los problemas que ocurren en el mismo son vastos (Ottino & Khakhar, 2000). Los materiales granulares se segregan gracias a diferencias en tamaños o densidades de los materiales mezclados. La segregación y mezcla de los mismos son fenómenos sin paralelo

en la dinámica de fluidos, ya que en un principio se trató de realizarse un modelo de los mismos a partir de dicha ciencia, llegando a un conocimiento incompleto por su complejidad. Para tratar de modelar este fenómeno se usan herramientas como dinámica de partículas y simulaciones Monte Carlo. (Ottino & Khakhar, 2000)

El estudio de segregación y mezcla de materiales sólidos en lechos con múltiples sólidos a fluidizar es importante ya que afecta directamente a la eficiencia de operación del reactor (Keller, 2012).

Según estudios de Rowe y Nienow, la mezcla de los materiales se produce solamente por la formación de burbujas dentro del lecho que conducen a las partículas hacia arriba a la vez que se ven patrones de caída de partículas a los lados del reactor. Según su estudio, la mezcla está en función del exceso de velocidad del gas por arriba de la velocidad mínima de fluidización que a su vez depende de las características físicas de la partícula. Por otro lado, la segregación de los materiales se produciría cerca de la velocidad mínima de fluidización, dado que la mezcla se da con el exceso de velocidad sobre U_{mf} se tendría teóricamente una mezcla heterogénea del lecho a velocidades suficientemente altas (Keller, 2012).

Capítulo 3: Diseño y Construcción

Este capítulo describe el proceso de diseño y construcción del reactor, guías y parámetros de diseño, materiales a usarse, diseños preliminares y diseño final basado en esquemas y consejos de construcción de las partes involucradas en el proyecto, la construcción del reactor y las partes a usarse obtenidas en el mercado local.

3.1 Parámetros de Diseño

Los parámetros que fueron guía del diseño del reactor fueron obtenidos principalmente del reactor utilizado en trabajos previos, los cuales se pueden observar en la figura 3.1

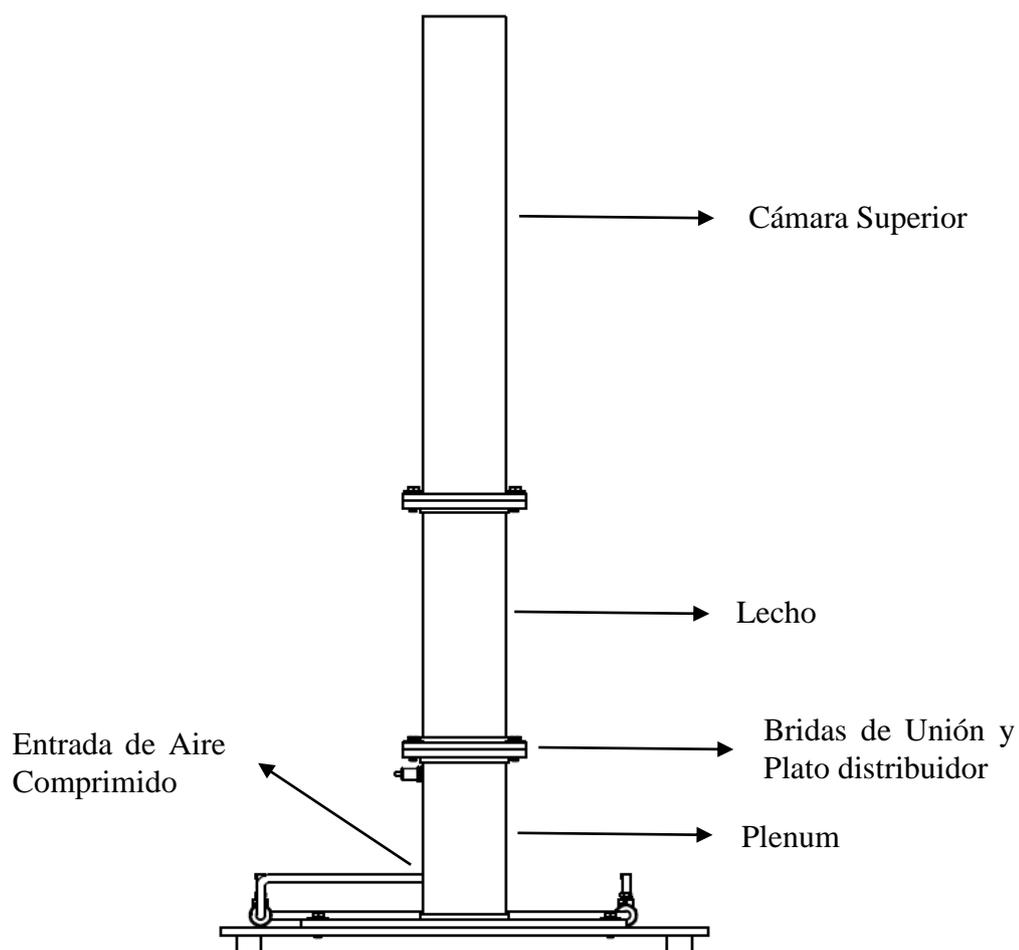


Fig. 3.1: Esquema básico del reactor diseñado.

Las medidas utilizadas para tener el esquema del reactor fueron basadas en el esquema presentado, teniendo en cuenta los materiales disponibles en el mercado local para tener un acceso a los mismos de una manera más fácil.

El sistema no es presurizado por tener la Cámara Superior abierta y la presión necesaria para la fluidización del lecho es mínima por lo que no se requirieron diseños especiales para contenedores presurizados. No hubo necesidad de controles de humedad del aire comprimido, por lo que control de corrosión del reactor no se tomó en cuenta dentro del diseño. No existen temperaturas grandes dentro del reactor ya que el proceso de fluidización de los sólidos a usarse es puramente demostrativo y no se requieren reacciones químicas.

