



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

POSGRADO EN CIENCIAS EN INGENIERÍA DE MATERIALES
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

DISPERSIÓN DE BURBUJAS EN UN MEDIO AGITADO

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE:
MAESTRO EN CIENCIA E INGENIERÍA DE MATERIALES

PRESENTA:
DANTE HERNÁNDEZ DÍAZ

TUTOR PRINCIPAL
DR. J. ROBERTO ZENIT CAMACHO
INSTITUTO DE INVESTIGACIONES EN MATERIALES

MIEMBROS DEL COMITÉ TUTOR
DR. FRANCISCO SOLORIO ORDAZ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DR. ENRIQUE SOTO CASTRUITA
INSTITUTO MEXICANO DEL PETRÓLEO

MÉXICO D.F., DICIEMBRE, 2015



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

Todo el material contenido en esta tesis esta protegido por la Ley Federal del Derecho de Autor (LFDA) de los Estados Unidos Mexicanos (México).

El uso de imágenes, fragmentos de videos, y demás material que sea objeto de protección de los derechos de autor, será exclusivamente para fines educativos e informativos y deberá citar la fuente donde la obtuvo mencionando el autor o autores. Cualquier uso distinto como el lucro, reproducción, edición o modificación, será perseguido y sancionado por el respectivo titular de los Derechos de Autor.

Of. PCeIM/1306/15

C. DANTE HERNÁNDEZ DÍAZ.
P R E S E N T E

De acuerdo a su solicitud, para presentar su examen de grado de Maestro correspondiente al Programa de Maestría en Ciencia e Ingeniería de Materiales, en el que defenderá su tesis titulada "Dispersión de burbujas en un medio agitado", le informo que el Comité Académico en su sesión del 30 de septiembre de 2015, acordó nombrar al siguiente jurado:

CARGO	NOMBRE	ADSCRIPCION
Presidente	Dr. Eduardo Ramos Mora	Instituto de Energías Renovables.
Primer Vocal	Dr. José Roberto Zenit Camacho	Instituto de Investigaciones en Materiales.
Segundo Vocal	Dr. Martín Salinas Vázquez	Instituto de Ingeniería.
Tercer Vocal	Dra. Catalina Elizabeth Stern Forgach	Facultad de Ciencias.
Secretario	Dr. José Enrique Guzmán Vázquez	Instituto de Ingeniería.

Agradeceré a usted entregar en esta coordinación los votos aprobatorios con la firma de cada jurado, en las formas anexas, y ponerse de acuerdo con su jurado para definir la fecha del examen y hacérmelo saber.

Se le informa al jurado que cuenta con un plazo de 20 días hábiles para evaluar la tesis y emitir su dictamen. Y por acuerdo del Comité Académico del 27 de agosto de 2014, la validez de este jurado será por seis meses.

Sin otro particular de momento, aprovecho la ocasión para enviarle un saludo cordial.

Atentamente
 Cd. Universitaria, D.F., a 5 de octubre de 2015.
 "POR MI RAZA HABLARÁ EL ESPÍRITU"



DR. HERIBERTO PFEIFFER PEREA.
 COORDINADOR

c.c.p.-Integrantes del Jurado

Resumen

La inyección de burbujas es un fenómeno que ha sido estudiado por su importancia en los procesos de mezclado. En este trabajo se estudia la respuesta de una burbuja ante las variaciones de un flujo agitado. Su importancia radica en la forma en como las burbujas alteran su trayectoria bajo la agitación del medio.

El trabajo se llevó a cabo experimentalmente, inyectando una burbuja aislada dentro de un canal con un flujo descendente. La agitación es producida a partir de la interacción del fluido con un arreglo aleatorio de esferas. La longitud del canal permite analizar distintas zonas de intensidad de agitación. De igual manera es posible modificar el punto de inyección, lo que permite analizar la respuesta en la dispersión de las burbujas a cambios espaciales. Las mediciones se llevaron a cabo por medio de análisis de imágenes de las cuales se obtuvieron datos de velocidad y desplazamiento de las burbujas, que posteriormente se analizaron estadísticamente. De los resultados se observaron cambios significativos en la dispersión debido a la intensidad de agitación, mientras la respuesta a los cambios en el punto de inyección no muestra cambios apreciables.

