

“DIMENSIONAMIENTO DE UN CONTACTOR SPOUTED BED CÓNICO A ESCALA DE LABORATORIO”

NATHALIA FERNANDA NARIÑO APARICIO

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PAMPLONA 2016



Una universidad *incluyente* y *comprometida* con el desarrollo integral

“DIMENSIONAMIENTO DE UN CONTACTOR SPOUTED BED CÓNICO A ESCALA DE LABORATORIO”

NATHALIA FERNANDA NARIÑO APARICIO

PROYECTO DE GRADO
Trabajo presentado para optar al título de Ingeniero Químico

Dirigida por:

EDWIN GUSTAVO FUENTES
Ingeniero Químico, M.Sc., Ph.D.

UNIVERSIDAD DE PAMPLONA
FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA AMBIENTAL, CIVIL Y QUÍMICA
PROGRAMA DE INGENIERÍA QUÍMICA



PAMPLONA 2016



DEDICATORIA

“A mi familia por el apoyo incondicional y motivación durante mi etapa de formación universitaria, tanto en el aspecto académico como en lo personal, gracias a ustedes aprendí a defender mis sueños y cumplir mis metas, superando los obstáculos y aprendiendo constantemente sobre la vida.”



	Acta de Sustentación de Trabajo de Grado-Pregrado	Código	FGA-72 v.06
		Página	1 de 1

PROGRAMA: INGENIERÍA QUÍMICA

MODALIDAD DE TRABAJO DE GRADO

- Investigación Pasantía de Investigación Docencia Práctica Empresarial
 Recital de Grado Diplomado Práctica Integral Articulación Posgrado

EL JURADO CALIFICADOR CONFORMADO POR: (Nombres, apellidos y documento de identidad).

JURADO 1: Sandra Milena Zambrano Contreras / C.C: 63531021
JURADO 2: Erik German Yanza Hurtado / C.C: 76316177
JURADO 3: Edwin Gustavo Fuentes Ordoñez / C.C: 91490348

EN SU SESIÓN EFECTUADA EN: AULA TIC DE LA FACULTAD DE INGENIERÍAS Y ARQUITECTURA A LAS 09:30
HORAS, DEL DÍA 15 **DEL MES** Diciembre **DEL AÑO** 2016

Terminadas sus deliberaciones, y en cumplimiento de las normas y acuerdos de los órganos de dirección de la Universidad de Pamplona, se ha llegado a la siguiente conclusión:

Primera Conclusión: Otorgar la Calificación de: 4.5 (en números)

- Meritorio (>=4.51) Excelente (>=4, <=4.49) Aprobado (>=3, <=3.99) Incompleto (<=2.99)

AL TRABAJO DE GRADO TITULADO: DIMENSIONAMIENTO DE UN CONTACTOR SPOUTED BED CÓNICO A ESCALA DE LABORATORIO

AUTOR(ES): Número de Autores (1)

Nombres:	<u>NATHALIA FERNANDA NARIÑO APARICIO</u>	COD.	<u>1098725907</u>
Nombres:		COD.	
Nombres:		COD.	

DIRECTOR Y/O TUTOR: Edwin Gustavo Fuentes Ordoñez /C.C: 91490348

Segunda Conclusión: Emitir los siguientes criterios

No.	DESCRIPCIÓN	RECOMENDAR	
		SI	NO
1.	Recomendar para presentar en eventos.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
2.	Recomendar para publicación.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>
3.	Recomendar para ser continuado en otros trabajos.	<input checked="" type="checkbox"/>	<input type="checkbox"/>

Otras:

Tercera Conclusión: Avalar el cumplimiento del Trabajo de Grado, para optar por el Título de INGENIERA QUÍMICA

Firmas del Jurado Calificador:

 JURADO 1  JURADO 2  JURADO 3
 Director Comité Trabajo de Grado  Director Unidad Académica

Nota: Diligenciar debidamente todos los espacios requeridos en el formato.



TABLA DE CONTENIDO

TABLA DE CONTENIDO	I
ÍNDICE DE FIGURAS.....	III
INDICE DE GRAFICOS.....	IV
INDICE DE TABLAS	V
RESUMEN.....	VI
ABSTRACT	VII
1 INTRODUCCIÓN	1
1.1 Planteamiento del problema y justificación.....	3
1.2 Objetivos.....	4
1.2.1 Objetivo principal.....	4
1.2.2 Objetivo específicos	4
2 MARCO TEÓRICO	5
2.1 El fenómeno de fluidización	5
2.2 Comportamiento de lecho fluidizado.....	6
2.3 Comportamiento del Fluido en un Lecho Fluidizado	8
2.4 Calidad de fluidización.....	9
2.5 Clasificación de Geldart.....	10
2.6 Propiedades de las partículas de fluidización	11
2.7 Regímenes de fluidización	12
2.8 Reactor de lecho de flujo circulante.....	14
2.9 Ventajas y desventajas	16
2.10Aplicaciones industriales de la fluidización	18
3 METODOLOGÍA	20
3.1 Condiciones de operación y factores geométricos	20
3.1.1 Relación diámetro de entrada / diámetro inferior del	
cono (D_o / D_i).....	21
3.1.2 Ángulo del cono (γ).....	21
3.1.3 Relación de diámetro entrada / diámetro de partículas (D_o / d_p). ..	21



3.1.4	Altura máxima del lecho circulante	21
3.1.5	Altura mínima lecho	22
3.1.6	Diámetro de la columna (D_c).....	23
3.1.7	Distribuidor de gas.....	24
3.2	Hidrodinámica del lecho	26
3.3	Descripción del comportamiento de un lecho fluidizado según el modelo de kunii y levenspiel	27
3.2.1	Velocidad de burbuja y el tamaño de la nube.....	28
3.2.2	Tamaño de la burbuja	29
3.3	Decisiones de diseño para escalado	29
3.3.1	Selección de tipo de lecho y el tamaño de las burbujas.....	29
3.3.2	Relación de aspecto del lecho (relación altura-diámetro)	30
3.3	Descripción del proceso.....	30
4	RESULTADOS Y ANÁLISIS.....	32
4.1	Dimensionamiento del reactor	32
4.2	Implementación de prototipo de fluidización	36
4.2.1	Hidrodinámica de prototipo de fluidización.....	37
4.3	Mapas de operación.....	39
4.4	Velocidad mínima Y Caída De Presión	41
4.5	Comparación entre el burbujeo de lecho fluidizado y lecho de flujo circulante	44
5	CONCLUSIONES	46
6	RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS.....	47
7	REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS	48
8	ANEXOS	53
8.1	Anexo A. Diseño conceptual: Vista lateral, superior, inferior e isométrico de difusor	53
8.2	Anexo B. Diseño conceptual: Vista lateral, superior, inferior e isométrico de contactor cónico	54
9	NOMENCLATURA.....	48



ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1: Zonas y funcionamiento del reactor	7
Figura 2: Representación esquemática de regímenes de fluidización	13
Figura 3: Esquema típico reactor de flujo circulante.....	15
Figura 4: Tipos de difusores	25
Figura 5: Isométrico diseño conceptual de difusor	34
Figura 6: Isométrico diseño conceptual del contactor	35
Figura 7: Prototipo (Fluidizador) con base y compresor	36
Figura 8: Evolución de la secuencia fotográfica de un proceso de expulsión de chorros	37



INDICE DE GRÁFICOS

Gráfico 1: Efecto de la velocidad del gas en la caída de presión	6
Gráfico 2: Clasificación de las partículas según Geldart por peso y tamaño 10	
Gráfico 3: Diagrama Caída de Presión EPS 1	39
Gráfico 4: Diagrama Caída de Presión EPS 2.....	40
Gráfico 5: Diagrama Caída de Presión Espuma 1	40
Gráfico 6: Diagrama Caída de Presión Espuma 2.....	41
Gráfico 7: Efecto de La altura del Lecho Fijo en $(Reo)ms/Ar^{0,5}$ para EPS 1 y2.....	42
Gráfico 8: Efecto de La altura del Lecho Fijo en $(Reo)ms/Ar^{0,5}$ para Espuma de polietileno 1 y 2.....	42
Gráfico 9: Efecto de La altura del Lecho Fijo en $-\Delta Ps/Hopbg$	43



INDICE DE TABLAS

Tabla 1: Correlaciones para contactores cónicos	27
Tabla 2: Características Solido N°1 y Tabla 3: Características Solido N°2..	31
Tabla 4: Características Solido N°4 y Tabla 5: Características Solido N°5...	31
Tabla 6: Relación D_o/D_i	32
Tabla 7: Relación D_o/d_p	32
Tabla 8: Cálculo altura lecho	33
Tabla 9: Cálculo diámetro contactor	33
Tabla 10: Cálculo altura cono	33
Tabla 11: Dimensionamiento Reactor lecho fluidizado	34
Tabla 12: Presupuesto prototipo	37



RESUMEN

En estudios previos sobre el diseño de reactores cónicos de lecho fluidizado, se ha determinado la importancia de su uso actualmente en investigación y optimización de procesos industriales como la polimerización catalítica, gasificación de carbón y pirolisis de residuos, los cuales tiene aplicabilidad en el sector energético y ambiental, resaltando su importancia en la generación de nuevas opciones de diseño e implementación para energías alternativas. Surge el propósito desde el punto de vista investigativo y como apoyo a los docentes del programa de ingeniería química de la universidad de pamplona, contar con un prototipo realizado para mostrar el correcto diseño de un dispositivo para el desarrollo del flujo circulante y observar los regímenes presentes en un reactor cónico que pone en contacto una fase gaseosa y una sólida, con ventajas sobre otros sistemas, ya que por su diseño se presenta mayor transferencia de masa y energía. Teniendo en cuenta el régimen hidrodinámico activo del sistema para el cálculo de las dimensiones del equipo, se valida el diseño conceptual mediante la elaboración de un ejemplar en acrílico y se realizó un trabajo experimental para garantizar la influencia de la caída de presión y el caudal de aire como parámetros para describir el comportamiento de las partículas y el fluido en el proceso de fluidización.



ABSTRACT

In previous studies on the design of conical fluidized bed reactors, the importance of their use in research and optimization of industrial processes such as catalytic polymerization, coal gasification and pyrolysis of waste have been determined, which have application in the energy sector And environmental, highlighting its importance in the generation of new design and implementation options for alternative energies. The purpose arises from the research point of view and as the support to the teachers of the program of chemical engineering of the University of Pamplona, counting on a prototype realized to show the good design of a device for the development of the circulating flow and to observe the regimes In a conical reactor that comes into contact with a gaseous phase and a solid phase, with advantages over other systems, because of its design presents greater transfer of mass and energy. Taking into account the active hydrodynamic regime of the system for the calculation of the dimensions of the equipment, the conceptual design is validated by the production of an acrylic specimen and an experimental work was carried out to guarantee the influence of the pressure drop and the flow rate of Air as parameters to describe the behavior of the particles and fluid in the fluidization process.



1 INTRODUCCIÓN

La fluidización es uno de los métodos más utilizados para poner en contacto sistemas de sólidos con tamaño de partícula gruesa y uniforme con un fluido. Dicho proceso se ve afectado por la presencia de burbujas en el lecho que limitan la circulación óptima de las partículas, a pesar de la versatilidad de los lechos fluidizados constituidos por estructuras geométricas convencionales (cilíndrica con base cónica), hay situaciones en las que el contacto gas-sólido no es completamente satisfactorio¹. Estas condiciones se presentan para los casos de tratamiento de sólidos que son adherentes o que tienen distribución de tamaño de partícula, denominados factores de proceso de acondicionamiento ya que son las características físicas del sólido que influyen el tiempo de residencia del gas. Por lo tanto, los lechos cónicos en régimen de flujo circulante, hacen que las características del sólido ya no sean limitantes y, al mismo tiempo, la velocidad del gas pueda ser alta.

El término de "lecho fluidizado" fue dado a esta técnica por Gishler y Nathur que iniciaron el desarrollo la temática en 1954 en el Consejo Nacional de Investigación de Canadá. Sobresaltando su importancia en el manejo de materiales granulares y variedad de procesos que implican el manejo de sólidos gruesos, como el secado de pastas, la granulación de fertilizantes y otros productos, pirolisis de residuos y la carbonización, algunas de estas aplicaciones con impacto industrial y comercial valioso². La expansión de lechos fluidizados en contactores cónicos da paso a un régimen circulante particular, debido a que tiene condiciones de funcionamiento y características hidrodinámicas específicas logrando una operación estable, para las que las técnicas de contacto pueden ser importante. La difícil delimitación de las condiciones de funcionamiento estables, que son más sensibles a las condiciones de funcionamiento que el régimen para reactores convencionales y las peculiaridades hidrodinámicas atribuidas a la geometría del lecho, a excepción de las limitaciones de estabilidad, y altura mínima del lecho, por debajo del cual se espera que la superficie superior del lecho pueda fluidizar.

El régimen en circulante en recipientes de contacto para lechos cónicos podría considerarse un método de contacto no convencional, por tanto se estipulan pasos para su análisis que implican inicialmente la definición de los distintos regímenes de la expansión durante el proceso de fluidización y la delimitación de sus parámetros hidrodinámicos, posteriormente deben delimitarse las condiciones de operación estables para finalmente realizar una comparación de la aplicabilidad con la de los métodos de contacto convencionales. La comprensión y la modelización de lechos cilíndricos fluidizados no es aplicable para éste tipo de configuraciones geométricas.³

Teniendo en cuenta los antecedentes mencionados anteriormente y la sobresaliente aplicación de los diversos conceptos y procesos que se pueden emplear inherentes a los contactores cónicos de lecho fluidizado, es de vital



importancia orientar a los estudiantes hacia una expansión del conocimiento con procesos que impliquen tecnologías y equipos de última generación, involucrándolos en el proceso de aprendizaje y aplicación de conocimientos, que justifiquen la magnitud y uso de los temas tratados durante las clases de las materias de ciclo profesional en el programa de ingeniería química, logrando una dinámica de estudio que empodere al alumno de conocimientos con mayor propiedad y los lleve a la práctica en un contexto real, observando de manera tangible los fenómenos físicos y químicos aprendidos, a nivel experimental. Por tanto se plantea el dimensionamiento del equipo con el objetivo de facilitar la transferencia de masa y energía entre una fase fluida y una sólida, mediante la formación de un lecho fluidizado circulante, los parámetros bajo los que se plantea son un fluido gaseoso (aire) y un sólido (plásticos residuales y biomasa). Validando el diseño mediante la construcción de dicha unidad para verificar su correcta operación y en un futuro concretar su compra o construcción y ser utilizado en fines investigativos. Incentivando a posteriores investigaciones en el grupo nascente de investigación en ingeniería química que pretende trabajar en temas de energías renovables; éste proyecto mediante el dimensionamiento de éste contactor abre la puerta hacia temas específicos como el secado de lodos de PTAR, la valorización de biomasa, la gasificación de carbón, la valorización de plásticos, entre otros; todos estos procesos enfocados hacia la obtención de energía.

Se destaca durante el desarrollo del presente trabajo de grado, una búsqueda de fundamentación teórica continua, en la cual se localizó la información en bases de datos, artículos de revistas científicas y handbook de reconocidas universidades, los cuales fueron evaluados para encontrar los parámetros de diseño, fundamentales para el dimensionamiento del equipo de acuerdo a la geometría cónica seleccionada por su eficiente transferencia de masa y transferencia de energía durante los procesos efectuados en el equipo. Posteriormente se planteó un diseño conceptual del equipo, en el cual se realizaron cálculos de las dimensiones del contactor cónico, diámetro de entrada (D_i), diámetro inferior (D_o), diámetro de la columna (D_c), altura del cono (H_c), ángulo de inclinación (γ), altura del cilindro (H), altura de cilindro difusor (H_i), como evidencia de ésta etapa se realizaron los diagramas de diseño en diferentes vistas, en las cuales se identifiquen las dimensiones obtenidas y el esquema gráfico de cómo se espera que quede manufacturada la unidad, cabe aclarar que no se ejecutaran reacciones químicas en el prototipo, pero desde el punto de vista docente e investigativo se muestra el correcto diseño de un equipo para un flujo circulante para un sistema sólido – Aire.