3.2 Diseño y Construcción

El diseño final del reactor se dio durante la etapa de construcción. La selección de materiales se hizo con referencia a trabajos previos (Escudero, 2014) , con lo cual se determinaron que las partes importantes del reactor (plenum, lecho, plato distribuidor y bridas) sean realizadas en acrílico, por otro lado se definieron las demás partes como la base y la cámara superior sea de madera y PVC respectivamente. Los accesorios como el regulador de presión, sensor de presión, válvulas de esfera, mangueras y acoples son del material provisto por el fabricante al no tener incidencia grande en el diseño como tal.

Las piezas en acrílico fueron realizadas en la empresa Gamacril en la ciudad de Quito. Todos los cortes del acrílico fueron realizados mediante corte laser, para los tubos de acrílico del Plenum y el Lecho, se usaron moldes de PVC para el termoformado de las piezas.



Fig. 3.2: Brida cortada con láser en Gamacril

Para el termoformado de las piezas del plenum y el lecho se calentaron las planchas de acrílico dentro de un horno eléctrico a una temperatura que variaba entre los 163 y 176 °C, luego se empezaba a doblarlas usando el tubo de PVC y pinzas para mantener la forma, una vez que ya está alcanzada la forma de tubo, se introduce la pieza dentro del tubo de acrílico conjuntamente con pinzas para mantener la forma durante el proceso de enfriado. El tubo resultante tiene un diámetro interno de 95.6 mm.

En el caso del plato distribuidor se hicieron dos platos de 3 mm de espesor cada uno con agujeros de 2 y de 5 mm de diámetro que fueron pegados alineando los agujeros.

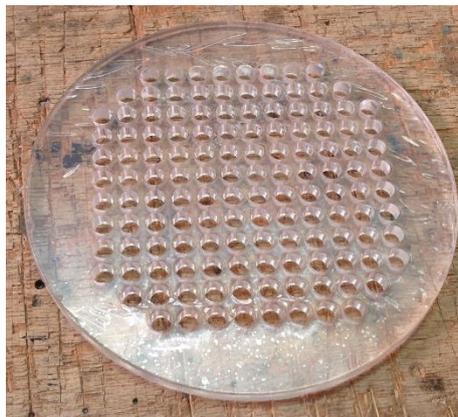


Fig. 3.3: Sección del plato distribuidor con agujeros de 5 mm.



Fig. 3.4: Sección del plato distribuidor con agujeros de 2 mm.

3.3 Partes del Reactor

El reactor está compuesto de: plenum, el lecho, el plato distribuidor, una malla mesh 40, bridas y anillos, cámara superior, base del reactor, manguera de aire a presión y accesorios, como, válvulas de bola, sensor de presión y regulador de presión.



Fig. 3.5: Reactor Ensamblado

3.3.1 Plenum

El plenum es la cámara inferior del reactor, donde se tiene la entrada de aire al mismo. Dentro del plenum se colocaron canicas de vidrio de 1 cm de diámetro aproximadamente para tener un flujo homogéneo de aire a la entrada del distribuidor.

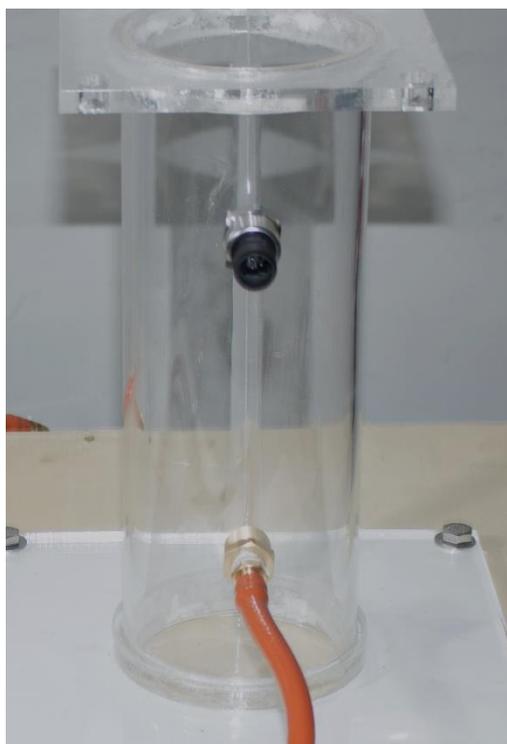


Fig. 3.6: Plenum

El plenum fue realizado a partir de una plancha de acrílico de 3 mm de ancho, para tener un diámetro exterior de 101.6 mm y un diámetro interior de 95.6 mm con una altura de 300 mm. Los agujeros para el sensor de presión y la entrada de aire se realizaron aproximadamente a 40 mm de los extremos superior e inferior, respectivamente.

3.3.2 Lecho

El lecho es la cámara intermedia del reactor, donde se asienta el material a fluidizar. Está colocado por encima del plenum y está acoplado al mismo con ayuda de bridas que mantienen al plato distribuidor en medio de ambos.



Fig. 3.7: Lecho

El lecho mantiene las mismas medidas de espesor de pared y diámetros tanto interno como externo, con una altura de 220 mm.

3.3.3 Plato Distribuidor

El distribuidor estaba en un principio compuesto por un solo plato de 8 mm de espesor con 100 mm de diámetro, el diseño final se realizó a partir de dos platos de 3 mm cada uno por la disponibilidad de planchas de acrílico con ese espesor específico. El plato distribuidor consiste por ende en dos platos colocados uno encima del otro cada uno de 3

mm de espesor y 120 mm de diámetro. Ambos platos constan de un patrón cuadrulado de agujeros de 5 y 2 mm de diámetro respectivamente.