Índice general

Índice general	III
1. Introducción	1
1.1. Objetivo	4
2. Flujo con burbujas	5
2.1. Movimiento libre de una burbuja	6
2.2. Agitación producidas por burbujas	7
2.3. Dispersión de burbujas	9
3. Flujo turbulento	12
3.1. Agitación producida por estelas turbulentas	14
3.2. Turbulencia isotrópica	15
3.3. Relación entre burbujas y turbulencia	16
4. Proceso experimental	18
4.1. Dispositivo experimental	19
4.2. Inyección de burbujas	21
4.3. Adquisición de imágenes	22
4.4. Caracterización del flujo en el canal	22
5. Resultados	26
5.1. Procesamiento de imágenes	26
5.2. Procesamiento de datos	28
5.3. Análisis de dispersión	31

5.4. Análisis de fluctuaciones de velocidad	35
6. Conclusión	46
Bibliografía	49

Capítulo 1

Introducción

Existen distintas áreas de la industria donde el estudio de flujo con burbujas se vuelve relevante para optimizar procesos. Las aplicaciones más importantes de estos estudios están relacionadas con los procesos de mezclado e intercambio de energía. Sabemos que cuando un fluido interactúa con alguna partícula sólida o deformable se producen alteraciones en su movimiento. Estas alteraciones propician la transferencia de energía mecánica y térmica además de favorecer el fenómeno de difusión [1–3]. Por esta razón las industrias químicas, farmacéuticas, alimentarias, energéticas y otras más se han inclinado a implementar técnicas que involucran el uso de flujos burbujeantes [4–6].

A lo largo de los años se han llevado investigaciones con el propósito de identificar las características de un flujo burbujeante. Los primeros estudios fueron dedicados a clasificar los distintos regímenes de flujo. Gracias a esto, se encontraron patrones que varían según la proporción de ambas fases [7, 8]. Posteriormente se buscó identificar los factores que determinan la transferencia de energía de las burbujas hacia el líquido [9, 10]. Las investigaciones son variadas y abarcan gran parte del fenómeno, desde estudios relativamente simples como el paso de una sola burbuja a través de un medio líquido [11, 12], hasta estudios sobre la dispersión y distribución en tamaño de las burbujas, los cuales se relacionan con la turbulencia inducida por el paso de burbujas [12–15].

Con el avance de la tecnología y la demanda del sector industrial, se lograron mejorar técnicas como la simulación, el análisis de imágenes, así como la implementación de técnicas avanzadas de velocimetría [16–20]. Esto permitió una observación más detallada de las interacciones que se presentan entre las burbujas y el flujo, con lo cual lograron identificarse diferencias entre la turbulencia generada únicamente a partir de las fluctuaciones, debidas a las altas velocidades del fluido, y la turbulencia inducida por las burbujas, comúnmente llamada pseudoturbulencia [21–23].

Estudios recientes se han enfocado en analizar la agitación producida por el paso de un gran número de burbujas, con el propósito de incrementar la transferencia de energía hacia el líquido [4, 22, 24]. Sin embargo se han encontrado restricciones vinculadas a la dispersión de las burbujas y el tamaño requerido para dicho propósito. Cuando se tiene una gran cantidad de partículas moviéndose en un medio, la probabilidad de que estas choquen entre sí es muy alta [25]. En el caso donde las partículas poseen interfaces que se deforman con las perturbaciones del medio, como en el caso de las burbujas; estas colisiones pueden dar lugar a la coalescencia [26]. En el proceso contrario, donde la intensidad de la agitación es tan alta que las fluctuaciones de velocidad en el líquido llegan a vencer las fuerzas de cohesión en la superficie de la burbuja, lo que se produce es una ruptura [27]. Cada caso produce diferentes cambios en la agitación del medio, debido a que la creación o destrucción de las burbujas modifican la forma en que estas se desplazan en conjunto.