Ya que no se trata de un contactor convencional, ésta clase de diseños no pueden ser probados en simuladores comerciales y su modelado matemático implicaría un trabajo alto que no se encuentra en los alcances de la tesis, por tal razón la confirmación del diseño se realizó mediante la elaboración de un prototipo; se construyó un recipiente cónico en acrílico con las dimensiones previamente



halladas, fundamentadas en relaciones teóricas encontradas en fuentes bibliográficas, se soportó en una base metálica de apoyo y se le instalaron como medidores de flujo y presión, un rotámetro y un manómetro respectivamente. Para la puesta en marcha del equipo se contó con un compresor de tanque con 3.5 HP de potencia, al que se le adaptó un sistema de regulación de flujo. Con el propósito de analizar el comportamiento de las variables de operación se realizaron pruebas de fluidización para encontrar las condiciones óptimas durante la manipulación del equipo, seleccionando tipos de materiales con diferentes densidades y tamaños para las pruebas experimentales comparativas. Se resalta la importancia de las observaciones realizadas para cada caso, ya que el comportamiento del sólido puede verse en la transición de lecho fijo a fluidizado y analizar los datos obtenidos con los medidores analógicos dispuestos a la salida lateral del recipiente que nos permitieron obtener diagramas en función de la caída de presión y el flujo de aire suministrado. A modo de conclusión con la recopilación de datos y los fundamentos previos se describe el rango de operación óptimo para el equipo, con el propósito de establecer un precedente para posteriores adaptaciones de acuerdo a aplicaciones específicas a nivel investigativo.

El trabajo de grado que se desarrolla en este documento se ejecutó en la modalidad de investigación, concretando un estudio que permitió la solución de un problema de carácter práctico y que representa beneficios en diferentes áreas del conocimiento. Ésta clase de estudios se encamina hacia un inicio en el conocimiento de un fenómeno por parte del grupo de investigación en Ingeniería química de la Unipamplona, lo que hace posible precisar mejor un problema de investigación; siendo frecuente su uso en el inicio de cualquier proceso científico, o cuando se quiere explorar algún tópico que ha sido tratado para ser explicado posteriormente desde el punto de vista cognoscitivo con la finalidad de describir y estimar parámetros. Se obtiene información acerca de un proceso, para puntualizar sus implicaciones, dirigido a dar una perspectiva de cómo opera y cuáles son sus características.

Según las áreas de desarrollo del trabajo de grado que se encuentra concernientes con las funciones de cada profesional y su desempeño en la ingeniería química, de acuerdo con la modalidad descrita previamente se planteó ligado con el proceso investigativo, una propuesta de diseño de un equipo para la fluidización de sólidos en un flujo circulante impulsado por medio de aire, que se pretende implementar y operar en el laboratorio de operaciones unitarias de la universidad de Pamplona al servicio de los estudiantes durante los procesos de aprendizaje e investigación en su proceso de formación académica.

1.1 Planteamiento del problema y justificación

Debido al impacto del desarrollo de nuevas investigaciones en temas de tendencia



actual usando contactores de lecho fluidizado y su ejecución en procesos que implican operaciones de secado, gasificación, pirolisis entre otros que permitirán valorizar energéticamente la biomasa y algunos residuos sólidos.

El programa de ingeniería química de la universidad de Pamplona no cuenta actualmente con un equipo experimental de lecho fluidizado gas-sólido; por tanto se realizó el dimensionamiento de un contactor de lecho fluidizado y se construyó un fluidizador con las dimensiones del diseño conceptual para observar el comportamiento del sistema y demostrar la validez de los factores geométricos, con el propósito de ser utilizado en fines académicos e investigativos, contribuyendo así a la formación de futuras generaciones de estudiantes en el programa e incentivando a posteriores investigaciones utilizando el contactor valiéndose de las múltiples aplicaciones a nivel industrial y la comprobación en el laboratorio de teorías y modelos mediante el planteamiento de prácticas.

1.2 Objetivos

1.2.1 Objetivo principal

Proponer el dimensionamiento de un contactor de lecho cónico de flujo circulante, para un sistema gas-sólido a escala de laboratorio y mediante un prototipo experimental comprobar su correcta operación durante el proceso y la presencia de los regímenes de fluidización con partículas de diferentes densidades y tamaños.

1.2.2 Objetivo específicos

- Estudiar el dimensionamiento para el contactor de acuerdo a los antecedentes y el marco conceptual, teniendo en cuenta las variables teóricas más importantes y llevando a cabo la conceptualización de ecuaciones e identificación de componentes propios de la unidad, según la bibliografía.
- Con las dimensiones encontradas verificar el diseño conceptual mediante la construcción de un equipo que realice la fluidización de diferentes sólidos mediante pruebas experimentales en las cuales se determinen la presencia de los regímenes de flujo para el sistema.
- Analizar la operación del contactor con pruebas realizadas para comprobar su similitud con la literatura.



2 MARCO TEÓRICO

En éste segmento se pretende realizar un preámbulo al fenómeno de fluidización, definiendo las principales características de su comportamiento y los diferentes estados en que puede presentarse, delimitando la influencia de las propiedades de las partículas sometidas a fluidización y de la formación de burbujas en el lecho, que tiene lugar en muchas de las aplicaciones y es la base de varios estudios de caracterización hidrodinámica ⁴. Analizando finalmente los aspectos favorables y desfavorables de la fluidización y, además, ciertos factores que pueden afectar a su calidad. Finalmente, se describen algunas aplicaciones de la fluidización en distintos sectores de la industria.

Existen diversos tipos de reactores entre los que se encuentran los reactores homogéneos o de una sola fase y los reactores heterogéneos que involucran la presencia de dos fases o más, en el segundo grupo de la clasificación anteriormente mencionada se encuentran los reactores de lecho fluidizado, que se emplean para sistemas donde se involucre la presencia de un sólido y un fluido. En términos de operaciones unitarias implicadas en el funcionamiento de éstos, la fluidización describe propiamente el comportamiento de contacto entre dos fases que realizan transferencia de calor y de masa entre ellas⁵. Por tanto la fluidización se describe como el fenómeno en el cual un lecho de partículas sólidas se suspende en el seno de un fluido, adquiriendo un comportamiento semejante a éste.

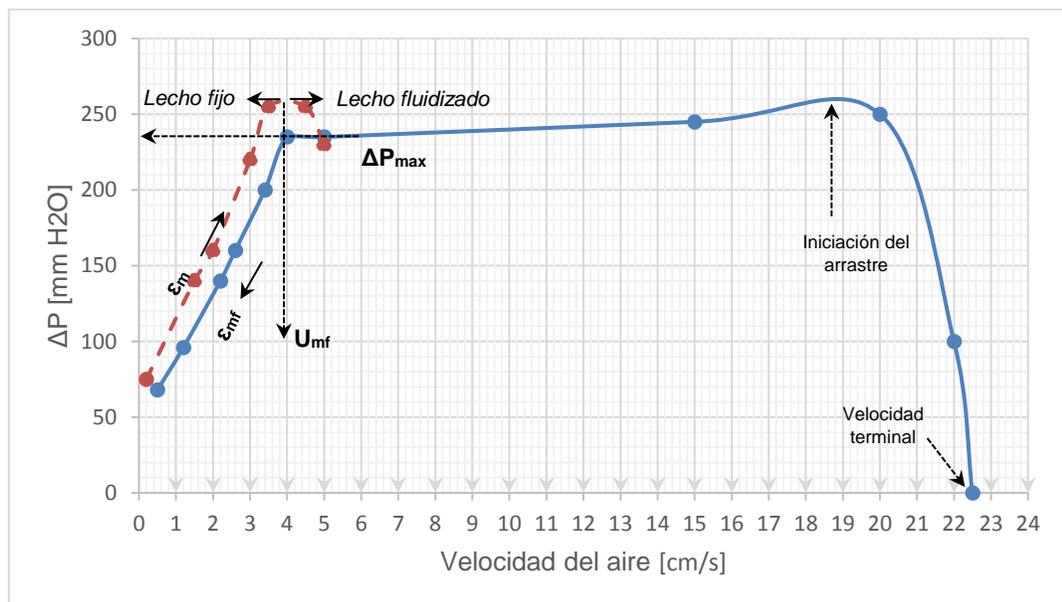
2.1 El fenómeno de fluidización

El mecanismo se presenta cuando un fluido a baja velocidad asciende a través de un lecho de partículas estáticas, inicialmente el fluido pasa entre los espacios de las partículas pero éstas permanecen sin movimiento, al aumentar la velocidad del fluido las partículas se desplazan de forma individual, hasta un punto en que por acción de la velocidad todas las partículas quedan suspendidas en el fluido y por tanto hay un equilibrio entre la fuerza de fricción para el sistema sólido-gas y el peso de las partículas, dando lugar a la denominada velocidad mínima de fluidización (U_{mf}), que marca el comienzo del estado de fluidización y representa la transición entre el lecho fijo y el lecho fluidizado completamente.⁶ Habitualmente, el comportamiento de los lechos fluidizados por gas es diferente que los fluidizados por líquido, en el primer caso cuando se aumenta la velocidad de gas por encima de la U_{mf} . Se observa la aparición de canales, la agitación suele ser más violenta y las partículas se mueven fuertemente sin producirse una expansión del lecho evidenciándose así el lecho burbujante.



En el proceso descrito previamente se obtienen coeficientes de transferencia de calor elevados y disminución en la superficie de transferencia de masa, observándose una expansión en el lecho hasta un estado de movimiento constante obteniéndose así el lecho fluidizado⁷. Dicho comportamiento se representa mediante un diagrama de pérdida de presión en función de la velocidad del fluido (ver Gráfico 1). La fluidización está influenciada por las características del sólido y también depende de las propiedades físicas del fluido y su velocidad superficial. Este fenómeno tiene en cuenta la relación entre la caída de presión y tasa de flujo de aire a través de una sección del lecho, como se muestra esquemáticamente en el siguiente diagrama.

Gráfico 1: Efecto de la velocidad del gas en la caída de presión



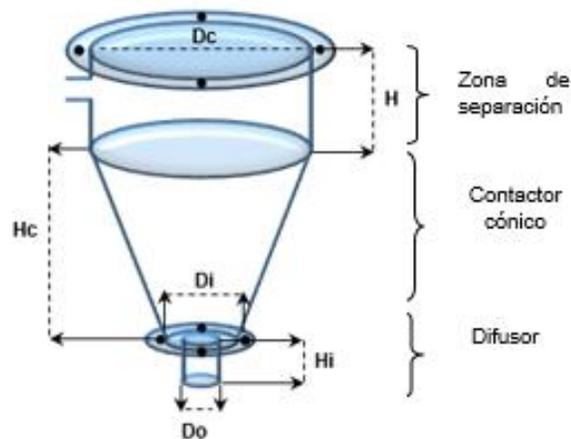
Fuente: Kunii, D., Levenspiel, O.

2.2 Comportamiento de lecho fluidizado

Es de suma importancia anterior a definir las partes de un contactor de lecho fluidizado, partir de la premisa que el gas ingresa a través de una rejilla denominada distribuidor cuya función es suministrar una fluidización estable a través del área transversal del contactor creando una caída de presión, puede ser monorificio, multiorificio o una placa porosa⁸⁻⁹. Previo se encuentra la cámara de distribución con el propósito de abastecer el gas al distribuidor de manera

uniforme, los sólidos depositados sobre la rejilla que constituyen el lecho fijo inicialmente y su nivel determina la altura del lecho, que varía en función del proceso, la velocidad del gas y sus propiedades al igual que las características del sólido. La una zona de distribución del gas constituye la parte inferior del contactor, compuesta por los dos componentes mencionados anteriormente que realizan el suministro de las burbujas del gas, produciendo el desplazamiento de las partículas del lecho inicialmente fijo. El gas entra en el lecho a través de una pequeña abertura en el centro de una base cónica, en lugar de a través de un distribuidor uniforme. El chorro de gas a alta velocidad provoca que una corriente de sólidos se eleve rápidamente en un núcleo central hueco dentro del lecho. Las partículas después de haber alcanzado un nivel por encima del lecho caen de nuevo en el espacio anular entre el tubo de salida y la pared del recipiente y descienden por el lecho. Convirtiéndose así el lecho en una salida central, en el que las partículas se mueven hacia arriba en una fase diluida, y hacia abajo en una fase densa en movimiento en contracorriente de gas. Finalmente se forma un patrón de sistema cíclico de movimiento de sólidos, estableciéndose un contacto eficaz entre el gas y los sólidos, dando lugar a un sistema hidrodinámico único, que es más adecuado para ciertas aplicaciones que más configuraciones de fluido contenido en sólidos convencionales². (Ver Figura 1)

Figura 1: Zonas y funcionamiento del contactor



Fuente: Autor

En términos generales el diseño básico de una unidad de fluidización se compone de un recipiente, teniendo en cuenta que éste posee una sección transversal de cualquier geometría (circular, cuadrado o rectangular) con un distribuidor

perforado, que separa el volumen que sostiene los sólidos del gas. El equipo debido a su estructura presenta una rapidez en el mezclado de sólidos logrando mantener una temperatura constante en el lecho y facilitando el control del proceso y la seguridad al momento de operarlo, tiene altos flujos de reacción y por tanto logra conversiones elevadas, según su diseño y forma de suministro de alimento puede trabajar en continuo o por lotes con cargas grandes de material particulado¹⁰. Entre los elementos importantes de la fluidización se encuentra la clasificación de las partículas que está dada por el tamaño de las mismas, definido por la esfericidad y por el comportamiento de los sólidos que logran una distribución de tamaños y un diferencial de densidades en comparación al fluido en el que se encuentran suspendidas, éste parámetro para un sistema sólido-gas se encuentra descrito por la clasificación y comportamiento según Geldart.

2.3 Comportamiento del Fluido en un Lecho Fluidizado

Un lecho de partículas de fase densa fluidizado con gas se asemeja mucho a un líquido en ebullición y, en muchos aspectos, muestra un comportamiento similar al de un fluido. De esta manera, un objeto de tamaño grande y poca densidad que se sumerge en el lecho fluidizado aparece inmediatamente en la superficie al dejarlo libre y flota. Por otra parte, si se inclina el depósito la superficie superior del lecho permanece horizontal y al conectar dos lechos fluidizados independientes sus niveles se igualan. Además, la diferencia de presión entre dos puntos del lecho es proporcional a la diferencia de altura entre ellos¹¹. El lecho también tiene propiedades semejantes a las del flujo de líquidos; así, las partículas se desplazan formando un chorro a través de un orificio en la pared del depósito y pueden formar un flujo desde un depósito a otro, como si de un líquido se tratara.

El comportamiento fluido que presentan los lechos fluidizados permite idear diferentes diseños de contacto entre las partículas del lecho y el gas o el líquido, para su aplicación en diversos procesos industriales.

La fluidización es una operación en la que el lecho de partículas sólidas se transforma en un fluido debido al contacto con un fluido. El lecho fluidizado tiene como ventaja principal que ofrece una mezcla adecuada sobre los métodos convencionales hasta lograr que los sólidos que componen el lecho estén completamente suspendidos en una corriente de fluido. Varios factores afectan el comportamiento del lecho, entre los que se encuentran los siguientes parámetros que se han estudiado y determinan la calidad de la fluidización.¹²

- Velocidad mínima de Fluidificación
- Caída de presión en el lecho



- Relación de lecho de expansión
- Fluctuación de las relaciones del lecho

2.4 Calidad de fluidización

El término fluidización hace referencia tanto a sistemas de fase densa como a sistemas de fase dispersa, pero es en los primeros donde se concentran en mayor medida las tareas de investigación.

La capacidad para fluidizar de las partículas, y las condiciones de operación que lo permiten, varían mucho de unos sistemas a otros y están influidas por múltiples factores. El primero es el tamaño de los sólidos y su distribución. En general, las partículas pequeñas tienden a aglomerarse si están húmedas, con lo que el lecho se debe agitar para mantener las condiciones de fluidización. Esto se puede llevar a cabo con agitadores mecánicos o mediante la operación a velocidades del gas relativamente altas, utilizando la energía cinética del chorro de gas entrante para agitar los sólidos.¹³ Las partículas finas con una gran distribución de tamaños se pueden fluidizar en un amplio rango de velocidades de gas, permitiendo operaciones flexibles con lechos profundos y grandes.

Por el contrario, los lechos de partículas grandes con distribución de tamaños uniforme suelen fluidizar peor con aparición de sacudidas, chorros y fenómeno de slugging, lo que puede causar daños estructurales de importancia en lechos de gran tamaño. La calidad de fluidización de estos lechos se puede mejorar añadiendo pequeñas cantidades de finas partículas que harían de lubricantes. Además, las partículas grandes fluidizan en un rango de velocidades de gas mucho más estrecho. Por todo ello, se deben utilizar lechos poco profundos para fluidizar partículas de tamaños grandes.