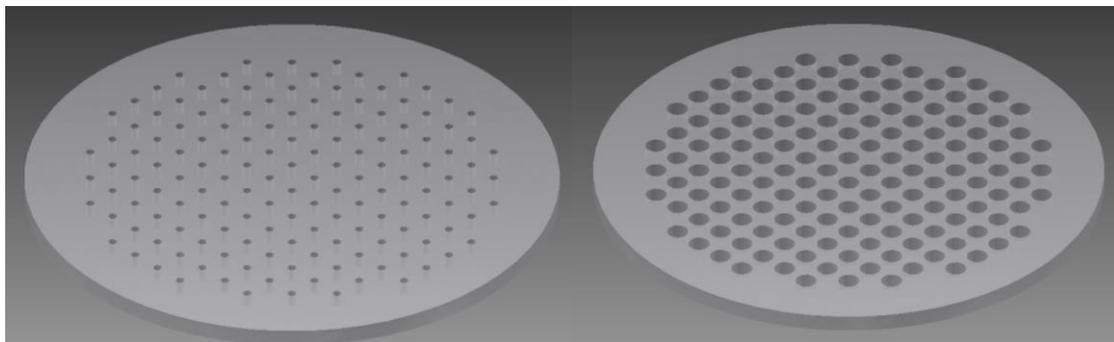


Fig. 3.8: Partes del Plato Distribuidor

El cambio de área de los agujeros se usa para aumentar la velocidad de salida del aire para fluidizar al lecho. Los agujeros están dispuestos a 7.10 mm de distancia desde sus centros de circunferencia. El porcentaje total de apertura del distribuidor es de 4.11% teniendo un área total del distribuidor de 11309.73 mm² y un área total de los agujeros de 464.96 mm².

Para el ensamble del plato distribuidor se usó polvo de acrílico y pega especial para fundir el polvo entre los dos platos para tener hermeticidad en el plato.

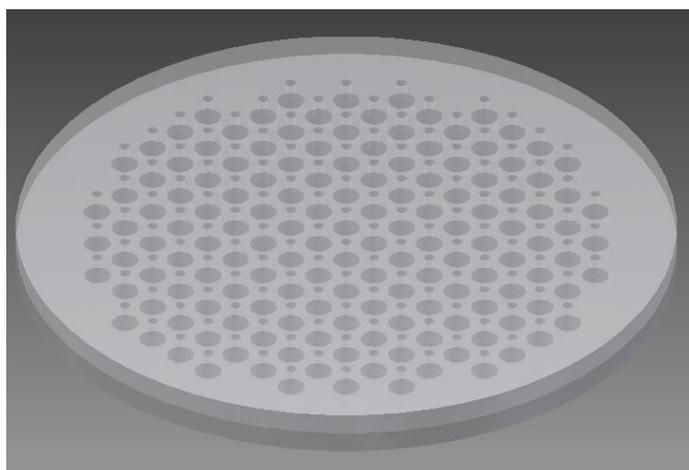


Fig. 3.9: Plato ensamblado

3.3.4 Malla Mesh 40

La malla mesh 40 es usada como barrera para evitar que las partículas del lecho pasen al plenum a través de los agujeros del distribuidor. Dentro del reactor está colocada por encima del Distribuidor. La malla tiene aperturas de 400 micras, por lo tanto permite el paso libre de aire y evita la caída de las partículas del lecho al fondo del plenum. La malla fue cortada a mano a medida del diámetro interno del lecho.



Fig. 3.10: Malla Mesh 40

3.3.5 Bridas y anillos

Las bridas son usadas para unir cada segmento del reactor y asegurar la estructura a la base de madera. Las bridas de unión son cuadradas de 152 mm de lado con agujeros de 12.5 mm en las esquinas a 13.5 mm de distancia de cada lado de la esquina desde su centro, una apertura central de 101.6 mm donde se coloca cada segmento del reactor; para la brida que contiene al plato distribuidor la apertura central es de 120.5 mm de diámetro. La brida de apoyo del reactor es igualmente cuadrada de 400 mm de lado. Todas las bridas son de 6 mm de espesor.



Fig. 3.11: Brida de apoyo



Fig. 3.12: Brida de unión



Fig. 3.13: Brida del Plato Distribuidor

Todas las bridas fueron adheridas al plenum y lecho mediante polvo de acrílico mezclado con la pega especial para evitar fugas de aire y facilidad de ensamblaje del reactor.

Los anillos son de 4 mm de espesor y 4 mm de alto, con diámetro interno de 101.5 mm y 109.5 mm de diámetro exterior. Los anillos fueron colocados encima de las bridas para asegurar hermeticidad del reactor.



Fig. 3.14: Anillo

3.3.6 Cámara Superior

La cámara superior está hecha a partir de un tubo de PVC de 101.6 mm de diámetro interno con 1800 mm de alto, la misma que fue unida a la brida mediante el uso de silicón.



Fig. 3.15: Cámara Superior

3.3.7 Base del Reactor

La base del reactor es la que sostiene todos los componentes del Reactor, está hecha en madera triplex. Es una base rectangular de 800x600 mm con 10 mm de espesor y 4 apoyos cuadrados en la parte inferior de 30x30 mm.

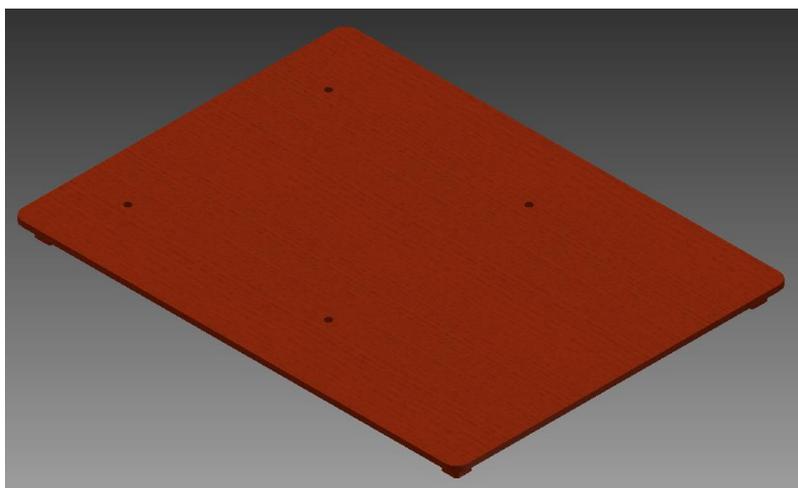


Fig. 3.16: Base del Reactor

3.3.8 Manguera de Aire Comprimido y accesorios

La manguera de aire comprimido usada para el proyecto es de marca Truper de 6.35 mm con una longitud de 5 m, los conectores usados igualmente son marca Truper de igual medida que el diámetro de la manguera.