La coalescencia y ruptura son fenómenos altamente complejos que no han sido entendidos totalmente; sin embargo, se conocen algunas de sus efectos y se sabe que están ligados a la forma en que las burbujas se esparcen dentro del líquido, es por esto que estudiar el movimiento de las burbujas a través de un entorno agitado se vuelve importante para entender de que manera las fluctuaciones de velocidad se propagan en el medio.

El presente trabajo es un estudio experimental sobre la distribución espacial de burbujas que ascienden a través de un entorno agitado. La investigación se llevó a cabo utilizando un canal donde se induce un flujo en la dirección de la gravedad,

además el canal cuenta con un arreglo aleatorio de esferas. La agitación del medio está determinada por la interacción de las estelas producidas por las esferas, esto simula, en cierta medida, las condiciones a las que está sometida una sola burbuja en un flujo burbujeante. Debido a las condiciones del experimento se evitan los fenómenos de coalescencia y ruptura dejando aisladas las interacciones de la burbuja con el entorno, de esta forma, es posible analizar la manera en que las fluctuaciones de velocidad en el líquido fomentan la dispersión de la fase gaseosa.

1.1. Objetivo

Como objetivo general se busca estudiar el efecto de la turbulencia sobre una burbuja aislada, que se mueve a contra flujo, utilizando un canal con un arreglo aleatorio de esferas. Se estudiarán tres zonas con distintas intensidades de agitación, además se evaluarán seis distintas regiones de inyección con el propósito de observar la respuesta de las burbujas a cambios espaciales según la zona turbulenta.

Entre los objetivos principales se encuentran: el análisis de las variaciones de la posición de las burbujas en la dirección transversal al flujo; determinar la manera en que la dispersión de las burbujas es afectada por el entorno turbulento y el análisis de la relación entre las fluctuaciones de la velocidad del líquido y las variaciones en la velocidad de la burbuja. Cada punto requiere de objetivos secundarios relacionados a aspectos técnicos del experimento como: la adquisición de secuencias de imágenes por medio de una cámara de alta velocidad y la escritura de un código para el procesamiento de las imágenes, además del procesamiento de la información obtenida.

Capítulo 2

Flujo con burbujas

El flujo con burbujas es aquel donde se tienen presentes partículas gaseosas dispersas en un medio líquido. Se caracteriza por ser un fenómeno complejo debido a la distintos tipos de interacción entre las burbujas y el mismo fluido. Además las burbujas poseen superficies deformables que al modificarse cambian la manera en la que éstas interactúan con el medio [10, 14].

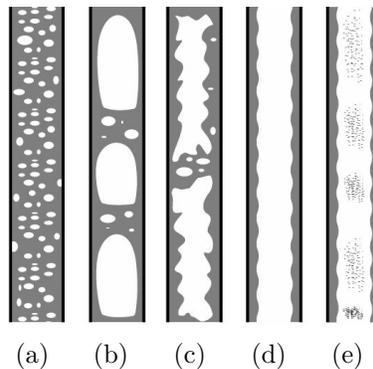


Figura 2.1: *Patrones de flujo con burbujas: a) burbujeante, b) tapón, c) agitado, d) anular y e) anular tenue. [8]*

La interacción simultanea de la tensión superficial de las burbujas y la fuerza de gravedad llegan a formar patrones o regímenes, cada uno con sus distintas características. Debido a su complejidad los investigadores han estudiado el flujo con burbujas en canales tubulares y han logrado identificar distintos regímenes de acuerdo a la orientación de los canales, todo esto con la finalidad de facilitar su estudio [8].

En la figura 2.1 se muestra la clasificación de los regímenes: el primero llamado burbujeante en donde las partículas de gas se dispersan de forma homogénea sobre el medio y las burbujas tienen un mismo tamaño, también se le conoce como el caso ideal del flujo con burbujas; el segundo patrón llamado flujo tapón, se caracteriza por largas burbujas en forma de bala y la presencia de burbujas secundarias mucho más pequeñas; al tercer régimen se le conoce como flujo agitado el cual es altamente inestable y de naturaleza oscilatoria; el cuarto tipo de flujo es el anular donde la fase gaseosa ocupa la parte central del canal y el líquido forma un anillo alrededor de ella, existe además la presencia de pequeñas gotas de líquido en la fase gaseosa; por último tenemos el anular tenue que tiene una distribución de gas-líquido igual al anterior, sin embargo se presenta una mayor concentración de gotas de líquido en la parte central del canal debido al incremento en el flujo de gas.