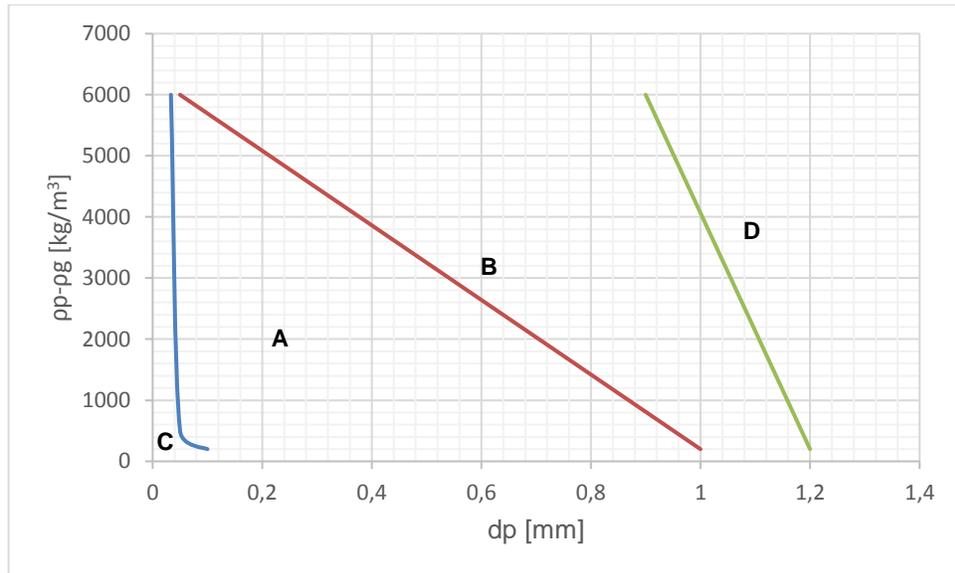
Un segundo factor, de importancia en la calidad de fluidización, es la relación de densidades entre el fluido y las partículas. Normalmente, los sistemas de líquido-sólido fluidizan de manera homogénea, mientras que los sistemas de gas-sólido suelen mostrar heterogeneidades. A pesar de ello, es posible observar comportamientos atípicos con partículas de baja densidad en gases de densidad elevada, o partículas de alta densidad en líquidos poco densos.¹⁴

Existen otros factores que pueden afectar a la calidad de fluidización, como son la geometría del lecho, los dispositivos de alimentación de gas, el tipo de partícula utilizada, o el hecho de que los sólidos puedan fluir libremente o tiendan a aglomerarse.



2.5 Clasificación de Geldart

Gráfico 2: Clasificación de las partículas según Geldart por peso y tamaño



Fuente: M. Rhodes, Introduction to Particle Technology, John Wiley & Sons (1998)

Teniendo en cuenta las propiedades del medio en el que ocurre fluidización, las características de partículas juegan un papel fundamental. En 1973 Geldart propuso un mapeo para el grupo de materiales sólidos particulados, dividiéndolos en cuatro clases según su comportamiento hidrodinámico. El Gráfico 2 muestra las diferentes regiones para sistemas de aire y sólidos en condiciones de fluidificación describiéndose así: ¹⁵

- Tipo A son denominados sólidos "aireables" con pequeño diámetro y densidad inferior a aproximadamente 1400 kg·m⁻³. El gas de fluidización se produce a velocidades más altas.
- Tipo B son denominadas "como la arena", partículas más gruesas que las anteriores, van desde 40 hasta 1000 mm y su densidad varía entre 1400 a 4000 kg·m⁻³. Presentan burbujas de fluidización vigorosas.
- Tipo C o "cohesivos", son polvos muy finos, con un diámetro inferior a 50 mm, las fuerzas entre partículas son fuertes lo que ocasiona dificultades de

fluidización.

- Tipo D "chorreantes", característico de partículas muy gruesas dentro de un rango amplio de densidad. Estos sistemas tienen alta permeabilidad, generando canalización y distribución desigual del gas, por tanto se requieren de sistemas de expulsión de gas a chorros para controlar los fenómenos que reducen la fluidización.

2.6 Propiedades de las partículas de fluidización

Para determinar la densidad de las partículas ρ_p se define como la relación entre la masa de una partícula, m_p , y su volumen hidrodinámico, V_h (Ecuación 1). Denominándose volumen hidrodinámico el observado durante la interacción entre el fluido y la partícula e incluye el volumen de todos los poros que ésta pueda tener.

$$\rho_p = \frac{m_p}{V_h} \quad (\text{Ecuación 1})$$

Cuando las partículas no presentan porosidad, se puede medir la densidad de partícula utilizando un picnómetro, pero para el caso de partículas porosas la densidad de partícula no se puede medir directamente.

Otro término que permite caracterizar el lecho de partículas, es la densidad aparente del lecho, ρ_b , que se define como el cociente entre la masa de todas las partículas que forman el lecho, m_b , y el volumen aparente, V_{ap} que es el ocupado por las partículas incluyendo los espacios vacíos entre ellas.

$$\rho_b = \frac{m_b}{V_{ap}} \quad (\text{Ecuación 2})$$

Las dos ecuaciones enunciadas anteriormente se relacionan por medio de la fracción de vacío del lecho fijo, ε , así:

$$\varepsilon = 1 - \frac{\sum V_h}{V_{ap}} \quad (\text{Ecuación 3})$$

$$\rho_b = (1 - \varepsilon) \rho_p \quad (\text{Ecuación 4})$$

Comúnmente, el término empleado para definir el tamaño de las partículas es el diámetro de partícula, d_p , para el caso de partículas no esféricas se hace una relación superficie a volumen.¹⁶⁻¹⁷



2.7 Regímenes de fluidización

Otro elemento significativo es el carácter hidrodinámico del proceso, lo que hace que su modelado matemático sea complejo, razón por la cual existen modelos estudiados e implementados que han sido desarrollados para darle explicación al proceso¹⁸. El modelo de Davidson y Harrison aplica para dos fases, una de burbujas incompresible que atraviesan el lecho y están libres de sólidos y otra fase de emulsión¹⁹. El modelo de Kuni y Levenspiel que define su comportamiento como un lecho burbujeante con la presencia de dos fases; la fase de burbuja en la que en el modelo se define el diámetro efectivo, zonas de formación y coalescencia, asumiendo un tamaño de burbuja constante en el lecho; la fase emulsión que se puede describir como una nube que rodea a las burbujas formada por una estela, el flujo de la nube es turbulento y la velocidad del gas es igual a la velocidad de burbuja²⁰. A su vez se tiene en cuenta la interacción entre las dos fases que componen el lecho, durante el que se presenta un proceso de difusión molecular en la cual se hace necesario tener en cuenta los coeficientes de transferencia de materia, un coeficiente de intercambio entre la burbuja y la nube, otro coeficiente entre la nube y la fase de emulsión.

Cuando se presentan lechos con longitud grande y diámetro pequeño, se produce el fenómeno de slugging, en el cual las burbujas denominadas slugs que llegan a ser lo suficientemente grandes como para ocupar el ancho del recipiente. Cabe destacar que éste parámetro se tiene en el proceso de diseño de lechos fluidizados largos y estrechos (Ver Figura 2)

Si la muestra a tratar está compuesta por partículas finas y se opera a una velocidad de gas elevada, se observa un evidente arrastre de partículas con un movimiento turbulento de sólidos y espacios grandes de gas, el fenómeno descrito anteriormente se denomina lecho fluidizado turbulento. Cuando la velocidad máxima de las partículas expulsadas, es superada por el gas y el material del lecho cae de nuevo, ya que es arrastrado fuera del contactor²¹. Un dispositivo de recogida de partículas sólidas, tales como un ciclón o filtros generalmente se coloca a una altura lo suficientemente elevado como para garantizar partículas de recirculación y evitar el agotamiento del lecho a medida que aumenta la velocidad.

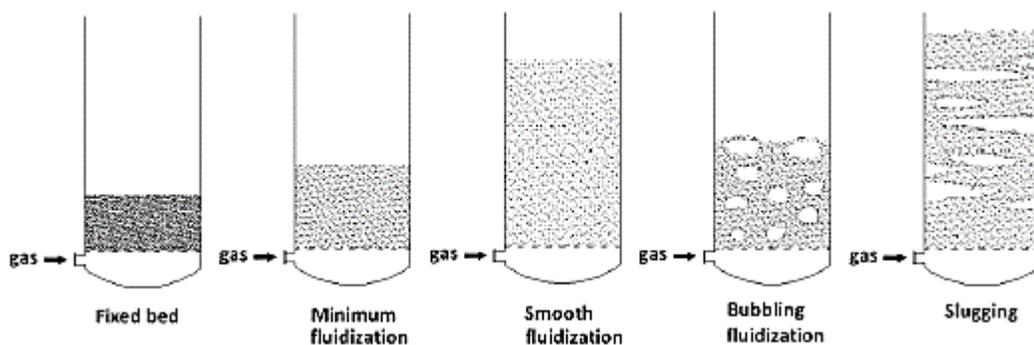
Para partículas más finas, éstas caen ligeramente hacia abajo por la pared que rodea las burbujas, originando burbujas de tamaño elevado, éste fenómeno se conoce con el nombre de slugging. Las partículas caen desde el slug, hasta que este mismo se desintegra, momento en el cual se genera un nuevo slug, repitiéndose continuamente



En los lechos fluidizados circulantes se hace necesario, para desarrollar el modo de contacto gas-sólido el lecho de chorro, en el cual un chorro de gas a alta velocidad penetra a través de un lecho de partículas, arrastrando algunas de ellas hasta la parte alta del lecho, las demás partículas caen lentamente alrededor del chorro y entre el gas que se filtra hacia arriba. Cuando se observa un comportamiento entre burbujeante y de chorro, y al sistema se le suele denominar lecho fluidizado de chorro.

Comparados con otros métodos de contacto gas-sólido, los lechos fluidizados tienen algunas propiedades características y de gran utilidad que las hacen tener mayores aplicaciones industriales de fluidización más importantes son con esta clase de sistemas. También se pueden diferir comportamiento de fluidización basado en la condición de funcionamiento del reactor; Tales como la velocidad del gas y el gas y las propiedades de sólidos.²²⁻²³

Figura 2: Representación esquemática de regímenes de fluidización



Fuente: Kunii and Levenspiel, 1991

Dependiendo del producto deseado o el efecto deseado, los reactores de lecho fluidizado pueden ser operados en los esquemas antes mencionados. Por ejemplo, debido a las muchas ventajas, reactores turbulentos de lecho fluidizado se prefieren algunas veces que reactores burbujeantes y fluidización rápida debido a su dinámica, al ponerse en contacto un gas y sólidos, hay una alta tasa de intercambio de gas entre las fases de la emulsión, y la uniformidad espacial relativa de las propiedades de flujo, ejemplos a nivel industrial incluyen la síntesis de Fischer-Tropsch y la producción de acrilonitrilo.²⁴

Arrastre de la mezcla de sólidos

En la mayoría de las aplicaciones de lecho fluidizado, el contactor ocupa el mayor volumen del reactor y por lo tanto en su diseño se tiene un cuidado especial. El contactor tiene la tarea principal de prevenir que la mayor parte de las partículas

del lecho de sean arrastradas por la corriente de gas, comprendiendo el arrastre de sólidos por encima del lecho por tanto es fundamental en el dimensionamiento de esta sección. Por otra parte, la comprensión del impacto del diámetro de éste, las propiedades de las partículas y las circunstancias de funcionamiento pueden desempeñar un papel fundamental en el diseño de la unidad.

Después de la expulsión de las partículas en el contactor, su velocidad se desacelerará gradualmente lo que llevaría a una de dos situaciones: O bien los sólidos será arrastrado fuera del reactor o caerán de nuevo en el lecho. El modelo más utilizado en general para predecir la tasa de arrastre fue creado por Large et al (1976) de acuerdo a Large, el modelado de la corriente de arrastre para un tamaño de partícula dado, consiste en la suma de los dos flujos. El primer flujo interviene en la modelización total del arrastre según Large es el de los sólidos que fluyen continuamente desde la zona del lecho a la salida del reactor, también conocido como el flujo de decantación ²⁵. La segunda corriente interviene en la modelización del total arrastre y es el de los sólidos que tienden a caer de nuevo en el lecho.

2.8 Contactor de lecho de flujo circulante

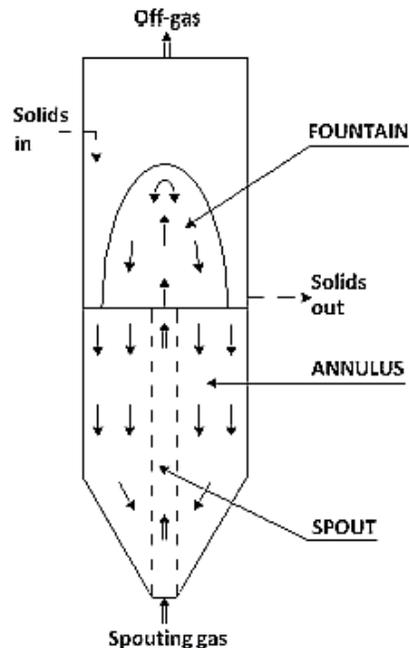
El término "lecho circulante" fue acuñado y desarrollado en el Consejo Nacional de Investigación de Canadá. Ésta clase de lechos se desarrollaron originalmente como un método alternativo para el secado de semillas húmedas en las cuales necesitan un procesamiento rápido y eficaz. Posteriormente el interés creció y su aplicación incluye la gasificación del carbón y la combustión, pirólisis de carbón y petróleo, recubrimiento de partículas nuclear, enfriamiento y granulación, así como la cristalización de polímeros y los procedimientos de polimerización de estado sólido. Estudios fundamentales fueron el diseño realizado para adaptarse las correlaciones, el rendimiento de los lechos en reactores químicos, los patrones de movimiento y la segregación de los sólidos, distribución de gas y la hidrodinámica compleja.

La mayoría de los estudios se llevaron a cabo en geometrías cilíndricas lisas. En cualquier caso adicionar una pared plana transparente internamente demostró interferir en grado moderado con los vectores de trayectoria de sólidos en el espacio anular ²⁶, mientras que no afecta a la medición de los parámetros fundamentales ($U_{ms} H_m$). Un esquema típico del lecho fluidizado se da en la Figura 3. Esta representación muestra la entrada y salida de gas, el movimiento ascendente de sólidos en el surtidor, sus trayectorias en la fuente y el posterior descenso en el espacio anular para llegar a la boca de nuevo a profundidades que dependen en la trayectoria de las líneas originadas por las posiciones de aterrizaje sobre la superficie del lecho. Las partículas se pueden cargar de forma discontinua o continua. Una alimentación adecuada sólidos deberes minimizar derivación



críticas hacia el puerto de descarga. En este punto de vista una alimentación en directo a través de la superficie lateral del lecho parece ofrecer la mejor opción y garantizar al menos un flujo en el espacio anular para todas las partículas.

Figura 3: Esquema típico contactor de flujo circulante



Fuente: Curti M.2015

El segundo parámetro fundamental es dado por la tasa mínima de gas requerido para mantener constante el sistema, la llamada "velocidad mínima de propulsión de U_{ms} del lecho." Este factor puede estar operando tanto determinado por un procedimiento experimental o se puede calcular mediante las correlaciones existentes.²⁷

Al disminuir el ángulo superior se genera más inestabilidad en la circulación de sólidos, mientras aumentar excesivamente el ángulo disminuye la fluencia de sólidos en la base y generan zonas muertas. Un criterio que distingue un contactor cónico y cilíndricos en surtidor se puede dar teniendo en cuenta el tipo de reacción para llevar a cabo: cuando la fase sólida se somete a un área de procesamiento

rápido, el tiempo de residencia óptimo de la fase gaseosa es muy corto. Este requisito se satisface mediante lechos poco profundos como en el caso de la polimerización catalítica o la gasificación del carbón y la pirólisis. Cuando la reacción se controla por el calor o la transferencia de masa, los contactos gas-sólido se deben ajustar con una configuración de lecho profundo como en el secado, recubrimiento, polimerización en fase sólida.²⁸ Gracias a esta flexibilidad, el tiempo medio de residencia de los sólidos en continuo las operaciones pueden ser reguladas por la optimización de los sólidos atraco en un solo recipiente, que da origen a una unidad bien mezclada. De lo contrario, es posible concebir una cascada de varios equipos de un sistema tienen que acercarse a un flujo de pistón. Algunos aspectos científicos permanecen abiertos sin embargo: las correlaciones de diseño que deberían ser validados, la estabilidad de expulsión de chorros de múltiples unidades probadas tanto durante la puesta en marcha y en la condición de estado estable y la posibilidad de predecir totalmente la distribución del tiempo de residencia de los sólidos como una función de la geometría y número de prácticas.