Fig. 3.17: Manguera de Aire Comprimido y Accesorios (Truper, 2015)

3.3.9 Válvulas de Esfera

Las válvulas de esfera usadas en el reactor igualmente son de 6.35 mm con conexiones hembra a ambos lados



Fig.3.18: Válvula de Esfera (Baterias Gatell, 2015)

3.3.10 Sensor de Presión

El sensor de presión utilizado en el reactor es de marca Parts Square con rango de 0 a 100 psi.



Fig. 3.19: Sensor de Presión (Amazon, 2015)

3.3.11 Regulador de Presión

El regulador de presión usado es de marca PrimeFit con un rango de regulación de 1 a 145 psi de presión.



Fig. 3.20: Regulador de Presión (Amazon, 2015)

Capítulo 4: Experimentos y Resultados

Este capítulo describe los experimentos realizados y los resultados alcanzados, así como la metodología usada en dichos experimentos.

4.1 Preparación de Materiales

Los materiales usados dentro del experimento que van a fluidizarse son microesferas de vidrio y cáscara de nuez molida. Estos materiales están dentro de la categoría tipo B de la clasificación Geldart (Figura 2.3).

Los materiales fueron adquiridos en el mercado local y preparados en el laboratorio de cementos de la Universidad San Francisco de Quito.

4.1.1 Microesferas de Vidrio

Las microesferas de vidrio son partículas fácilmente fluidizables dentro de un reactor, entran en la categoría de tipo B en la clasificación Geldart , y poseen una densidad de 2500 kg/m^3 (Escudero, 2014).



Fig. 4.1: Microesferas de vidrio (Escudero, 2014)

Para el experimento se necesitó un rango de diámetros para las microesferas el cual variaba de 400 a 800 micras, esto fue limitado por la disponibilidad de tamices en el laboratorio de cementos.

El proceso de preparación de las microesferas fue el siguiente:

- Se removió la humedad de las microesferas al ponerlas dentro de un horno a 100°C durante 24 horas.



Fig. 4.2: Microesferas de vidrio antes de ser secadas en el horno.



Fig. 4.3: Horno

- Una vez terminado el período dentro del horno, se sacaron las microesferas y se deshicieron las acumulaciones de esferas y se procedió al tamizado de las mismas.



Fig. 4.4: Microesferas después del proceso de secado



Fig. 4.5: Microesferas a ser tamizadas

- El proceso de tamizado fue realizado varias veces teniendo como resultado esferas con diámetros entre 400 y 800 micras.



Fig. 4.6: Microesferas tamizadas

4.1.2 Cáscara de Nuez

La cáscara de nuez molida, al igual que las microsferas, son fácilmente fluidizables dentro del reactor y entran en la misma categoría tipo B en la clasificación de Geldart, con una densidad de 1440 kg/m^3 .



Fig. 4.7: Cáscara de Nuez Molida (Escudero, 2014)

El proceso de preparación de la cáscara difiere del proceso de las microesferas en que no se necesite un proceso de secado. Por otro lado se realizó el tamizado de la misma manera. Se tuvo al final la cáscara de nuez tamizada pero la cantidad necesaria dentro del rango de 400 a 800 micras no fue suficiente por lo que se usó la cáscara con medidas mayores a 800 micras.



Fig. 4.8: Cáscara de Nuez Molida sin tamizar

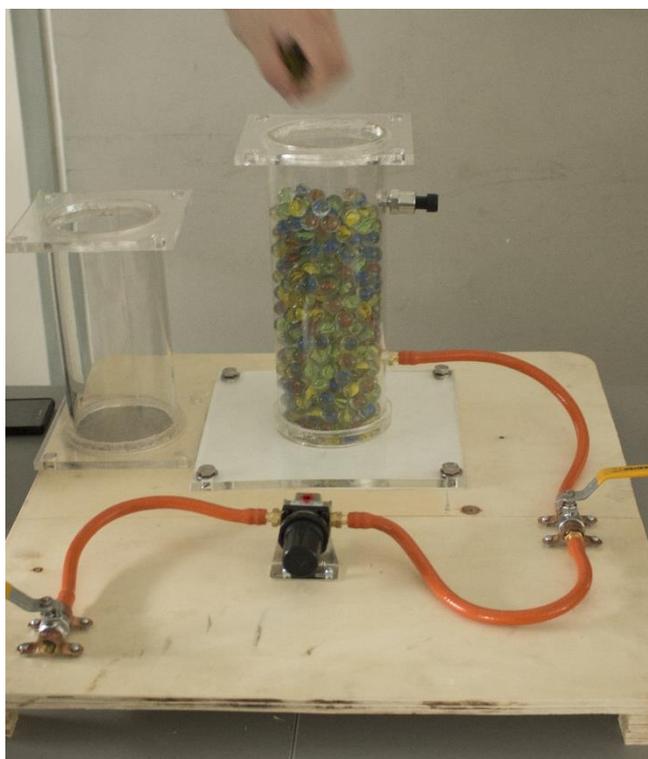


Fig. 4.9: Cáscaras de nuez siendo tamizadas

4.2 Experimento

El reactor se preparó en las instalaciones de la Universidad San Francisco de Quito, usando el sistema de aire comprimido, se conectó la manguera del reactor mediante un conector rápido a la manguera del sistema de la universidad regulando la presión con el regulador instalado en el reactor.



Fig. 4.10: Instalación de los accesorios de la Base**Fig. 4.11: Preparación del Reactor****Fig. 4.12: Armado del Reactor y preparación del Plenum**

La parte experimental del reactor se desarrolló realizando una prueba inicial registrando la presión a la cual el lecho lleno de microesferas llegó al punto de mínima fluidización. La presión obtenida fue de 15 psi (P_f), la misma que sirve de referencia para realizar los experimentos; para los cuales se buscaba observar el comportamiento de los

materiales dentro del lecho a tres distintas presiones 1.5, 2, y 3P_f bajo distintas configuraciones de llenado. La tabla 4.1 resume las distintas condiciones de los experimentos realizados.



Fig. 4.13: Prueba del Reactor para encontrar la presión de fluidización.