2.1. Movimiento libre de una burbuja

Un movimiento libre comprende el desplazamiento de la burbuja sin más influencia que la flotación inherente a ella y la resistencia que el medio oponga a su paso. Fuera de cualquier perturbación la burbuja seguirá la trayectoria que contraponga menor resistencia. Las distintas trayectorias que puede adoptar dependen en gran medida de la forma de la burbuja; está a su vez depende de las propiedades del fluido en el cual se encuentre inmersa [11]. Factores como la viscosidad y la tensión superficial modifican la interfaz de la burbuja haciendo que esta adquiera desde estructuras esféricas hasta formas muy irregulares, esto cambia la hidrodinámica de la burbuja incrementando o disminuyendo su velocidad según sea el caso [9, 20].

El tamaño de la burbuja es otro factor que influye en su desplazamiento. La cantidad de volumen de gas encerrado dentro de la interfaz, además de la diferencia de densidad con el líquido, es lo que da origen a la flotación. Un mayor volumen de gas significa una mayor cantidad de masa, entonces las burbujas de mayor tamaño poseen mayor inercia y en consecuencia la resistencia que el fluido opone al paso de las burbujas genera menos alteraciones en el movimiento de burbujas grandes, en comparación con aquellas de tamaños menores.

Las trayectorias que una burbuja traza desde que parte del reposo van desde simples rectas, hasta grandes oscilaciones en tres dimensiones. La influencia del líquido sobre la burbuja es quien determina el curso que ésta seguirá; sin embargo, el paso de la burbuja también genera alteraciones en el fluido [1, 3]. Durante el movimiento, la burbuja deja detrás de sí un rastro caracterizado por la diferencia de presión entre las caras frontal (la superficie que es normal al movimiento de la burbuja) y anterior (la superficie opuesta a la cara frontal) de la burbuja. Ésta diferencia de presión da origen a vórtices que se mantiene girando en el fluido por un periodo de tiempo, el cual está en función de la velocidad de la burbuja. Los vórtices se generan continuamente durante el desplazamiento llegando a formar una cadena de vórtices. A ésta se le conoce como la estela de la burbuja.

El mecanismo por el cual las burbujas generan estelas ha sido de gran interés para los investigadores, ya que la simple presencia de ésta crea perturbaciones en el movimiento de la burbuja y en consecuencia la agitación del líquido [15, 28]. Gracias a esto es posible implementar métodos que favorezcan el mezclado utilizando burbujas. Desde luego que una sola burbuja no puede generar la suficiente agitación para mezclar grandes cantidades de fluido, por esta razón se ha optado por trabajar con una mayor cantidad de burbujas de distintos tamaños, ajustando estos parámetros de acuerdo a la aplicación.

2.2. Agitación producidas por burbujas

A pesar de que las burbujas favorecen los procesos de mezclado, transferencia de energía y difusión, no es correcto asociar estas perturbaciones en el flujo con la turbulencia. Aunque comparten algunas de sus características como la aleatoriedad, la energía que disipan en el medio no es comparable con la que se disipa en un líquido donde se tiene turbulencia desarrollada. Existen muchos estudios que remarcan la diferencia entre los dos conceptos haciendo énfasis en los mecanismos por los cuales se desarrolla cada una, de esta forma, la manera en la que influyen individualmente en la agitación del medio se vuelve relevante para entender el fenómeno global [1, 21, 29].

La agitación del medio depende, en gran medida, de la cantidad de burbujas que se desplazan dentro de él. El paso de una burbuja a través del fluido propicia el movimiento de este, lo que significa que la burbuja entrega parte de su energía al líquido. La creación de estelas es prueba de ello y son estas las que se encargan de transmitir la energía de la burbuja hacia fluido.