Lograr un comportamiento estable en el sistema puede lograrse mediante el cumplimiento de dos requisitos:

- La profundidad del lecho debe ser menor que el valor H_m ;
- El caudal de gas debe superar U_{ms} .

Inicialmente un lecho estático con un flujo de gas nulo, aumentando el flujo de gas se genera una caída de presión a través del lecho de partículas. Describiendo una evolución hidrodinámica, que implica una caída de presión / caudal frecuencia. A partir del lecho estático, los aumentos de caída de presión con la velocidad del fluido alcanzan una altura de caída de presión que con un aumento adicional de la velocidad del gas, el lecho muestra una moderada expansión progresiva y una disminución correspondiente de la caída de presión.²⁹⁻³⁰ Por último, una expulsión de chorros abrupta conduce a una caída de presión repentina de la disminución que estabiliza a un valor casi constante.

2.9 Ventajas y desventajas: ³¹⁻³⁴

Los lechos fluidizados muestran ciertas características deseables e indeseables durante su operación. Entre los aspectos ventajosos de estos sistemas se destacan los siguientes:

- El comportamiento fluido que presentan las partículas en estado de fluidización permite desarrollar las operaciones con facilidad.



- Los gradientes de temperatura uniformes: Muchas reacciones químicas requieren la adición o eliminación de calor. puntos calientes o fríos locales son a menudo un problema en los lechos empacados, se evitan en un estado fluidizado.
- La mezcla uniforme de partículas: Debido al comportamiento de tipo fluido intrínseca del material sólido. Esta mezcla completa permite un producto uniforme menudo, eso puede ser difícil de lograr logro en los diseños de contactores convencionales. La eliminación de los gradientes concentración radial y axial permitiendo un mejor contacto de fluido-sólido, esencial para la eficacia de la reacción y la calidad.
- La circulación de sólidos entre dos lechos fluidizados hace posible conservar (o suministrar) grandes cantidades de calor que se puedan producir (o necesitar) en contactores de gran tamaño.
- Las velocidades de transferencia de calor y masa entre el gas y las partículas son mayores que en otros sistemas de mezclado.
- La capacidad de transferencia de calor entre un lecho fluidizado y un objeto inmerso en él es alta, por lo que los intercambiadores de calor dentro de los lechos fluidizados requieren una superficie de transferencia relativamente baja.
- La capacidad de operar en el estado de Reactor Continuo: El tipo de lecho fluidizado de estos reactores permite la posibilidad de retirar continuamente introducir nuevos productos y reactivos en el recipiente de reacción. El funcionamiento de un proceso continuo en el estado permite a los fabricantes para producir sus productos de manera más eficiente debido a la eliminación de los requisitos de puesta en marcha de procesos por lotes⁷.

Por todas las razones mencionadas anteriormente, los lechos fluidizados son ideales para ciertas operaciones industriales. No obstante presentan una serie de desventajas que impiden su desarrollo en algunas aplicaciones. Las principales desventajas de los lechos fluidizados son:

- En lechos con fluidización burbujeante de partículas finas, la dificultad para definir el flujo de gas supone un mezclado ineficiente. Esto puede ser de especial importancia cuando se requiere una conversión elevada de reactantes gaseosos o una alta selectividad para una reacción intermedia.



- La rápida mezcla de partículas en el lecho provoca tiempos de residencia variables. En el tratamiento continuo de sólidos, se tiene un producto no uniforme y un rendimiento bajo, especialmente a altos niveles de conversión. Para reacciones catalíticas el movimiento de partículas catalizadoras porosas, que continuamente capturan y liberan moléculas de gas reactante, contribuye al mezclado posterior de reactantes gaseosos disminuyéndose así el rendimiento del sistema.
- La erosión en depósitos y tuberías debida a la abrasión por las partículas puede ser pronunciada. Por otra parte, las partículas finas en ocasiones son arrastradas por el gas y deben ser reemplazadas.
- En operaciones no catalíticas a alta temperatura, la aglomeración y sinterización de las partículas finas puede requerir un descenso en la temperatura de trabajo, reduciéndose así la velocidad de la reacción de forma considerable.

Las indiscutibles ventajas en cuanto a la economía de utilización de los lechos fluidizados es la principal responsable de su desarrollo con éxito en operaciones industriales haciendo superar sus desventajas.

2.10 Aplicaciones industriales de la fluidización

Hoy en día, los reactores de lecho fluidizado se utilizan para producir gasolina y muchos productos químicos entre los que se encuentran polímeros como caucho, cloruro de vinilo, polietileno y estireno. Se utiliza en aplicaciones de reactores de lecho fluidizado que permiten un proceso más limpio, más eficiente que las tecnologías de reactores convencionales anteriores.

Las características y principios previamente descritos hacen que los lechos fluidizados tengan múltiples ventajas que los hagan aptos para el sector industrial en procesos físicos como adsorción, para separar componentes sólidos de algún gas; intercambiadores de calor, debido a su alta capacidad de transferencia de calor y mantener la temperatura homogéneamente; secado de sólidos en las industrias minera, alimentarias, polímeros y fertilizantes o para tratamientos de gasificación de biomasa³⁵. En procesos químicos como síntesis catalítica en tecnologías de Fischer Tropsch para craqueo de hidrocarburos³⁶. En procesos biológicos para el cultivo de microorganismos.



La fluidización es un fenómeno conocido desde hace tiempo que, debido a sus varias particularidades, ha encontrado aplicación en diferentes sectores de la industria. Así, se emplean lechos fluidizados en diversos procesos físicos como intercambiadores de calor, recubrimientos de objetos metálicos, adsorción de componentes u operaciones de secado. Además, se usan en procesos químicos de distinta naturaleza como reacciones de síntesis, craqueo de hidrocarburos, combustión e incineración, gasificación, calcinación o tratamiento de minerales. Una aplicación particular de los lechos fluidizados, en el campo de la biología, es el cultivo de microorganismos.



3 METODOLOGÍA

En ésta sección se mostrará el dimensionamiento completo y detallado de un contactor conico de lecho fluidizado de flujo circulante, especificando los requisitos operativos y de diseño, haciéndose una descripción detallada de la metodología utilizada en el diseño, junto con una descripción general del proceso propuesto para el funcionamiento de éste contactor. A pesar de la versatilidad de los lechos con geometría convencional (cilíndrica con base cónica), hay situaciones en las que el contacto gas-sólido no es completamente satisfactoria. En estas situaciones, los factores de proceso que influyen son las características físicas del sólido y el tiempo de residencia del gas.³⁷ Por ejemplo en reacciones de pirolisis de residuos, polimerización catalítica y gasificación de carbón donde las muestras de sólidos a usar son viscosas y tienden a aglomerarse, se hace necesario un régimen más vigoroso que el burbujeo en la fluidización, denominado la fluidización turbulenta o rápida, en la cual se alcanzan velocidades de gas altas entre 3-10 m.s⁻¹, pero el tamaño de las partículas es limitado ya que varía entre 50 y 500 µm. Por tanto se hace necesario el uso del régimen de flujo circulante presente en contactores cónicos, ya que elimina los efectos limitantes mencionados anteriormente característicos del sólido y a su vez permite una velocidad de gas alta. Por tanto el funcionamiento y modelado de lechos cilíndricos en no es aplicable para este caso y cabe destacar que los contactores cónicos, son sensibles al valor de los parámetros geométricos del contactor y el diámetro de partícula.

3.1 Condiciones de operación y factores geométricos ³⁸⁻⁴¹

Según el objetivo principal de este trabajo se plantea el dimensionamiento de un contactor de lecho fluidizado que permitirá un funcionamiento flexible, con sólidos en un rango de densidades específico que van desde residuos sólidos de baja densidad hasta arena; para operaciones de secado o reacciones químicas como la pirolisis y la gasificación. El propósito es el desarrollo de propuestas de diseño a futuro con aplicaciones en Investigación para la valorización de productos de la región como potencial fuente de energía limpia. Para ello, se deben cumplir con necesidades de funcionamiento y calcularse previamente las dimensiones, las cuales se eligieron utilizando correlaciones encontradas previamente en la literatura y comparando los resultados obtenidos con base en el dimensionamiento de contactores existentes, restricciones definidas por el compresor y las limitaciones actuales de los laboratorios del programa.



Los rangos de los factores geométricos del contactor cónico y del sistema de contactor-partículas se pueden establecer de manera general así:

3.1.1 Relación diámetro de entrada / diámetro inferior del cono (D_o / D_i)

La relación debe estar entre 1/2 y 5/6. El valor más pequeño se da según el límite de la caída de presión y por la influencia de la formación de zonas muertas en el inferior del cono que ocasiona problema para el funcionamiento con circulación de sólidos. El valor superior es el límite de la estabilidad del lecho con respecto a los movimientos de rotación, y que da lugar a un aumento de la inestabilidad debido a los movimientos de rotación.

3.1.2 Ángulo del cono (γ)

El valor mínimo corresponde 28° , para ángulos inferiores el lecho es inestable. El valor máximo que puede tener es de 60° ya que desde el punto de vista práctico, la velocidad de circulación de sólidos se vuelve muy baja por tanto no se recomienda en especial para el uso de lechos profundos.

3.1.3 Relación de diámetro entrada / diámetro de partículas (D_o / d_p).

Para recipientes cilíndricos debido a la inestabilidad del lecho se sugiere que la relación sea aproximadamente 30 para recipientes cónicos la relación es amplia y varía de 2 a 60 ya que la inestabilidad en lechos con ésta geometría se disminuye, parámetros como la porosidad y la homogeneidad del lecho influyen en la relación debido a que están relacionadas con las propiedades del sólido.

3.1.4 Altura máxima del lecho circulante

Se encuentra establecidos ciertos factores que influyen en la inestabilidad del lecho circulante, limitando el valor de la altura del mismo, como lo son:

- La presencia de sólidos en la parte superior de la zona anular que deben ser fluidizados.
- Sofocación del pico.



- Presencia de inestabilidad creada en la base del lecho que se propaga provocando la desaparición del pico cuando alcanza una altura de lecho dado.

Para lechos cónicos de flujo circulante no se encuentra limitada la altura, en cambio para contactores de geometría cilíndrica si se encuentran valores definidos. Sin embargo para lechos de partículas grandes con diámetros superiores a 5 mm existe una altura máxima debido a que se produce inestabilidad del régimen, provocada al chocar las partículas y afectando a toda la sección del lecho independientemente de la geometría del contactor. Otro fenómeno que causa inestabilidad es el slugging en el lecho cuya formación es consecuencia de la influencia de los factores geométricos y el diámetro de partícula. El diámetro de las partículas, a medida que disminuye D_i/D_o , y a medida que aumenta el ángulo del cono incluido.

3.1.5 Altura mínima lecho

Como consecuencia del cambio del diámetro con respecto a la altura del lecho y la velocidad media del flujo, resulta un parámetro denominado altura mínima del lecho de flujo circulante $(H_o)_m$ por debajo de la cual la velocidad en la superficie superior del lecho excede la mínima de fluidización, para condiciones de operación estable se define el cálculo de la velocidad de expulsión de flujo circulante:

$$(Re_o)_{ms} = 0,126Ar^{0,5} \left(D_b/D_c \right)^{1,68} [\tan(\gamma/2)]^{-0,57} \quad (\text{Ecuación 5})$$

Utilizando a su vez la ecuación de Thonglimp:

$$Re_{mf} = (1,95 \times 10^{-2}) Ar^{0,66} \quad (\text{Ecuación 6})$$

Tomando valores para los números de Arquímedes de hasta 70000

Se combinan las ecuaciones 5 y 6 que relacionan el diámetro del lecho superior con la ecuación para el cálculo de la altura de lecho mínima, así:

$$(H_o)_m = \frac{341Ar^{-0,5}[\tan(\gamma/2)]^{-1,78} D_o - D_i}{2 \tan(\gamma/2)} \quad (\text{Ecuación 7})$$

El origen de la inestabilidad de un lecho está relacionado con factores de diseño como lo son la relaciones D_o/d_p , D_i/D_o , y el ángulo de contactor y con la densidad de los sólidos. La influencia del ángulo no es tan relevante como la de los otros dos factores de diseño. Por ejemplo en sólidos de menor densidad a $1500 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$,



como ciertos granos y polímeros en los cuales el lecho no tiene ninguna inestabilidad, pero para densidades mayores, hay fenómenos de inestabilidad en función del valor de los factores de diseño previamente señalados, por ello se describe a continuación una ecuación con estas dimensiones que afectan la estabilidad del lecho:

$$(H_o)_m = (1,41 \times 10^{-11}) \left[\frac{(\rho_s - \rho)}{\rho} \right]^{2,75} \left(D_i / D_o \right)^{-0,47} \cdot \left(D_o / d_p \right)^{0,63} [\tan(\gamma/2)]^{-0,3} \quad (\text{Ecuación 8})$$

La relación entre el incremento de altura mínima del lecho y el diámetro de partícula es exponencial. En cambio el diámetro de entrada cono y el ángulo disminuyen.

3.1.6 Diámetro de la columna (D_c)

Es el diámetro superior del contactor es decir el sistema cono-cilindro superior, D_c es un parámetro que puede especificar el diseñador según el volumen de sólido a tratar, siempre y cuando se cumplan con las relaciones de los parámetros geométricos mencionados anteriormente que determinan la estabilidad en el diseño conceptual y las trayectorias de partículas sólidas y del lecho. Sin embargo se ha deducido una ecuación para calcular D_c teniendo en cuenta los factores geométricos del contactor, la ecuación de la velocidad mínima y la utilizada para el cálculo de la expansión del lecho:

$$\frac{(\epsilon - \epsilon_o)}{(1 - \epsilon)} = 215 \left(F_D / F_G \right)^{1,74} \left(D_b / D_o \right)^{1,35} \gamma^{1,95} \quad (\text{Ecuación 9})$$

De las ecuaciones 5 y 9 se obtiene la siguiente expresión:

$$D_c^3 = \left[D_i + 2H_o \tan \frac{\gamma}{2} \right]^3 [1 + \psi] - D_i^3 \psi \quad (\text{Ecuación 10})$$



$$\psi = 8,94 * 10^2 u_r^{1,74} Ar^{-0,87} \left(\frac{D_i + 2H_0 \tan \frac{\gamma}{2}}{D_o} \right)^{-0,53} .$$

$$x \left(\tan \frac{\gamma}{2} \right)^{-0,992} \left\{ 1 + 0,036 u_r^{0,687} Ar^{0,344} x \left(\frac{D_i + 2H_0 \tan \frac{\gamma}{2}}{D_o} \right)^{-0,22} \right\}^{1,74} .$$

(Ecuación 11)

D_c aumenta casi linealmente con la altura de lecho estancado. El efecto de la diámetro de la base contactor no es muy importante, por lo que las curvas para diferentes valores de D_i son casi paralelas y muy cerca uno del otro.

El aumento de la D_c con respecto a la altura del lecho a ser tratado es más aguda. El efecto del diámetro de partícula se debilita cuando el valor de este parámetro aumenta.

3.1.7 Distribuidor de gas

La primera sección que se encuentra en el equipo es la cámara de distribución o la caja de aire situado debajo de la placa distribuidora.

El propósito de esta sección es demostrar la eficacia en la distribución del gas uniformemente antes de que pase la placa de distribución.⁴² Contextualizando teóricamente Litz ⁴³ presentó correlaciones para las entradas de gas horizontal y vertical. Donde para una alta velocidad de la corriente de gas que entra se prefiere una sección horizontal que se expanda libremente. Las entradas de configuración vertical son a través de una boquilla centrada en el fondo, la corriente de gas a alta velocidad ingresa y permite que se expanda como un chorro libremente, el punto de entrada de gas debe ser separado de la placa de distribución.