Presión (Psi)	% Microesferas	% Cáscara de Nuez	Estado
22.5	75	25	Segregado
22.5	50	50	Segregado
22.5	25	75	Segregado
30	75	25	Segregado
30	50	50	Segregado
30	25	75	Segregado
45	75	25	Segregado
45	50	50	Segregado
45	25	75	Segregado
45	75	25	Mezclado
45	50	50	Mezclado
45	25	75	Mezclado

Tabla 4.1: Experimentos realizados

Los experimentos realizados resumidos en la tabla 4.1 son nueve divididos en grupos de tres presiones 22.5, 30 y 45 psi para tres diferentes composiciones de lecho en microesferas/cáscara de nuez que son 75/25, 50/50 y 25/75 en porcentaje con un estado inicial completamente segregado. Por otro lado se tienen 3 experimentos más a cada una de las presiones con un porcentaje 50/50 de cada material teniendo como estado inicial un lecho completamente mezclado. La cantidad de material dentro del lecho corresponde a la relación $H/D = 1$ donde H es la altura del lecho estático y D es el diámetro interno de la cámara del Lecho. Se visualizó el comportamiento de los materiales por un tiempo de 3 minutos en los cuales el lecho se encontraba fluidizado.

4.3 Resultados

Una vez realizados los experimentos, los resultados obtenidos se detallan en la tabla 4.2.

No.	Presión (Psi)	% Microesferas	% Cáscara de Nuez	Estado Inicial	Estado final
1	22.5	75	25	Segregado	Mezclado
2	22.5	50	50	Segregado	Mezclado
3	22.5	25	75	Segregado	Mezclado
4	30	75	25	Segregado	Mezclado
5	30	50	50	Segregado	Mezclado
6	30	25	75	Segregado	Mezclado
7	45	75	25	Segregado	Mezclado
8	45	50	50	Segregado	Mezclado
9	45	25	75	Segregado	Mezclado
10	45	75	25	Mezclado	Mezclado
11	45	50	50	Mezclado	Mezclado
12	45	25	75	Mezclado	Mezclado

Tabla 4.2: Resultados de los experimentos, estado final.

La tabla 4.2 detalla solamente el estado final de cada uno de los experimentos, en todos los casos el lecho termina mezclado con relación a su estado inicial.

4.3.1 Experimento 1:

En el experimento 1 se tuvo una mezcla progresiva del lecho teniendo al término del tiempo de fluidización una mezcla bastante heterogénea presentando grupos de materiales reunidos en el lecho.



Fig.4.14: Preparación del Lecho antes de ser fluidizado

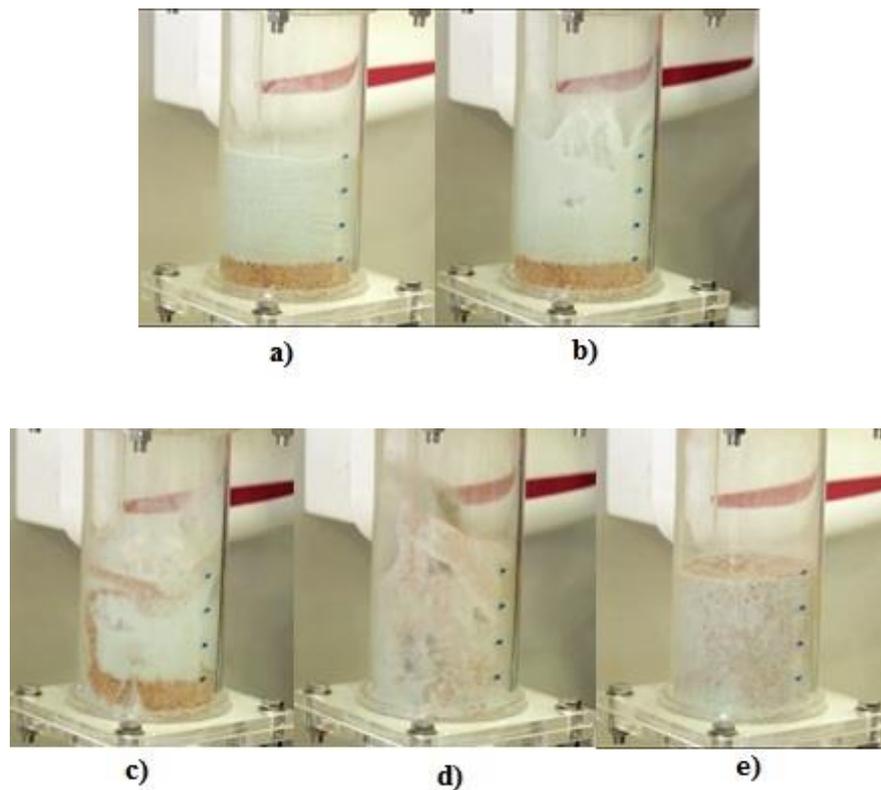


Fig. 4.15: Etapas de fluidización del lecho: a) lecho a $t = 0$ segundos, b) lecho a $t = 45$ segundos, c) lecho a $t = 90$ segundos, d) lecho a 135 segundos y e) lecho a $t = 180$ segundos

4.3.2 Experimento 2:

La mezcla fue igualmente progresiva teniendo un lecho mezclado al finalizar el tiempo de fluidización. El proceso de fluidización fue progresivo y se presentó una tendencia de las microesferas a almacenarse en las paredes del lecho. Al final se obtuvo una mezcla más heterogénea del lecho.



Fig. 4.16: Preparación del Lecho con mezcla 50/50.

4.3.3 Experimento 3:

Los resultados de este experimento con una proporción inicial de 25/75 de microesferas/cáscara de nuez fueron interesantes ya que al final del tiempo de fluidización se tuvo una mezcla heterogénea en una proporción aproximada de 80/20 entre mezcla y cáscara de nuez.