El flujo burbujeante se caracteriza por una separación homogénea entre partículas y una distribución monodispersa en relación al tamaño. Las variaciones en ambas producen cambios en la agitación del fluido, los cuales pueden ser aprovechados para optimizar procesos de mezclado. La separación, así como el número y el tamaño de las burbujas, depende de la cantidad de gas inyectada, la forma típica de representar esta cantidad es la fracción de vacío

$$\alpha = \frac{V_g}{V},$$

la cual es el cociente entre el volumen de gas (V_g) y el volumen total ocupado por las dos fases (V). El aumento de α se traduce en un incremento en la cantidad de burbujas, y a su vez, significa variaciones en el tamaño y la forma geométrica las cuales influyen directamente en la tasa de producción de agitación en el líquido. [15]

En un flujo donde se tiene un gran número de burbujas, las estelas producidas por éstas, interactúan con el fluido provocando variaciones aleatorias de velocidad. Entre mayor sea la cantidad de estelas en el flujo, mayor será la resistencia que el medio opone al paso de las burbujas. Entonces la agitación del líquido dependerá de dos factores principales: el primero es la agitación inducida por las burbujas, la cual depende de la fracción de vacío α y el tamaño de las burbujas. Por otro lado la agitación debida únicamente al fluido también es una contribución importante ya que la relación entre la fase dispersa y la fase continua transfiere energía en ambos sentidos [29]. Es decir que las burbujas entregan parte de su energía para agitar el fluido y de igual manera las burbujas son afectadas por las perturbaciones producida en el líquido.

Como se mencionó anteriormente, el hecho de que las burbujas transfieran energía al líquido y viceversa produce variaciones en el movimiento de las burbujas. Este a su vez genera otros cambios que repercuten en la agitación del medio. Sin embargo, no debe pensarse que las perturbaciones producidas por ambas fases se incrementaran continuamente dado que existe un límite a la cantidad de burbujas presentes en flujo. Es claro que la separación entre las burbujas se reducirá a medida que la cantidad de estas aumente. En consecuencia la cantidad de líquido también se verá reducida haciendo menos eficaz el desarrollo de las estelas de las burbujas, lo cual da como resultado una disminución en la agitación producida por la fase gaseosa.

Puede notarse que la agitación en un flujo burbujeante es un fenómeno altamente complejo debido a las distintas interacciones que se presentan y al carácter aleatorio de sus fluctuaciones. No obstante es posible estudiar este tipo de fenómenos aislando las contribuciones de cada interacción para reducir el problema. Todo esto con el propósito de explicar de qué manera influye la presencia de cada fase en el comportamiento global del flujo.

2.3. Dispersión de burbujas

Los cambios aleatorios de velocidad de la fase líquida alteran la trayectoria de las burbujas haciendo que estas se separen unas de otras. A este comportamiento se le conoce como dispersión. Los factores que determinan la dispersión de las burbujas son la agitación del medio y la inercia de las burbujas. Las fluctuaciones de velocidad en el líquido provocan alteraciones en el movimiento por que generan una resistencia que impide el libre paso de las burbujas. Mientras el número de burbujas aumenta, la agitación del medio provocará mayores alteraciones en la velocidad de las burbujas debido a su interacción con las estelas [15, 28].

La contribución de las estelas de la burbuja tiene dos efectos: el primero es el movimiento del fluido y el segundo es la alteración del movimiento de otras burbujas. Puede decirse que la interacción entre ellas se da a través de las perturbaciones

provocadas en el líquido por el paso de otras. En el caso de una sola burbuja, la dinámica de esta es controlada por los vórtices producidos en su superficie y su movimiento en zigzag se debe al contacto con su estela [18, 30]. Esto indica que las oscilaciones permanecerán en un rango acotado que depende de la inercia de la burbuja, a menos que exista alguna otra perturbación que altera su trayectoria.