A escala piloto los distribuidores son hechos de metales sinterizados porosos o de cerámica pero a escala industrial no se utilizan debido a su elevado costo y escasa resistencia a la alta tensión mecánica y térmica. En un lecho de flujo circulante puede ser utilizado un distribuidor de una abertura pequeña para que las burbujas de gas fluyan libremente.

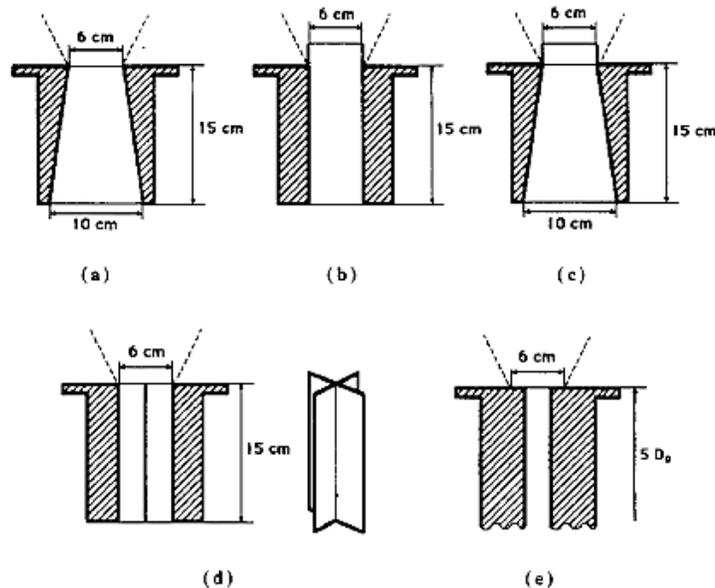


Diseño del distribuidor:

Una vez que el gas se distribuye de forma uniforme en la caja de viento, pasando a través de la placa o rejilla de distribución, ingresa al contactor de lecho fluidizado. Su función principal es la de proporcionar fluidización estable y de equilibrio a través de la sección transversal del contactor, pero a su vez éste debe disminuir el desgaste de los sólidos que componen el lecho inicialmente fijo y prevenir que caigan en la zona de distribución. Por tanto el distribuidor debe ser capaz de soportar el peso del lecho durante la parada y puesta en marcha.⁴⁴

En la actualidad existen muchos modelos diferentes de distribuidor que dependen de las variables de operación del contactor, los cuales pueden dividirse en tres clases basadas en la dirección de entrada del gas: hacia arriba, lateralmente, o hacia abajo. El más usado es el dirigido hacia arriba, debido a que puede ser usado en múltiples aplicaciones y es de fabricación simple, bajo precio y fácil diseño.

Figura 4: Tipos de difusores



Fuente: M.Olazar.1992

El diseño del dispositivo de entrada al contactor afecta en gran medida la estabilidad de los regímenes del lecho de flujo circulante. Las geometrías más características se observan en la Figura 3. La figura 3a, la boquilla no se

encuentra en el centro, está rotando continuamente lo que ocasiona que el régimen de distribución no sea estable, ya necesita condiciones del lecho uniformes para los diámetros de partículas grandes. En La figura 3b, la altura que sobresale es variada, y presenta mejor estabilidad con respecto a la base. Para las figuras 3c y 3d, no hay mejora notable con respecto a la estabilidad de entrada de la corriente de gas. La Figura 3e, se determinó como el diseño más factible según la literatura ya que la estabilidad es satisfactoria para longitudes de tubo de entrada igual o superior a 5 veces el diámetro de entrada.

3.2 Hidrodinámica del lecho

Si el recipiente es de forma cónica o cónico-cilíndrico el lecho es tan superficial que se caracteriza por permanecer sobre todo en la parte cónica. El flujo de gas para el chorro no puede expresarse en términos de una velocidad superficial fija, para los lechos de estas geometrías se usa la velocidad del gas a través del orificio interior para correlacionar el flujo mínimo requerido. El punto de partida para este grupo de ecuaciones es el método comúnmente para correlacionar datos de velocidad mínima de fluidización usada en columnas cilíndricas con un distribuidor de gas uniforme:

$$Re = f(Ar) \quad \text{(Ecuación 12)}$$

Donde $Re = d_p u_{mt} \rho_t / \mu$ y $Ar = g d_p^3 \rho_t (\rho_s - \rho_t) / \mu^2$

En el caso de lechos de flujo circulante, la relación anterior se ha modificado introduciendo parámetros de geometría del lecho, utilizando análisis dimensional. La Tabla 1. muestra diferentes correlaciones que se han desarrollado de esta manera a partir de datos experimentales, cubriendo el rango de variables indicado. El número de Reynolds se basa en la velocidad del gas a través del orificio de entrada y la suiedad de la partícula (excepto en la ecuación de Nikolaev y Golubev, que no han definido claramente su número de Reynolds). Las ecuaciones parecen ser de aplicabilidad limitada, y es improbable que una evaluación comparativa sea útil. Debe observarse además que la ecuación muestra ampliamente diferentes efectos de variables tales como el ángulo de cono y el diámetro de partícula en la velocidad de chorro mínima.



Tabla 1: Correlaciones para contactores cónicos

Investigador	Correlación	Geometría del lecho	Sólidos usados
Nikolsev and Golubev (1964)	$(Re_o)_{ms}$ $= 0,516Ar^{0,59} \left(D_o/D_c\right)^{0,1} \left(H_o/D_c\right)^{0,25}$	Cono y cilindro corto de diámetro $D_o=4,7$ pulg $D_i=0,8 - 2$ pulg $H=3,5 - 6$ pulg $\gamma=$ no especificado	Partículas esféricas de diferentes tamaños $d_p=1,75 - 5,6$ mm
Gorshtein and Mukhlenov (1964)	$(Re_o)_{ms}$ $= 0,174 \frac{Ar^{0,5}}{[\tan(\gamma/2)]^{1,25}} \left(D_b/D_o\right)^{0,85}$	Contactores cónicos con un pequeño cilindro en la parte superior $D_i=0,4 - 0,5$ pulg $H=1,2 - 6$ pulg $\gamma= 12^\circ - 60^\circ$	Arena, silicato de aluminio $d_p=1,75 - 5,6$ mm $\rho_s=0,98 - 2,36$ g.cm ⁻³ $\rho_b=0,7 - 1,63$ g.cm ⁻³
Tsvik et al. (1967)	$(Re_o)_{ms}$ $= 0,4Ar^{0,52} \left(H_o/D_o\right)^{1,24} [\tan(\gamma/2)]^{0,42}$	$D_i=0,8 - 1,6$ pulg $H=4 - 20$ pulg $\gamma= 20^\circ - 50^\circ$	Fracciones de fertilizantes $d_p=1,5 - 4$ mm $\rho_s=1,65 - 1,7$ g.cm ⁻³ $\rho_b=0,78 - 0,84$ g.cm ⁻³
Goltsiker	$(Re_o)_{ms}$ $= 73Ar^{0,14} \left(\rho_s/\rho\right)^{0,47} \left(H_o/D_o\right)^{0,9}$	$D_i=1,6 - 4,8$ pulg $H=2 - 12,2$ pulg $\gamma= 26^\circ - 60^\circ$	Fertilizantes y sílica gel $d_p=1 - 3$ mm

3.3 Descripción del comportamiento de un lecho fluidizado según el modelo de kunii y levenspiel

Si el gas se desplaza con la velocidad mínima de fluidización, el lecho fluidizado tiene un comportamiento muy similar a un líquido en ebullición vigorosa. Las burbujas de gas se elevan rápidamente y revientan en la superficie, mientras que en el fondo la emulsión se mantiene agitada. La formación de burbujas sucede en la parte inferior del lecho, es decir cerca de la placa de distribución ya que el diseño de ésta como se mencionó anteriormente tiene un efecto significativo en las características de lecho fluidizado. En consecuencia, las operaciones industriales de fluidización se ejecutan con $u_o / u_{mf} \gg 1$, $u_b / u_{mf} \gg 1$. Es por ésta razón que Kunii Levenspiel proponen un "**modelo de lecho de burbujeo**" el cual se basa en las siguientes premisas:

- El gas de alimento contiene el reactivo A en C_{Ai} entra en el lecho y entra en contacto con el catalizador en forma de polvo fino, reacciona allí en una reacción de primer orden.
- El lecho se compone de tres regiones: la burbuja, la nube y la emulsión, considerando la estela como parte de la nube. Asignamos a estas regiones



por las letras b, c y e y la concentración de reactivos a cualquier nivel en estas regiones C_{Ab} , C_{Ac} , y C_{Ae} , respectivamente.

- Cuando $u_0 \gg u_{mf}$, todo el gas de alimentado pasa a través del lecho en forma de burbujas, y el flujo a través de la emulsión es insignificante.

Si el gas tiene baja velocidad, las burbujas que suben contienen pequeñas cantidades de partículas sólidas, mientras en el resto del lecho hay una concentración alta de sólidos y es denominada como la *etapa de emulsión* del lecho fluidizado. La nube es una etapa intermedia entre las fases de burbuja y emulsión. Donde debido a la acción de la fricción ejercida sobre las partículas se logra un equilibrio con las fuerzas gravitatorias ejercidas sobre las partículas, es decir:

$$P = g(\rho_c - \rho_g)(1 - \varepsilon)h \quad (\text{Ecuación 13})$$

Para $Re_p < 10$, la velocidad mínima de fluidización está dada por la siguiente expresión:

$$u_{mf} = \frac{(\psi d_p)^2}{150\mu} [g(\rho_c - \rho_g)] \frac{\varepsilon_{mf}^3}{1 - \varepsilon_{mf}} \quad (\text{Ecuación 14})$$

Cuando la velocidad del gas ascendente excede la velocidad terminal de caída libre de la partícula, u_t , la partícula será desplazada hacia arriba con la corriente de gas. Para las partículas finas, los números de Reynolds serán pequeños, y se describen por dos relaciones presentadas por Kunii y Levenspiel:

$$u_t = \frac{\eta dp^2}{18\mu}, Re < 0.4 \quad (\text{Ecuación 15})$$

$$u_t = \left(\frac{1,78 \cdot 10^{-2} \eta^2}{\rho g \mu} \right)^{1/3} dp, 0.4 < Re < 500 \quad (\text{Ecuación 15})$$

3.3.1 Velocidad de burbuja y el tamaño de la nube

Realizando experimentos con burbujas individuales, Davidson y Harrison encontraron mediante una expresión para relacionar el tamaño de la burbuja con la velocidad en que esta misma asciende.⁴⁵



$$u_{br} = 0,71(gd_b)^{1/2} \quad (\text{Ecuación 17})$$

A mayor valor de u_o , más rápida es la velocidad de una burbuja de gas a medida que se eleva a través del lecho. Cuando la velocidad mínima de fluidización es alta, menor es la velocidad de la burbuja ascendente. Para un sistema gas-líquido, Davidson y Harrison propusieron que relación de incremento de la burbuja en un lecho fluidizado podría representarse simplemente sumando y restando estos términos, así:

$$u_b = (u_o - u_{mf}) + 0,71(gd_b)^{1/2} \quad (\text{Ecuación 18})$$

3.3.2 Tamaño de la burbuja

Para la velocidad de crecimiento de la burbuja se han desarrollado ecuaciones en función del diámetro de la misma. A su vez dependen también del diámetro del lecho, la altura sobre la placa de suministro de gas, la velocidad del gas, y las características de las partículas que afectan la fluidización⁴⁶. Sin embargo para observar el diámetro de burbuja es necesario tener deflectores e intercambiadores de calor en el interior del lecho fluidizado.

3.4 Decisiones de diseño para escalado

Con los datos disponibles a escala de laboratorio, puede ser considerado en el diseño de las unidades de mayor tamaño, teniendo en cuenta los siguientes parámetros:

3.3.1 Selección de tipo de lecho y el tamaño de las burbujas

Los tipos de lecho más usados son el lecho de circulación burbujeante libre y los que contienen accesorios internos. En los primeros se puede controlar el tamaño de las burbujas y su velocidad subida, mientras que los segundos son usados en



procesos batch de cargas de sólidos y generalmente las partes internas corresponden a intercambiadores de calor.

3.3.2 Relación de aspecto del lecho (relación altura-diámetro)

En un lecho con sólidos pesados y accesorios internos, el tamaño de la burbuja es casi constante, la velocidad de flujo volumétrico de gas y la relación de aspecto tienen sólo un pequeño efecto sobre la conversión. Deben evitarse los lechos poco profundos. Para un diseño confiable es sugerido como un valor mínimo la relación altura-diametro aproximadamente cercana a la unidad.

3.5 Descripción del proceso

El aire comprimido estará a cargo de un compresor capaz de presurizar el fluidizador y compensar la caída de presión creada por la placa de distribución. Los compresores se alimentan de un tanque que será utilizado para entregar una presión constante de 25 psi. Con el fin de obtener el caudal de gas deseado en el interior del contactor, una válvula se ajustará para conseguirlo.

Las partículas sólidas serán insertadas dentro del contactor antes de la operación con el fin de lograr alcanzar la altura del lecho estático deseado. Un rotámetro colocado a la salida lateral, mide el caudal de gas que se suministra y atraviesa el lecho. Además, se encuentran dos manómetros uno a la entrada del equipo y otro a la salida con el fin de tomar los datos de caída de presión.

Al entrar en contacto el sólido con el aire se evidenció un notable cambio en los parámetros a medir, así como también se observaron los diferentes regímenes para los sólidos que se presentan a continuación, los cuales lograban llegar a estar en lecho de flujo circulante cuando la presión empezaba a tomar un valor constante.



Tabla 2: Características Solido N°1

	Poliestireno Expandido - EPS - Icopor	
<i>Densidad</i>	Kg/m ³	10 a 12
<i>Dimensiones: Diámetro de partícula</i>	mm	4

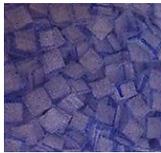
Fuente: Autor

Tabla 3: Características Solido N°2

	Poliestireno Expandido - EPS - Icopor	
<i>Densidad</i>	Kg/m ³	10 a 12
<i>Dimensiones: Diámetro de partícula</i>	mm	7

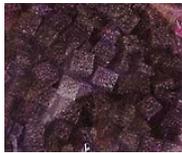
Fuente: Autor

Tabla 4: Características Solido N°4

	Espuma de polietileno (superlon 2mm)	
<i>Densidad</i>	Kg/m ³	17 a 20
<i>Dimensiones: tamaño de lado</i>	mm	10

Fuente: Autor

Tabla 5: Características Solido N°5

	Espuma de polietileno (Yumbolon 5mm)	
<i>Densidad</i>	Kg/m ³	30 a 40
<i>Dimensiones: tamaño de lado</i>	mm	10

Fuente: Autor

4 RESULTADOS Y ANÁLISIS

4.1 Dimensionamiento del contactor

Se presentarán y discutirán los resultados del diseño final del contactor, se procederá a analizar de manera detallada el uso del prototipo como forma de validación del dimensionamiento producto del diseño conceptual del contactor, con el cual se lograran observar los regímenes de fluidización que se esperaba obtener en el proceso llevado a cabo por la unidad.

De acuerdo con las relaciones presentadas en el capítulo anterior, se realizaron los cálculos pertinentes que cumplieran con los factores geométricos así

- Relación de diámetros contactor y distribuidor $\frac{D_o}{D_i} = 0,5$

Tabla 6: Relación Do/Di

1. Factor	Unidades	0,5
Do	m	0,02
Di	m	0,04

Fuente: Autor

- Relación de diámetros contactor y partículas sólidas

Tabla 7: Relación Do/dp

2. Factor	2 >Do/dp> 60	unidades	2	60
dp.1	Diámetro de partícula calculado	m	0,01	0,000555556
dp.2	Diámetro de partícula teórico	m	0,003	0,02

Fuente: Autor

Donde los diámetros teóricos se enuncian a modo de comparación con los calculados y corresponden al diámetro de partícula de la gravilla y el de residuos sólidos (biomasa), los cuales fueron seleccionados para realizar un diseño conceptual en el que puedan realizarse diferentes tipos de reacciones que abarquen el uso de sistemas con sólidos de tamaño de partícula pequeño pero densidades elevadas y partículas de diámetro grande con densidad baja.



- La altura mínima que alcanza el lecho fue calculada con la ecuación 8 enunciada en el capítulo anterior para la cual se tuvo en cuenta los d_p calculado y teórico, y las propiedades que se presentan a continuación para Aire y sólidos.