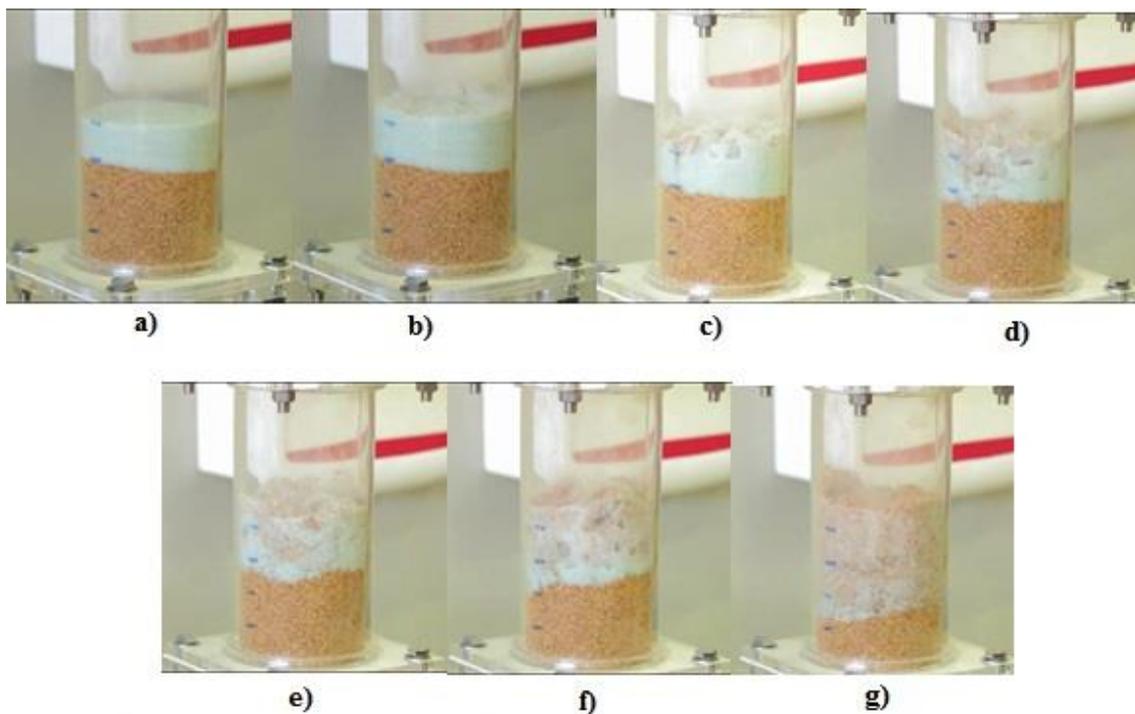


Fig. 4.17: Etapas de fluidización del lecho con proporción 25/75 de microsferas/nuez: a) lecho a $t=0$ segundos, b) lecho a $t=30$ segundos, c) lecho a $t=60$ segundos, d) lecho a $t=90$ segundos, e) lecho a $t=120$ segundos, f) lecho a $t=150$ segundos y g) lecho a $t=180$ segundos.

4.3.4 Experimento 4:

En este experimento la presión es 2 veces la presión de fluidización (30 psi). La proporción del lecho estaba en un 75/25 de microsferas/cáscara de nuez. La mezcla fue más rápida que los tres experimentos anteriores y al final del tiempo de fluidización se vio una mezcla heterogénea con la tendencia de las microsferas de colocarse en las paredes del lecho.



Fig. 4.18: Lecho en proceso de fluidización

4.3.5 Experimento 5:

Este experimento con una proporción de 50/50 de los materiales del lecho tuvo un comportamiento diferente a los demás lechos ya que al final del tiempo de fluidización se tuvo un lecho con una proporción de mezcla/microesferas/nuez de 40/30/30 aproximadamente desde la parte superior del lecho hasta la parte inferior.

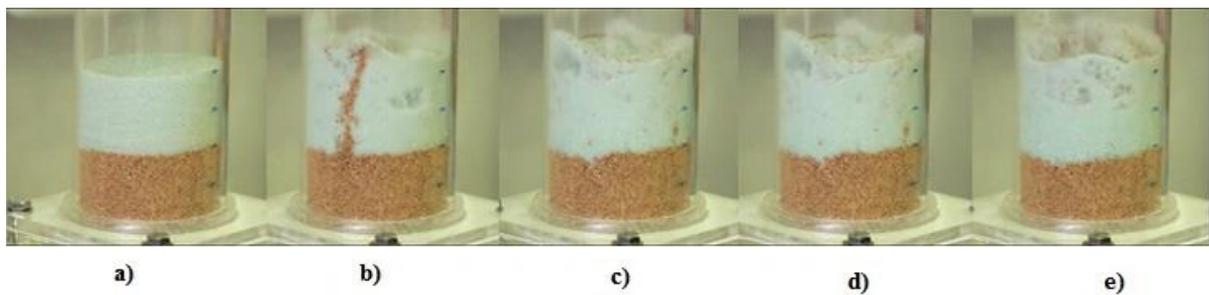


Fig. 4.19: Etapas de fluidización del lecho con proporción 50/50 de microesferas/nuez: a) lecho a $t = 0$ segundos, b) lecho a $t = 45$ segundos, c) lecho a $t = 90$ segundos, d) lecho a $t = 135$ segundos y e) lecho a $t = 180$ segundos



Fig. 4.20: Lecho en proceso de fluidización

4.3.6 Experimento 6:

En este experimento al igual que los demás se observó una mezcla progresiva más veloz por la diferencia de presión entre este y los tres primeros experimentos. La mezcla resultante tuvo una proporción aproximada de 40/60 de mezcla y nuez. Se pudo observar como la nuez entraba en la mezcla en forma de capas gracias a los flujos de aire.