Los vórtices producidos por las burbujas requieren de espacio para desarrollarse. Al aumentar la cantidad de burbujas en el medio, la distancia entre burbujas se ve reducida, por lo que las variaciones en la velocidad del fluido tienden a modificar la amplitud de las oscilaciones de las burbujas. La presencia de estelas en el líquido favorece la separación entre las burbujas debido a que estas representan un obstáculo al libre movimiento de las burbujas. Conforme la separación entre ellas aumenta, la influencia de sus vecinas se ve reducida. Por otra parte, al tener desplazamientos mayores en la dirección transversal, las burbujas pueden propagar la perturbación en áreas más extensas dentro del medio debido a que el espacio en cual los vórtices pueden desarrollarse se incrementa.

A pesar de que la separación entre burbujas reduce la resistencia que el medio impone al paso de estas, no es correcto señalar una independencia total en el movimiento conjunto de las burbujas. Esto solo sería posible si las partículas estuvieran tan alejadas que las interacciones entre sus estelas no se presentaran, lo cual regresaría el análisis al caso de una burbuja aislada que asciende dentro de un fluido en reposo. Sin embargo existe la restricción dada por las dimensiones del contenedor, el cual limita el espacio disponible para que las burbujas se muevan a través del medio.

En lo que respecta al tamaño de las burbujas, la inercia de estas será mayor conforme el volumen se incremente, por lo tanto la dispersión depende también de este factor. La energía necesaria para alterar la trayectoria de la burbuja debe ser comparable a la cantidad de inercia de ésta. En el caso del flujo burbujeante, la agitación del medio tendrá un menor efecto si las burbujas son lo suficientemente grandes para ser perturbadas por las fluctuaciones de velocidad. Por el contrario, si las burbujas son pequeñas tenderán a adoptar el patrón de flujo al cual están sometidas. Esto

se ha observado en estudios de burbujas en flujos turbulentos donde el efecto de la flotación de las burbujas genera distintas distribuciones de acuerdo al tamaño de las burbujas.

Capítulo 3

Flujo turbulento

En mecánica de fluidos, la turbulencia es uno de los flujos más estudiados, y sin embargo uno de los menos comprendidos. Esto se debe principalmente a sus características. Debido a que los flujos turbulentos son aleatorios, inestables, desordenados y disipativos, es difícil hallar una teoría que unifique la gran variedad de estos flujos [31]. Aun así, desde hace tiempo se han realizado estudios que buscan explicar las particularidades de la turbulencia y es necesario desde que la gran mayoría de los flujos en la naturaleza tiene un carácter turbulento.

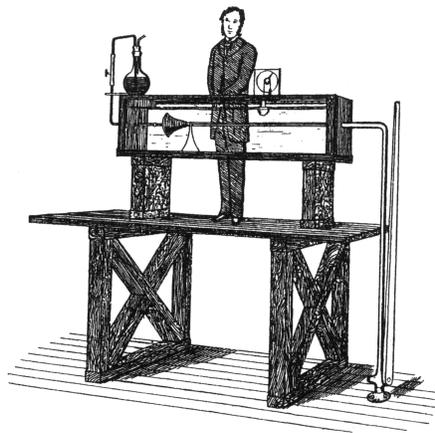


Figura 3.1: *Experimento de Reynolds*

Uno de los primeros investigadores en trabajar con turbulencia fue Osborne Reynolds (1842 – 1912), quien gracias a sus experimentos, descubrió la relación entre la energía debida al movimiento del fluido y la energía viscosa del mismo. A esta

relación se le conoce como número de Reynolds,

$$Re = \frac{u L}{\nu},$$

donde u es la velocidad del flujo, L es la longitud característica y ν es la viscosidad cinemática del fluido. Desde entonces el número de Reynolds ha servido como referencia para diferenciar el régimen de flujo de un fluido.

La turbulencia se origina a partir de perturbaciones que crecen con las fluctuaciones periódicas de la vorticidad; posteriormente se genera una inestabilidad que convierte las perturbaciones en dos dimensiones a inestabilidades en tres dimensiones; lo siguiente es el incremento de las perturbaciones tridimensionales hasta alcanzar altas fluctuaciones; por último se obtiene la turbulencia totalmente desarrollada donde la energía es transferida a través del movimiento del fluido hasta que logra disiparse [31, 32].