Tabla 8: Cálculo altura lecho

		Unidades	Valor mínimo	Valor máximo
Ho.1,1	Altura que alcanza el lecho con dp.1	m	0,000147494	0,245183545
Ho.1,2	Altura que alcanza el lecho con dp.2	m	0,000314912	0,025646065

Fuente: Autor

- El diámetro del columna cilíndrica que marca terminación del cono fue hallada utilizando la Ecuación N°10.

Tabla 9: Cálculo diámetro contactor

	unidades	Valor mínimo	Valor máximo
Dc.	m	0,052323516	0,249052193

Fuente: Autor

- La relación para cálculo de la altura sección cónica es $\frac{H_c}{D_c} = 1,2$

Tabla 10: Cálculo altura cono

		unidades	Valor mínimo	Valor máximo
Hc.	Altura de la sección cónica	m	0,062788219	0,298862631

Fuente: Autor

En resumen, las dimensiones seleccionadas teniendo en cuenta un valor mínimo y máximo para cada una como se mostró previamente para algunos de los factores geométricos se sintetiza en la siguiente tabla que concluye las medidas finales de cada sección que compone el contactor de lecho fluidizado.



Tabla 11: Dimensionamiento contactor lecho fluidizado

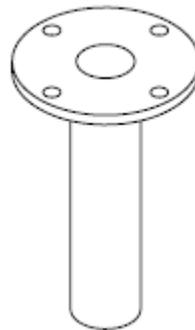
Símbolo	Nombres	Unidades	Valor
Do	Diámetro de entrada del cono	cm	2
Di	Diámetro inferior	cm	4
Dc	Diámetro de la columna cilíndrica que marca la terminación del cono	cm	25
Hc	Altura de la sección cónica	cm	30
Hi	Longitud dispositivo de entrada	cm	10
H	Longitud cilindro superior	cm	15
γ	Ángulo del cono	°	32

Fuente: Autor

El diseño se compone de dos partes:

- Suministro de aire: Distribuidor, es el cilindro inferior, de altura H_i y diámetro D_o , el isométrico realizado con el software *SOLIDWORKS*® y se presenta a continuación, en el cual se visualiza un diseño que presente una brida superior con la que permita ajuste con la parte superior y que a su vez permita su fácil cambio al modificar la relación del factor geométrico para ver la variación del comportamiento del sistema sólido-gas para otras configuraciones alternas. El plano con vistas lateral, superior e inferior se presenta en el Anexo A, teniendo como espesor del material de construcción un valor de 4 mm.

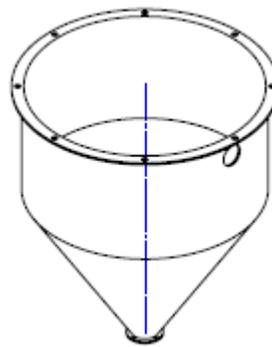
Figura 5: Isométrico diseño conceptual de difusor



Fuente: Autor

- Distribución de aire y ejecución del proceso: Contactor cónico-cilíndrico, con diámetro inferior D_i , diámetro superior D_c , alturas H_c y H para cada figura respectivamente, en el isométrico se observa la presencia de una salida lateral para despresurización y toma de medidas de presión y caudal. El plano con vistas lateral, superior e inferior se presenta en el Anexo B, teniendo como espesor del material de construcción un valor de 4 mm.

Figura 6: Isométrico diseño conceptual del contactor



Fuente: Autor

Los reactores cónicos de lecho fluidizado, no corresponden a alguno de los reactores ideales modelados o simulados fácilmente. En ellos la mayor parte del gas fluye hacia arriba a través de las partículas en suspensión del fluido o pasan a través de burbujas con escaso contacto con las partículas de catalizador, si se llevará a cabo una reacción química. Además, hay generalmente una circulación de mezcla turbulenta. Por tanto desde simuladores existentes de procesos no están dirigidos a representar los comportamientos del contactor en sus diversos regímenes de fluidización, por tanto las dimensiones y la aplicación del diseño conceptual descrito anteriormente es necesario validarlo realizando un prototipo con las dimensiones de la Tabla 8. Para garantizar el comportamiento de los sólidos en un régimen de flujo circulante, que en posteriores diseños y construcciones con especificaciones más estrictas, puedan llevarse a cabo reacciones catalíticas o procesos de aplicación como los mencionados previamente.

4.2 Implementación de prototipo de fluidización

Se construyó un fluidizador en acrílico con un espesor de 4 mm y las medidas descritas previamente (Ver Figura 7), el equipo fue evaluado inicialmente de acuerdo con la fuente de suministro de aire, un compresor de tanque Compressors royal italian designed para determinar los parámetros de operación en cuanto a caudal de aire y presión, se realizó adecuación de la unidad para tener registro de las variables y el tipo de sólidos a fluidizar, valiéndose de la salida lateral de despresurización. Con el propósito de asegurar la estabilidad de la operación se soportó el contactor en una base metálica.

Figura 7: Prototipo (Fluidizador) con base y compresor



Fuente: Autor

A continuación se presenta la relación de gastos para la adquisición del prototipo y su puesta en marcha:

Tabla 12: Presupuesto prototipo

DESCRIPCIÓN	FUENTES		TOTAL (\$)
	UniPamplona (\$)	Externas (\$)	
Recipiente en acrílico		210.000	210.000
Soporte metálico		100.000	100.000
Regulador de flujo de aire con perilla y manómetro		38.000	38.000
Manómetro		13.000	13.000
Manguera		105.000	105.000
Compresor	1'100.000		1'100.000
Rotámetro		45.000	45.000
Acoples		25.000	25.000
Sólidos a fluidizar y malla soporte de lecho		20.000	20.000
TOTAL (\$)	1'100.000	556.000	1'656.000

Fuente: Autor

4.2.1 Hidrodinámica de prototipo de fluidización

Figura 8: Evolución de la secuencia fotográfica de un proceso de expulsión de chorros



Fuente: Autor

La Figura 7 muestra una secuencia de imágenes que evidencian de manera significativa la transitoria hidrodinámica que puede ser tan corto como un segundo o pocos.

Cuando la velocidad del aire superficial es muy baja, el fluido se filtra a través de las partículas y no se induce movimiento, este requisito se define como "lecho fijo". Por el aumento de la velocidad de flujo, las partículas de la fuerza de fricción del entre y aumentar el líquido: cuando el componente ascendente de fuerza contrarresta el peso de las partículas, el requisito mínimo es ampliar el lecho. Todas las partículas deben ser suspendidas por el fluido, el lecho puede ser considerado en un estado de "fluidización incipiente" y la caída de presión a través del lecho en cualquier sección iguala al peso de la sección del fluido y los sólidos.⁴⁵

Por más aumento de la velocidad, algunos fenómenos de inestabilidad tales como "burbujeo" o "fluidización turbulenta" pueden ocurrir, dependiendo de las propiedades de la geometría del sistema y de partículas. En un sistema de gas-sólido que funciona a la velocidad del fluido a alta, las burbujas de gas tienden a unirse y crecer en volumen durante su recorrido hacia arriba; si el lecho no es lo suficientemente amplia, una burbuja de gas puede ocupar toda la sección transversal del buque, a continuación, las partículas sólidas se levantan como un pistón, dando origen al llamado "slugging plana". Esta incidencia no deseada fácilmente ocurre con las partículas gruesas, a causa de la velocidad del gas de alta, así como con polvos cohesivos, como consecuencia de la interacción de partículas finas.

Por último, cuando un valor crítico de la velocidad del gas es suficientemente alta como para grupos de transporte individual de oro en las partículas del lecho de un modo "transporte neumático".

El lecho en general de ese modo se convierte en un compuesto de un núcleo central fase diluida con sólidos en movimiento hacia arriba arrastradas por un flujo a favor de corriente de fluido, y una región anular de fase densa con percolación a contracorriente de líquido. Un patrón cíclico sistemática de movimiento de sólidos se establece así, dando lugar a un sistema hidrodinámico única que es más adecuado para ciertas aplicaciones que las configuraciones de líquido sólido más convencionales.

Este sistema se denomina un lecho en surtidor, el núcleo central de un pico, la región anular que rodea el anillo, y los sólidos por encima de la superficie del lecho arrastrado por el tubo de salida y luego llueve abajo en el espacio anular se designan como la fuente. Para eliminar espacios muertos en la parte inferior del



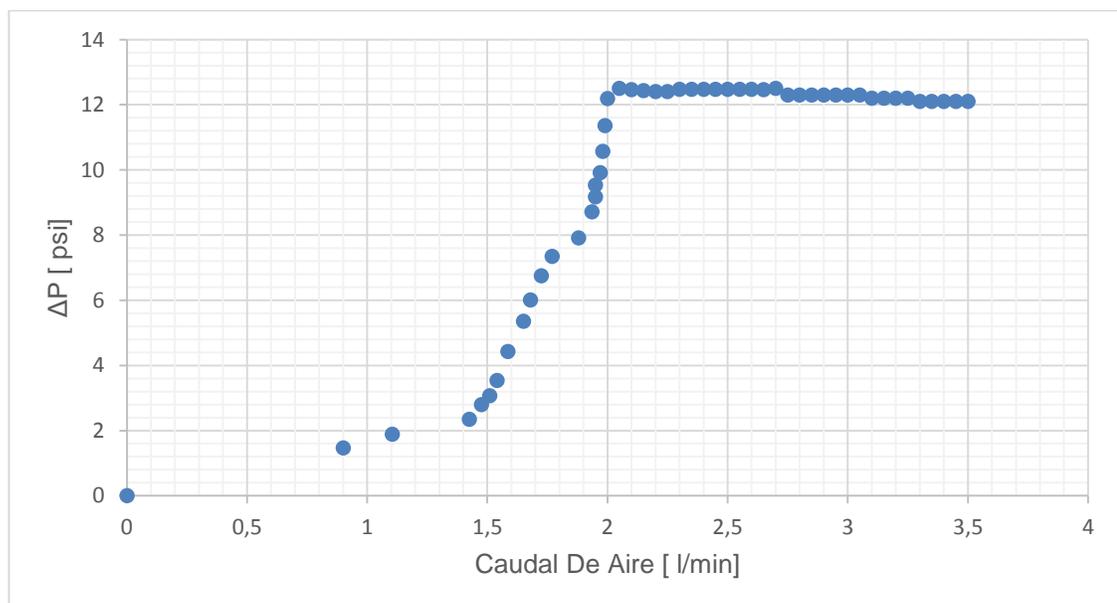
recipiente, es común el uso de una base cónica divergente coronado por una columna cilíndrica, con la inyección de fluido en el vértice truncado del cono.

4.3 Mapas de operación

Las gráficas 3 y 4 muestran los resultados para dos diámetros de partícula diferentes de poliestireno expandido y las gráficas 5 y 6 analizan el comportamiento de dos espumas de polietileno de diferentes densidades pero igual tamaño de partícula. Se observó la variación de la caída de presión en comparación con el caudal de aire de salida del contactor. Las condiciones de funcionamiento fueron iguales para cada material, en cuanto a flujo inicial de aire y presión suministrada por el compresor.

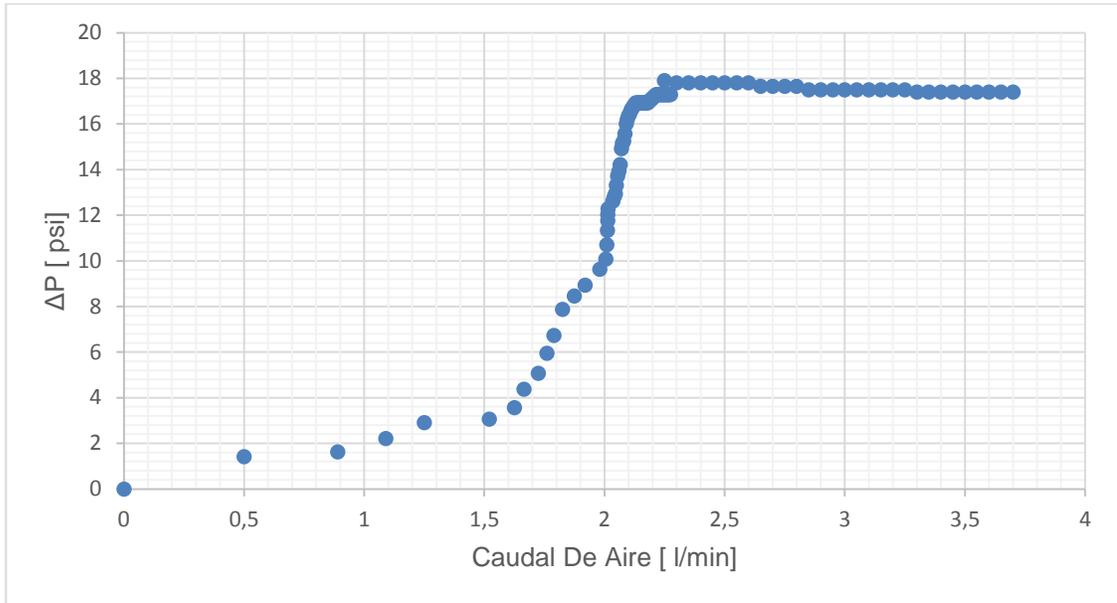
Se puede observar que el comportamiento de los sólidos en el prototipo se acerca a las encontradas en la literatura, donde la curva superior que pasa a través de la caída de presión máxima se obtiene aumentando el flujo del aire, y la curva inferior es la obtenida al disminuir éste mismo.

Gráfico 3: Diagrama Caída de Presión EPS 1



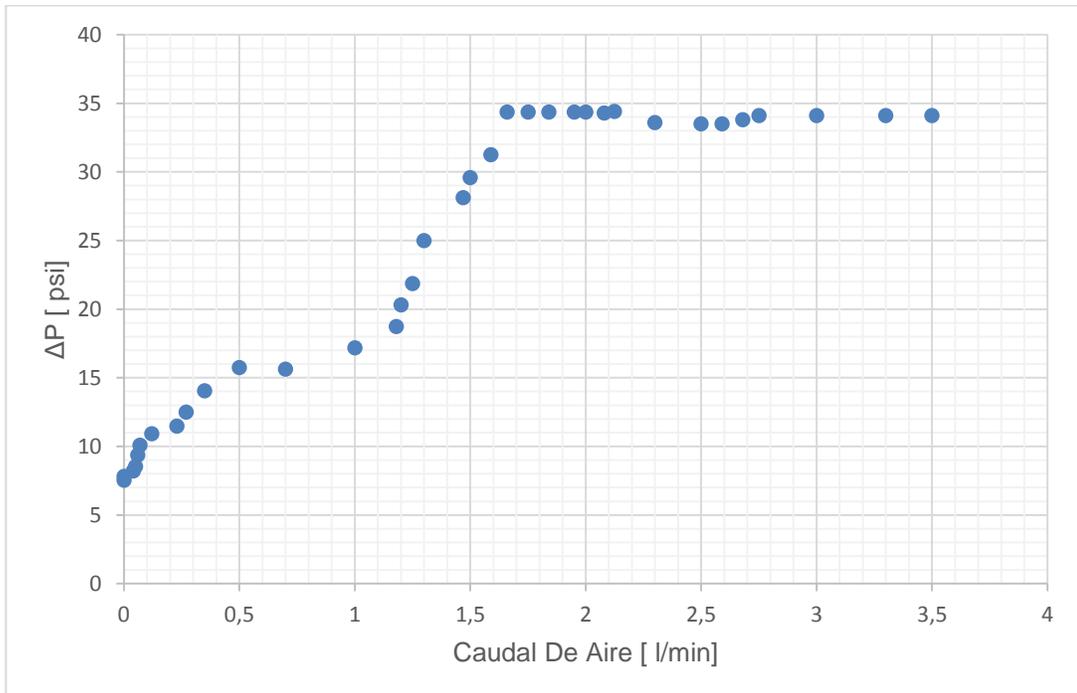
Fuente: Autor

Gráfico 4: Diagrama Caída de Presión EPS 2



Fuente: Autor

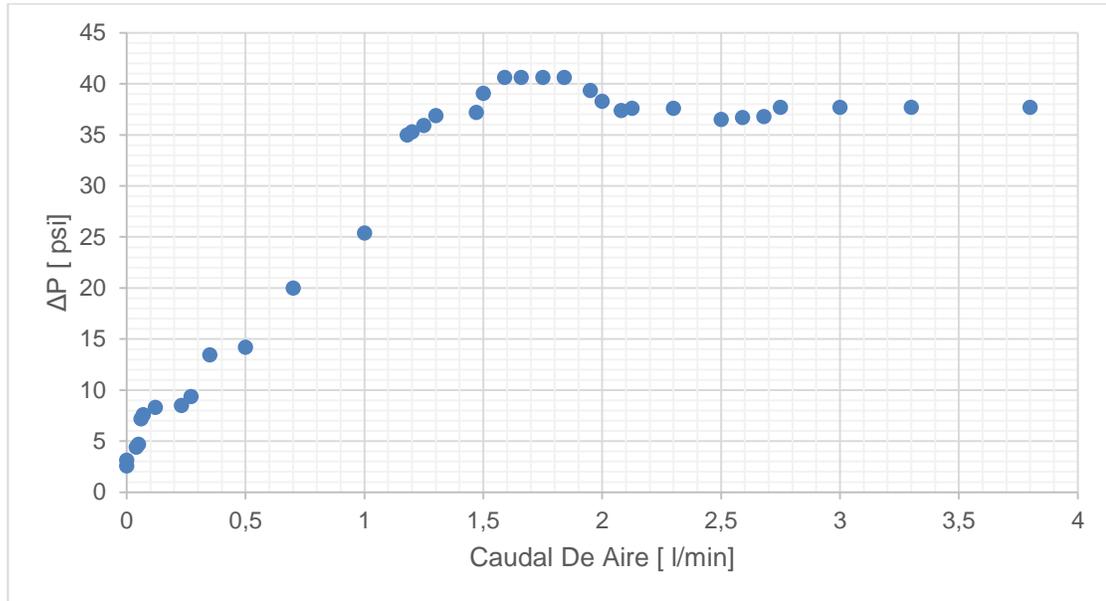
Gráfico 5: Diagrama Caída de Presión Espuma 1