Fig. 4.21: Lecho con 75% en nuez y 25% en microsferas

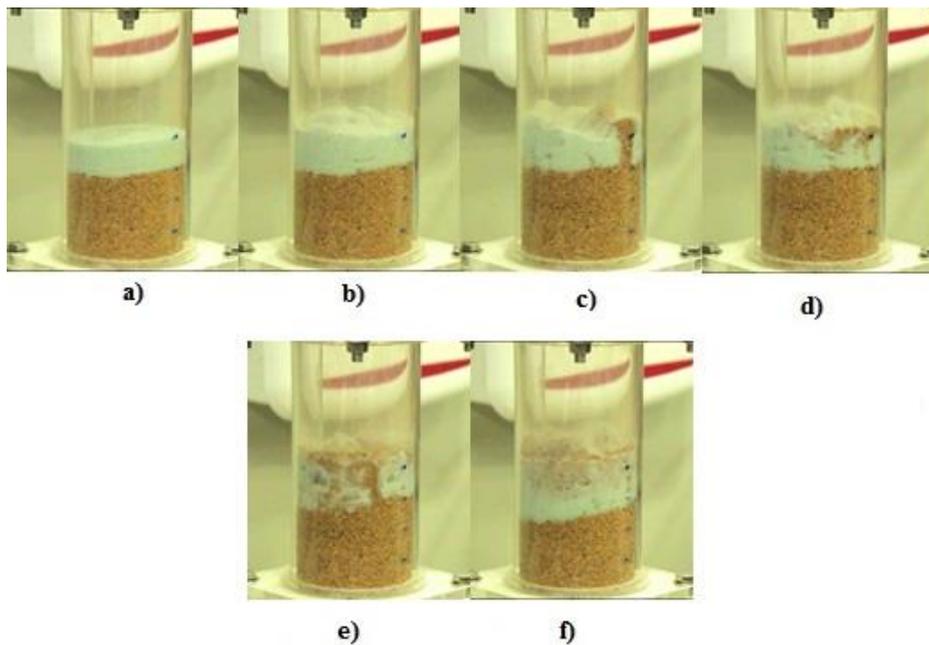


Fig. 4.22: Diferentes etapas en la fluidización del lecho

4.3.7 Experimento 7:

En este experimento la presión usada es 3 veces la presión de fluidización (45 psi) con proporción 75/25 % de microsferas/cáscara de nuez, se tuvo una mezcla más rápida que

las anteriores, se produjo una mezcla heterogénea teniendo igualmente una tendencia de las microesferas de depositarse en las paredes del lecho.

4.3.8 Experimento 8:

Este experimento fue con una proporción 50/50, se tuvo una mezcla más rápida durante el tiempo de fluidización. La mezcla quedó heterogénea.

4.3.9 Experimento 9:

Este experimento fue con una proporción 25/75 de microesferas/cáscara de nuez, se tuvo al final una mezcla heterogénea del lecho.

4.3.10 Experimento 10:

En este experimento se tiene una proporción 75/25 de material a una presión de 45 psi, cambiando la condición inicial teniendo un lecho completamente mezclado al inicio del experimento. Se observó el movimiento de las partículas dentro del lecho teniendo al final del tiempo de fluidización un patrón de segregación en las paredes del reactor. Se pudo observar igualmente una tendencia de segregación del lecho en la parte superior donde se depositaron las nueces mientras que las microesferas empezaron a caer por las paredes.



Fig. 4.23: lecho con estado inicial mezclado

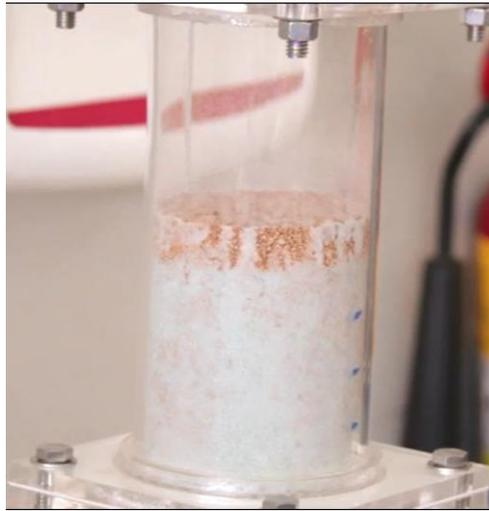


Fig. 4.24: lecho con estado inicial mezclado al final del proceso de fluidización

4.3.11 Experimento 11:

En este experimento se tiene una proporción 50/50 de material a una presión de 45 psi, igualmente cambiando la condición inicial teniendo un lecho completamente mezclado al inicio del experimento. Se observó la fluidización del lecho y se mantiene una mezcla heterogénea del mismo a lo largo del tiempo de fluidización. Se observan patrones de segregación al igual que en el experimento 10.



Fig. 4.25: Lecho completamente mezclado antes de ser fluidizado



Fig. 4.26: Lecho completamente mezclado después de ser fluidizado

4.3.12 Experimento 12:

En este experimento se tiene una proporción 25/75 de material a una presión de 45 Psi, igualmente cambiando la condición inicial teniendo un lecho completamente mezclado al inicio del experimento. Se realiza igualmente las observaciones del proceso de fluidización dentro del lecho teniendo un resultado parecido al de los experimentos 10 y 11.



Fig. 4.27: Lecho Fluidizado con condiciones iniciales de lecho mezclado

4.4 Análisis de los Resultados

Los resultados observados fueron similares en la mayoría de los experimentos, teniendo por otro lado los casos en que no todo el lecho quedó mezclado.

Las condiciones iniciales de lecho completamente segregado o completamente mezclado no tienen incidencia en el resultado.

En todos los casos se produjo una mezcla del lecho teniendo una tendencia de los materiales a depositarse en las paredes del reactor, el caso de las microesferas, o en la superficie del lecho como es el caso de la cáscara de nuez. Esto se debe a la diferencia de densidades entre los materiales del lecho.

El diseño matricial del distribuidor tuvo incidencia en la manera que se fluidizó el lecho ya que se vieron patrones de flujo en las paredes del lecho, con zonas muertas (lugares donde no hubo flujo de aire por el diseño del distribuidor)

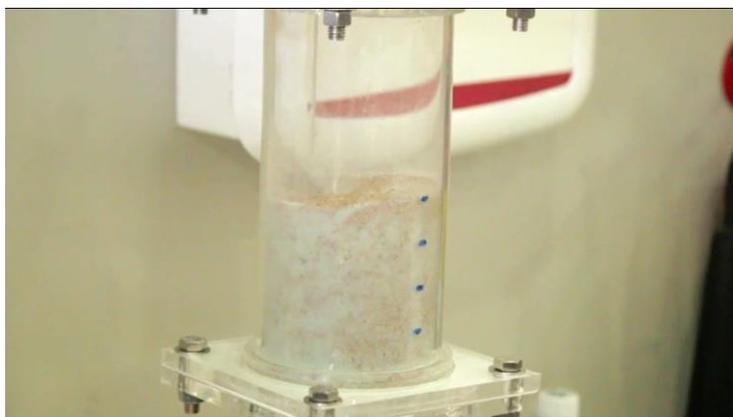


Fig. 4.28: Lecho fluidizado experimento 1

En todos los experimentos se pudo ver una mezcla del material con depósito de microesferas en las paredes del lecho. La cáscara de nuez tendió a concentrarse en el centro del lecho y en la superficie.