Fuente: Autor



Gráfico 6: Diagrama Caída de Presión Espuma 2



Fuente: Autor

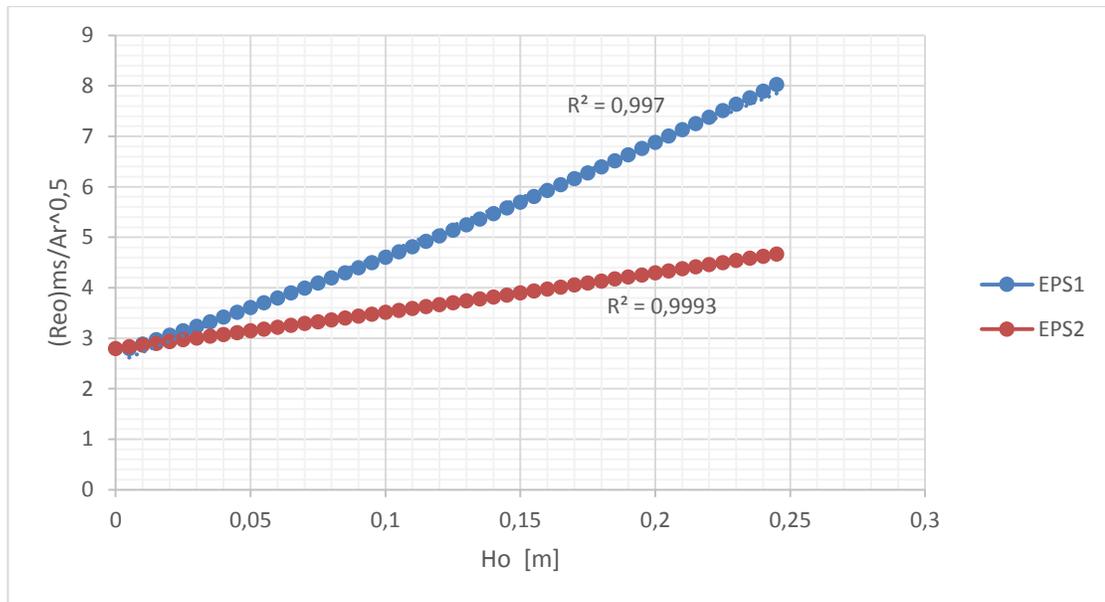
Para un sistema de sólidos con diferente tamaño e igual densidad se evidencia un aumento en la caída de presión, debido a la dificultad para fluir del aire hasta conseguir una presión estable, a su vez cuando se varió la densidad se encontró el mismo comportamiento, obteniéndose para un sólido más denso una caída de presión mayor.

4.4 Velocidad mínima Y Caída De Presión

$$(Re_o)_{ms} = 0,126Ar^{0,5} \left(D_b/D_o \right)^{1,68} \left[\tan(\gamma/2) \right]^{-0,57} \quad (\text{Ecuación 19})$$

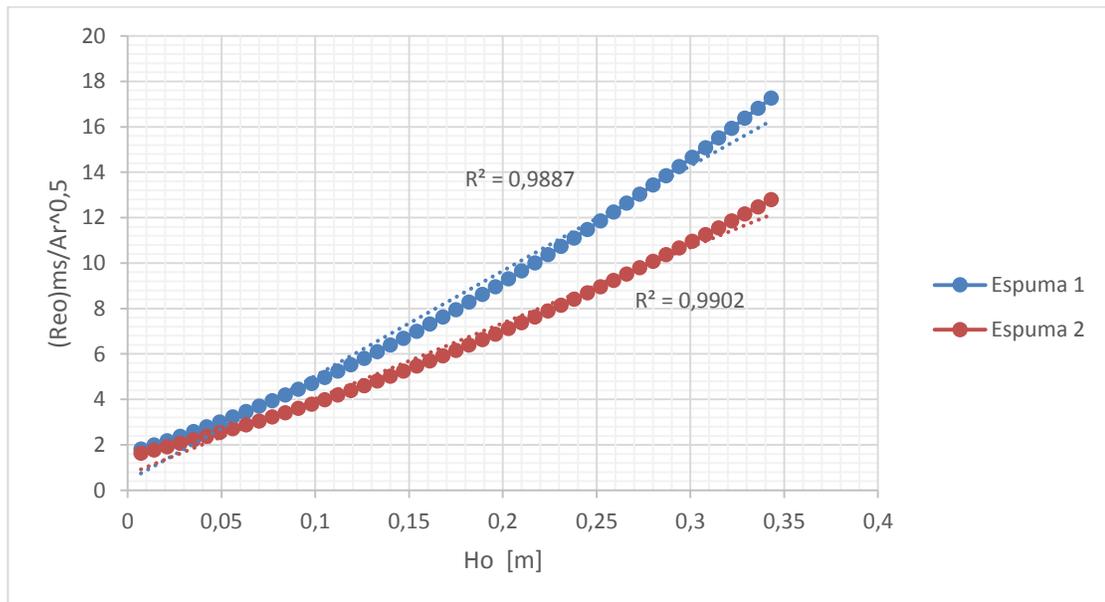
La Ecuación anterior relaciona el módulo de Reynolds con los factores geométricos característicos del lecho y del módulo de Arquímedes que a su vez se estableció como una consecuencia de un amplio estudio experimental y en base a las correlaciones propuestas en la literatura. Los resultados experimentales se ajustan a la ecuación 19, donde el gráfico 7 se observan los resultados para poliestireno expandido y en el gráfico 8 para espuma de polietileno. Los datos son resultados experimentales del módulo de Reynolds para diferentes valores de la altura del lecho fijo y del diámetro de entrada del aire, en los cuales realizando un ajuste por regresión lineal para cada grupo de datos experimentales con r^2 entre 0,9887 y 0,9993 como se muestra a continuación

Gráfico 7: Efecto de La altura del Lecho Fijo en $(Reo)ms/Ar^{0,5}$ para EPS 1 y 2



Fuente: Autor

Gráfico 8: Efecto de La altura del Lecho Fijo en $(Reo)ms/Ar^{0,5}$ para Espuma de polietileno 1 y 2



Fuente: Autor



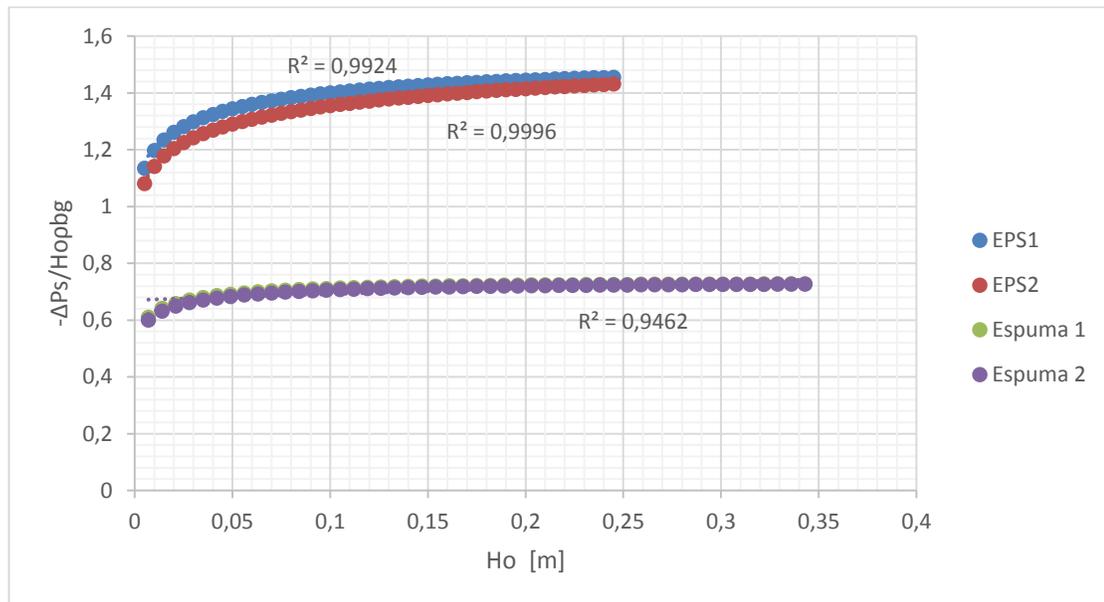
Los resultados de la caída de presión correspondiente a un funcionamiento estable al mínimo se ajustan a la ecuación propuesta a continuación:

$$-\Delta p_s / H_o \rho_b g = 1,2 [\tan(\gamma/2)]^{-0,11} (Re_o)_{ms}^{-0,06} (H_o / D_o)^{0,08} \quad (\text{Ecuación 20})$$

Los gráficos 9 se muestran los resultados experimentales para el parámetro descrito en la ecuación anterior para los dos materiales usados previamente en función de diferentes valores de la altura del lecho fijo y diámetro de entrada.

Los resultados correspondientes a cada material se han incluido en un solo gráfico para mostrar el efecto de la densidad del sólido y hacer constancia en el ancho Intervalo de valores de densidad para el cual la ecuación 20 es válida. Se analizan los resultados con base al ajuste de los datos experimentales a la regresión logarítmica, encontradno R^2 entre 0,9462 y 0,9996.

Gráfico 9: Efecto de La altura del Lecho Fijo en $-\Delta P_s / H_o \rho_b g$



Fuente: Autor

4.5 Comparación entre el burbujeo de lecho fluidizado y lecho de flujo circulante

La fluidización es una operación caracterizada por varias peculiaridades interesantes asociadas con características deseables. Por un lado, esta tecnología garantiza tener un flujo suave de materiales particulados sólidos que permite un funcionamiento continuo y controlado fácilmente⁴⁶. La buena mezcla de sólidos ofrece una gran independencia de la inercia térmica y asegura requisitos isotérmicos en el reactor.

Por otro lado, la fluidización puede llegar a términos de inestabilidad, Como burbujeo o de slugging, que suelen representar una posición de contacto ineficiente entre las dos fases, en las operaciones de alta temperatura, así como con las partículas pegajosas, de sólidos aglomerados puede ocurrir fácilmente⁴⁷. La transferencia de masa y calor en relación con las reacciones físicas y químicas son cinéticamente limitados por la zona de área amplia donde están las partículas, se produce cuando la operación es en la fase fluida o en los sólidos. En los contactores los sistemas fluidizados deben operar con materiales en partículas finas, ejemplos dados son por catálisis heterogénea o combustión / gasificación de carbón.

Por razones intrínsecas para muchos procesos (mejora de los productos agrícolas, la aglomeración, peletización, etc.), se requiere la manipulación de partículas gruesas y fluidizarlas no representa tecnología la tecnología óptima. Se debe realizar una previa trituración del material para alcanzar el tamaño requerido por la fluidización convencional y son aspectos negativos adicionales que aumenta el coste total del proceso energético. Una velocidad de gas muy notable requerida para alcanzar una amplia fluidización de partículas, que a menudo es muy superior a la cantidad necesaria para el funcionamiento físico o químico considerado. En conclusión, la fluidización parece una operación interesante gracias a su fácil escalado, aunque tiene amplias aplicaciones y la necesidad de caudal de gas es grande.⁴⁸

Un lecho circulante puede ser realizado por la sustitución del distribuidor placa perforada típica de un lecho fluidizado de serie con un único orificio, o situado en la posición central de un fondo plano o en el vértice de un cono inferior, cuyo perfil de ayuda a la circulación de sólidos y evita áreas estancadas. Ejemplos de agujeros axiales no aparecen en la literatura científica, también. El gas de fluidización entra en el sistema a una alta velocidad, genera una cavidad que sobresale hacia arriba a través de la "boquilla", con una forma casi cilíndrica, cuando el caudal de gas es lo suficientemente alto, el pico llega a la zona del



lecho y forma una "fuente" de las partículas en el contactor. La fuente puede ser más o menos desarrolladas en función de la tasa de gas y las características generales del sistema. Después de caer en la superficie del lecho, los sólidos hacen un recorrido hacia abajo en el "anillo" que rodea el tubo de salida y llegan a diferentes profundidades antes de ser recapturados en el pico.

En consecuencia, los lechos circulantes ofrecen características muy peculiares que pueden ser resumidas así:

- Flujo muy regular de las partículas y la falta de zonas muertas;
- Caída de presión reducida y menor caudal de gas requerido para alcanzar el movimiento de sólidos con respecto a la velocidad mínima de fluidización, siendo este resultado puede tener la transferencia de gas suministrado a una porción limitada de sólidos constitutivos del lecho
- Posibilidad de manipulación de partículas gruesas que tienen un intervalo de tamaño ancho en su forma.



5 CONCLUSIONES

Se dimensionó un contactor de geometría cónica con terminación cilíndrica en la parte superior y un difusor cilíndrico, de las siguientes características D_c , 25cm; D_i , 4cm; D_o , 2cm; H_c , 30cm; H , 21cm apto para el manejo de sólidos con densidades entre 350 y 2300 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, para tamaños de partícula entre 10 y 0,56 mm, que alcanzan alturas de lecho de H_o , 24cm; con velocidades de gas entre 3 y 16 $\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$.

Se construyó un prototipo en acrílico para validar las medidas del dimensionamiento y se comprobó durante su operación utilizando medidores analógicos puestos a la entrada y salida del contactor, la presencia de los diferentes regímenes presentes, desde lecho fijo, posteriormente burbujeante cuando inicia el efecto de la caída de presión y flujo de la velocidad del aire, posteriormente entra a un estado de transición hasta que la presión se estabiliza lográndose un lecho circulante. La amplia gama de variables de operación muestran la versatilidad de estos regímenes para los procesos físicos y de reacción, valiéndose del manejo de sólidos a altas velocidades de gas. El régimen final que se estudió nos permite un contacto más vigoroso entre el gas y el sólido que los regímenes convencionales, por lo que se convierte en una buena alternativa en el tratamiento de materiales sólidos adherentes, permitiendo la manipulación de las distribuciones de tamaño de partícula de ancho con uniformidad y con un régimen estable.

Experimentalmente se observó que para fluidizar materiales cuya densidad es de alrededor de 1000 $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, el régimen de flujo circulante es conveniente para tratar pequeñas cantidades de sólido. No obstante, cuando la densidad es muy baja como en el caso del poliestireno expandido se alcanza éste mismo régimen para cantidades de sólidos altas, logrando un funcionamiento estable con materiales ligeros. Demostrándose la aplicabilidad de las correlaciones teóricas usadas para el dimensionamiento previo en una amplia gama de densidades. Resultado que facilita el diseño de los contactores para diferentes operaciones, como la pirólisis de plásticos.