Capítulo 5: Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

- Se realizó el diseño del reactor de lecho fluidizado con el software Autodesk Inventor Professional 2015. El reactor funciona de acuerdo a las necesidades presentadas en el proyecto, se puede observar fácilmente los fenómenos de fluidización, mezcla y segregación del lecho, éste último se observa con un poco de dificultad ya que la naturaleza del lecho es opaca y no se puede apreciar la mezcla de materiales en el centro del reactor.
- El diseño del distribuidor ocasionó que existan zonas muertas dentro del reactor lo que ocasiona un pobre contacto entre el material y el gas, que puede ocasionar bajas en los rendimientos de los reactores a nivel industrial.
- La mezcla de los materiales ocurre progresivamente dentro del lecho, se pudo ver como cada material dentro del lecho tenía un comportamiento propio y hacia el final se comportaban ambos como un solo fluido. Se pudo ver como la mezcla se producía en un proceso de capas entre las microesferas y las cáscaras de nuez teniendo una mezcla heterogénea al final.
- Se puede ver un grado de segregación en el proceso de mezclado, al ser una mezcla heterogénea tanto las microesferas como la cáscara de nuez tendieron a juntarse en las paredes del lecho y el centro del mismo respectivamente debido a su diferencia de densidades.
- Se pudo observar un patrón de movimiento en cascada de las partículas en las paredes del lecho haciendo que las microesferas que se depositaban en las mismas caigan al fondo para ser levantadas de nuevo por el flujo de aire proveniente del plenum.

5.2 Recomendaciones

- Se recomienda tener un medidor de caudal, se quiso adquirir uno para el presente proyecto pero por razones económicas no se pudo realizar la compra de uno.
- El sensor de presión tuvo un rango muy amplio de medición (0-100 Psi) por lo que no se pudo utilizar en el proyecto, por lo cual se recomienda adquirir uno que tenga un rango más cerrado de medición para poder tener una lectura adecuada de la presión dentro del reactor.
- Se recomienda un segundo distribuidor para comparar los comportamientos de las partículas al ser fluidizadas mediante dos distribuidores diferentes.
- Se recomienda realizar un proceso de molienda más definido para las cáscaras de nuez ya que al ser usadas para granallado no se pudo llegar al tamaño deseado en un principio. El tamaño deseado no se encontró en el mercado local.

Capítulo 6: Bibliografía

- ACS. (18 de Enero de 2015). *The Fluid Bed Reactor*. Obtenido de American Chemical Society:
<http://www.acs.org/content/acs/en/education/whatischemistry/landmarks/fluidbedreactor.html>
- Amazon. (2015). Obtenido de
http://www.amazon.com/gp/product/B00NIK9E10?psc=1&redirect=true&ref_oh_aui_detailpage_o01_s00
- Autores, V. (2013). *Capítulo 5: Fluidización*. Obtenido de Procesamiento de Sólidos: Procesamiento de Alimentos II:
<http://www.criba.edu.ar/cinetica/solidos/Capitulo5.pdf>
- Barreira Moreno, V. M. (2007). *Estudio Hidrodinámico de un Lecho Fluidizado*. Obtenido de Universidad Carlos III de Madrid e-Archivo: http://e-archivo.uc3m.es/bitstream/handle/10016/1161/pfc_lecho_fluidizado.pdf?sequence=1
- Baterias Gatell. (2015). Obtenido de
<http://www.bateriasgatell.com/productos/valvuleria/valvula-de-esfera/35>
- Cabrera, A. (24 de Mayo de 2004). *El efecto de la temperatura de operación sobre el proceso de secado en un lecho fluidizado a vacío empleando vapor sobrecalentado para diferentes tipos de partículas*. Obtenido de Colección de Tesis Digitales de la Universidad de las Américas de Puebla:
http://catarina.udlap.mx/u_dl_a/tales/documentos/lim/cabrera_v_a/capitulo3.pdf
- Conesa, J. (2010). *Reactores de Lecho Fluidizado*. Obtenido de Universidad de Alicante: rua.ua.esdspace/bitstream/10045/152966/Tema6_rlf_RUA.pdf
- Escudero, D. R. (2014). *Characterization of the hydrodynamic structure of a 3D acoustic fluidized bed*. Obtenido de Graduate Theses and Dissertations:
<http://lib.dr.iastate.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=4935&context=etd>
- Fogler, S. (2006). *Elements of Chemical Reaction Engineering*. New Jersey: Prentice Hall PTR. Obtenido de
<http://www.umich.edu/~elements/12chap/html/FluidizedBed.pdf>
- Keller, N. K. (2012). *Mixing and segregation in 3D multi-component, two-phase fluidized beds*. Obtenido de Graduate Thesis and Dissertations:
<http://lib.dr.iastate.edu/etd/12593/>
- Ottino, J. M., & Khakhar, D. V. (2000). *Mixing and Segregation of Granular Materials*. Obtenido de Northwestern University: http://mixing.chem-biol-eng.northwestern.edu/papers/arfm/Ottino_ARFM_00.pdf
- Suleiman, Y., Ibrahim, H., Anyakora, N., Mohammed, F., Abubakar, A., Aderemi, B., & Okonkwo, P. (5 de Mayo de 2013). *Design and Fabrication of Fluidized Bed Reactor*. Obtenido de International Journal of Engineering and Computer Science: <http://ijecs.in/ijecsissue/wp-content/uploads/2013/05/24-ijecsmay.pdf>

Truper. (2015). *Truper*. Obtenido de
<https://www.truper.com/CatVigente/buscador.php?pagina=2&palabra=MANGUERA%20AIRE%20COMPRIMIDO&limitInf=0>