Finalmente se concluye que el dimensionamiento es adecuado porque se cumple los parámetros teóricos, en los cuales en un sistema de lecho circulante, la agitación se logra por medio del gas expulsado en forma de chorro, dando lugar a un espacio entre las partículas y el gas, tanto en el plano y en el espacio anular, siendo alimentado por el gas de flujo transversal a través de la boquilla. En consecuencia, el gradiente de presión axial en el diámetro del lecho varía con la altura, llegando a un valor máximo en la parte superior.



6 RECOMENDACIONES Y TRABAJOS FUTUROS

Se propone la implementación del dimensionamiento del contactor descrito en este trabajo de grado para la construcción de posteriores equipos, encaminados a aplicaciones como operaciones de secado, gasificación o pirolisis de sólidos que permitan darle un valor agregado a desechos como la biomasa y algunos residuos sólidos que se pueden utilizar como fuente energética, motivando el uso de tecnologías de actualidad con impacto sobre el desarrollo económico.

El prototipo construido como validación en el dimensionamiento, se recomienda ser usado como fluidizador para prácticas experimentales en las asignaturas del contenido programático del pensum ingeniería química. Valiéndose de que el equipo fue construido de forma modular en dos piezas, un difusor y un contactor, se sugiere probar con otras configuraciones geométricas de difusor en estudios posteriores.



7 NOMENCLATURA

- **Ar**: Número de Arquímedes
- **D_b**: Diámetro superior del lecho fijo
- **D_c**: Diámetro de columna cilíndrica que marca la terminación del cono
- **D_i**: Diámetro inferior
- **D_o**: Diámetro de entrada del cono
- **g**: Aceleración de la gravedad m.s⁻²
- **H_c**: Altura del cono
- **H_o**: Altura mínima del lecho
- **Δp**: Caída de presión
- **Δp_s**: Caída de presión del chorro
- **Re**: Número de Reynolds
- **(Re_o)_{ms}**: Número de Reynolds mínimo de chorros
- **U_{ms}**: Velocidad mínima de fluidización
- **γ**: Ángulo
- **ε**: Porosidad del lecho
- **ε_{ms}**: Porosidad mínima de expulsión de chorros
- **μ**: Viscosidad
- **ρ**: Densidad del fluido
- **ρ_s**: Densidad del sólido
- **F_D/F_G**: Relación entre fuerzas de arrastre y gravitacionales



8 REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ¹ Epstein, N.; Grace, J. R. Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications, Cambridge University, 2011. p.81-104. ISBN 978-0-521-51797-3
- ² Kishan B . Mathur and Norman Epstein. Dynamics Of Spouted Beds. Department of Chemical Engineering, University of British Columbia Vancouver. Canada p. 111-180.
- ³ Olazar, M.; San José, M. J.; Aguayo, A. T.; Arandes, J. M.; Bilbao, J. Stable Operation Conditions for Gas-Solid Contact Regimes in Conical Spouted Beds. Ind.Eng. Chem. Res., vol. 31, 1992. p.1784-1791
- ⁴ Victor Manuel Barreira; Estudio Hidrodinámico De Un Lecho Fluidizado; Universidad Carlos III D, Madrid, 2007
- ⁵ Epstein N. Liquid-solids fluidization, handbook of fluidization and fluid-particle system, Marcel Dekker, Editor W.C Yang., New York, 2003. p.705-764. ISBN 0-8247-0259-X
- ⁶ Davidson J.F, Harrison D., Fluidised Particles, Cambridge University Press.1963. p.248
- ⁷ Mathur, K. B. and Gishler, N., A Technique for Contacting Gases with Coarse Solid Particles, AIChE Journal, Vol. 1, 1955. p.157-164
- ⁸ .Lim, C. J. and Mathur, K. B., Modelling of Particle Movement in Spouted Beds, In Fluidization, eds J. F. Davidson and D. L. Keairns, Cambridge University Press, Cambridge, 1978. p.104-109
- ⁹ San José, M. J.; Olazar, M.; Aguayo, A. T.; Arandes, J. M.; Bilbao, J. Expansion of Spouted Beds in Conical Contactors. Chem. Eng. J. 1993, 51, p.45-52.
- ¹⁰ Curti M. Solids and gas hydrodynamic characteristics in square-based spouted beds for thermal applications, Politecnico di Torino; 2015
- ¹¹ D. Wilkinson, Determination of Minimum Fluidization Velocity by Pressure Fluctuation Measurement, The Canadian Journal of Chemical Engineering 73.1995, p.562 – 565
- ¹² Subhadarshinee Sahoo. Fluidized Bed Reactor, Design And Application For Abatement Of Fluoride, National Institute Of Technology, 2012
- ¹³ C. Fryer, O. Potter, Countercurrent Backmixing Model for Fluidized Bed Catalytic Reactors. Applicability of Simplified Solutions, Industrial Engineering Chemistry Fundamentals, 11. 1972, p.338 – 344



- ¹⁴ Wen-Ching Yang. Handbook of fluidization. 2003
- ¹⁵ Nemeth, J. and Pallai, I. "Spouted bed technique and its application". *Magy. Kem.Lapja*, 25.1970, p.74–82.
- ¹⁶ R.C. Darton, R.D. LaNauze, J.F. Davidson, D. Harrison, Bubble Growth Due to Coalescence in Fluidized Beds, Transactions Institution Chemical Engineers, 55. 1977, p.274 – 280
- ¹⁷ A. Delebarre, J.M. Morales, L. Ramos, Influence of the Bed Mass on its Fluidization Characteristics, Chemical Engineering Journal, 98. 2004, p.81 – 88
- ¹⁸ Kursad, D.; Kilkis, B. Numerical Analysis of Spouted-Bed Hydrodynamics. *Can. J. Chem. Eng.* 1983, 61, p.297-302.
- ¹⁹ Kunii, D., y Levenspiel, O. *Fluidization Engineering*. Second edition, USA: Butterworth-Heinemann, 1991. p.490. ISBN 0-409-90233-0.
- ²⁰ .Lim, C. J. and Mathur, K. B., Modelling of Particle Movement in Spouted Beds, In Fluidization, eds J. F. Davidson and D. L. Keairns, Cambridge University Press, Cambridge, 1978. p.104-109
- ²¹ K. Tannous, M. W. Donida, and L. A. Obata, "Entrainment of Heterogeneous Particles from Gas-Fluidized Bed," *Particulate Science and Technology*, vol. 26, pp. 222-234.
- ²² T. Baron, C. L. Briens, and M. A. Bergougnou, "Study of the transport disengaging height," *The Canadian Journal of Chemical Engineering*, vol. 66, pp. 749-760, 1988.
- K. S. Lim, J. X. Zhu, and J. R. Grace, "Hydrodynamics of gas-solid fluidization," *International Journal of Multiphase Flow*, vol. 21, Supplement, pp. 141-193, 1995.
- ²³ H. W. Piepers, E. J. E. Cottaar, A. H. M. Verkooijen, and K. Rietema, "Effects of pressure and type of gas on particle-particle interaction and the consequences for gas—solid fluidization behaviour," *Powder Technology*, vol. 37, pp. 55-70, 1984
- ²⁴ M. Horio and A. Nonaka, "A generalized bubble diameter correlation for gas-solid fluidized beds," *AIChE Journal*, vol. 33, pp. 1865-1872, 1987.
- ²⁵ M. Y. Large JF, Bergougnou MA., "Interpretative model for entrainment in a large gas fluidized bed," presented at the International Powder Bulk Solids Handling and Processing Conference, Chicago, 1976.
- ²⁶ A. C. Rowe. BA Partridge, "The mechanisms of solid mixing in fluidized beds," *Trans. Inst. Chem. Eng.*, vol. 9, pp. 271-283, 1965.
- ²⁷ A. E. Qureshi and D. E. Creasy, "Fluidised bed gas distributors," *Powder Technology*, vol. 22, pp. 113-119, 1979.



- ²⁸ San José, M. J.; Olazar, M.; Aguayo, A. T.; Arandes, J. M.; Bilbao, J. Expansion of Spouted Beds in Conical Contactors. *Chem. Eng. J.* 1993, 51, p.45-52.
- ²⁹ Zhao, J.; Lim, C. J.; Grace, J. R. Flow Regimes and Combustion Behaviour in Coal-Burning Spouted and Spout-Fluid Beds. *Chem. Eng. Sci.* 1987, 42, p.2865-2875.
- ³⁰ Passos, M. L.; Mujumdar, A. S. Spouted and Spout-Fluidized Beds for Grain Drying. *Drying Technol.* 1989, 7, p.663-697.
- ³¹ Volpicelli, G.; Raso, G.; Massimilla, L. Gas and Solid Flow in Bidimensional Spouted Beds. In *Proceedings of the International Symposium on Fluidization*; Drinkenburg, A. A. H., Ed.; Netherlands University Press: Amsterdam, The Netherlands, 1967. p123-133.
- ³² Epstein N. Liquid-solids fluidization, handbook of fluidization and fluid-particle system, Marcel Dekker, Editor W.C Yang., New York, 2003. p.705-764. ISBN 0-8247-0259-X
- ³³ Mathur, K.B. and Epstein, N. Spouted Beds. Academic Press, New York, 1974. p.304
- ³⁴ Olazar, M.; San José, M. J.; Aguayo, A. T.; Arandes, J. M.; Bilbao, J. Stable Operation Conditions for Gas-Solid Contact Regimes in Conical Spouted Beds. *Ind.Eng. Chem. Res.*, vol. 31, 1992. p.1784-1791
- ³⁵ Olazar, M.; San Jose´, M. J.; Izquierdo, M. A.; Alvarez, S.; Bilbao,J. Fountain Geometry in Shallow Spouted Beds. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2004,43, p.1163–1168.
- ³⁶ Malek, M. A.; Madonna, L. A.; Lu, B. C. Y. Estimation of Spout Diameter in a Spouted Bed. *Ind. Eng. Chem. Process Des. Dev.* 1963, 2, p.30-34.
- ³⁷ Olazar, M.; San Jose´, M. J.; Alvarez, S.; Morales, A.; Bilbao, J.Design of Conical Spouted Beds for the Handling of Low-Density Solids. *Ind. Eng. Chem. Res.* 2004, 43, p.655–661.
- ³⁸ Epstein, N.; Grace, J. R. Spouted and Spout-Fluid Beds: Fundamentals and Applications, Cambridge University, 2011. p.81-104. ISBN 978-0-521-51797-3
- ³⁹ Sutanto, W.; Epstein, N.; Grace, J. R. Hydrodynamics of Spout-Fluid Beds. *Powder Technol.*, vol. 44, 1985. p.205-212
- ⁴⁰ Bi, H. T.; Macchi, A.; Chaouki, J.; Legros, R. Minimum Spouting Velocity of Conical Spouted Beds. *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 75, 1997. p.460-465
- ⁴¹ A. M. Nikolaev and L. G. Golubev. Basic hydrodynamic characteristics of a spouting bed. *Izv. Vyssh. Ucheb. Zaved. Khim. Tekhnol.*, 7;1964, p.855–857.
- ⁴² "Fluid Bed Design Aspects," in *Fluid Bed Technology in Materials Processing*, ed: CRC Press, 1998.

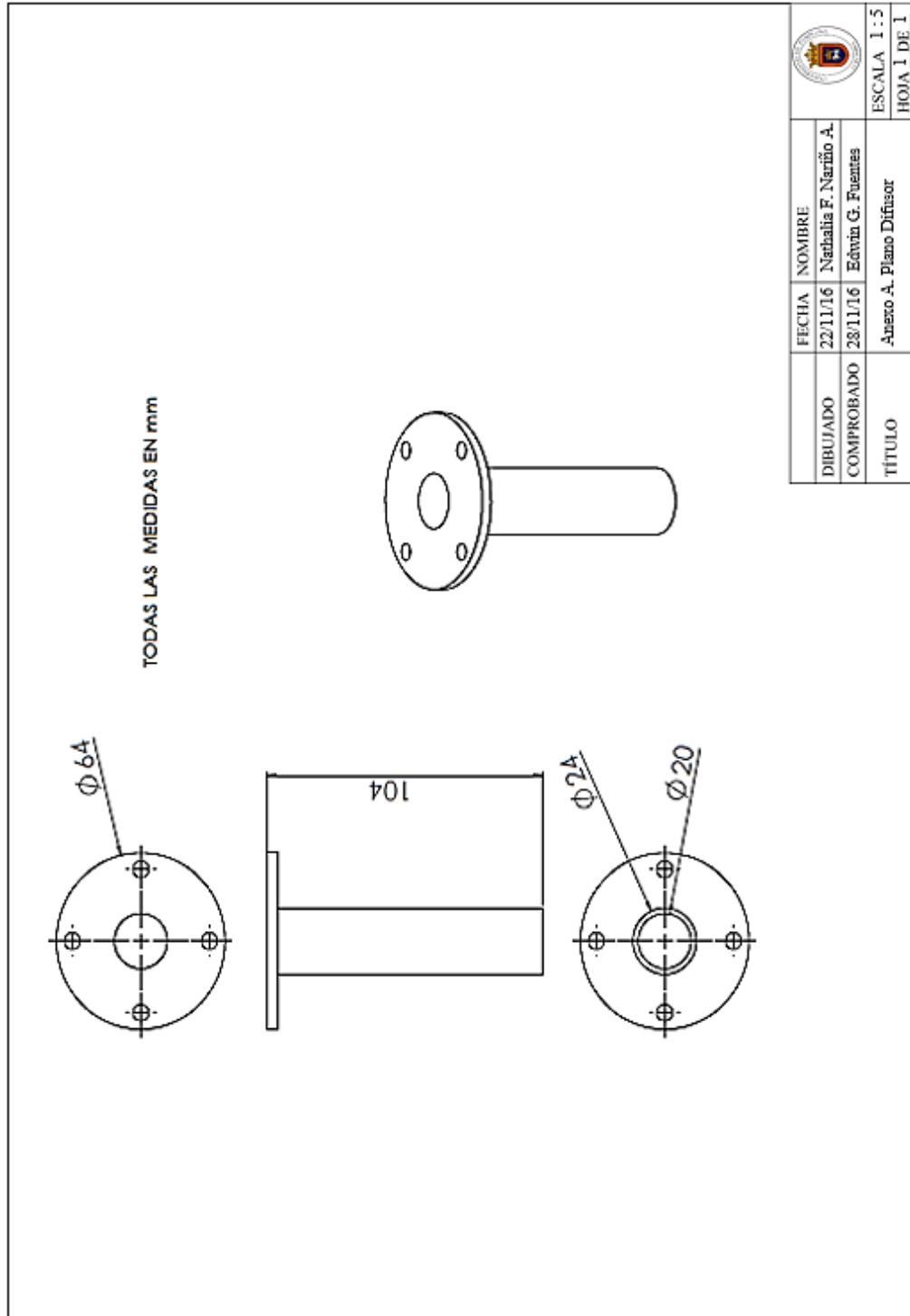


- ⁴³ Litz, "Design of gas distributors," *Chemical engineering*, vol. November 13, pp. 162-166, 1972.
- ⁴⁴ W. C. Yang, "Fluidization, Solids Handling, and Processing - Industrial Applications," ed: William Andrew Publishing/Noyes, 1998.
- ⁴⁵ A. Markowski and W. Kaminski. Hydrodynamic characteristics of jet spouted beds. *Can. J.Chem. Eng.*, 61; 1983, p.377–381.
- ⁴⁶ M. Choi and A. Meisen. Hydrodynamics of shallow, conical spouted beds. *Can. J. Chem.Eng.*, 70; 1992, p.916–924.
- ⁴⁷ Povrenovic, D. S.; Hadzismajlovic, Dz. E.; Grbavcic, Z. B.; Vucovic, D. V.;Littman, H. Minimum Fluid Flowrate, Pressure Drop and Stability of a Conical Spouted Bed. *Can. J. Chem. Eng.*, vol. 70, 1992. p.216-222
- ⁴⁸ Dz. E. Hadzismajlovic, Z. B. Grbavcic, D. V. Vucovic, D. S. Povrenovic, and H. Littman. A model for calculating the minimum fluid flowrate and pressure drop in a conical spouted. In *Fluidization V*, ed. K. Ostergaard and A. Sorensen (New York: Engineering Foundation), 1986, p. 241–248.



9 ANEXOS

9.1 Anexo A. Vista lateral, superior, inferior e isométrico de difusor



9.2 Anexo B. Vista lateral, superior, inferior e isométrico de contactor cónico