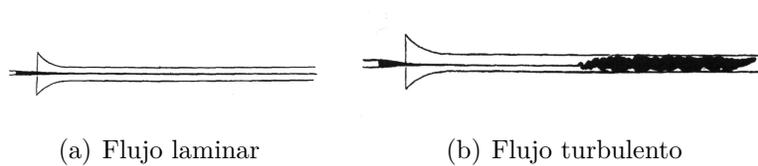


Figura 3.2: Esquemas de Reynolds de la transición de flujo laminar a flujo turbulento.

Un flujo turbulento requiere de un suministro constante de energía, de lo contrario este desaparecerá en un periodo corto de tiempo debido a que es un flujo altamente disipativo. Por esta razón, se ha buscado incrementar la tasa de producción de turbulencia con el propósito de mejorar la eficiencia de los procesos de mezclado y difusión. Comúnmente esto se logra por medio de objetos sólidos como: placas, cilindros, propelas, rejillas, esferas, etcétera; los cuales producen la agitación del líquido. Un objeto inmerso en una corriente de fluido es un obstáculo que origina perturbaciones a su alrededor, siempre y cuando la velocidad a la que se desplaza el fluido sea lo bastante grande. Estas perturbaciones tienden a crecer a medida que la velocidad del flujo aumenta y en consecuencia la agitación del medio también aumentará.

3.1. Agitación producida por estelas turbulentas

Las estelas son las regiones donde se tiene un flujo perturbado (comúnmente turbulento) y son producidas por la interacción entre un cuerpo sólido y un fluido. La intensidad de las fluctuaciones depende de las dimensiones del objeto y de la velocidad del flujo [31]. Tomando como ejemplo una esfera fija en un flujo a alta velocidad, la estela está formada por vórtices que se desprenden continuamente de la superficie. Cada vórtice se descompone en vórtices más pequeños hasta que se disipan totalmente y el fluido recupera su carácter laminar.

En la industria es común encontrar arreglos de objetos que perturban el flujo. Estos arreglos tienen como objetivo incrementar la interacción entre estelas, por lo que el flujo se vuelve turbulento más rápidamente, en comparación con los flujos donde sólo hay un objeto inmerso en el fluido. Esto viene del hecho de que la turbulencia se desarrolla a partir del incremento de las fluctuaciones de velocidad y de presión. En el caso donde solo hay un objeto, las fluctuaciones se incrementan por la inestabilidad en la superficie de éste. Sin embargo, al tener más obstáculos las perturbaciones que cada uno produce contribuyen para aumentar la inestabilidad del flujo. En consecuencia la turbulencia se desarrollará en un período de tiempo más corto [33].

La interacción entre múltiples estelas da lugar a una mayor agitación en el líquido, debido a que la adición de nuevos vórtices favorece el intercambio de energía entre éstos. Existen dos formas o procesos por las que se transfiere la energía; la primera es a partir de los vórtices de mayor tamaño, los cuales pueden alcanzar como máximo la dimensión del objeto que los produce. Estos vórtices son los más energéticos debido a la cantidad de masa que se mueve dentro de ellos. Al ser un fenómeno disipativo, los vórtices de mayor tamaño se descomponen en vórtices más pequeños con menor cantidad de energía hasta que estos llegan a desaparecer por el efecto de la viscosidad del fluido. Por otra parte existe un proceso inverso, donde los vórtices de menor tamaño, al interactuar, dan lugar a vórtices más grandes debido a un proceso de adición entre ellos; no debe olvidarse que sigue siendo un proceso con alta disipación, por lo que a pesar de que la dimensión y en consecuencia la energía

se incrementan, esta tiende a disiparse constantemente. Así que el tamaño que los vórtices no llegara a ser tan grandes como el objeto que los genero [31].

En un flujo donde se utilizan objetos para generar turbulencia, se aprovecha la interacción entre las estelas ya que éstas favorecen la adición de una gran cantidad de vórtices lo cual produce mayores fluctuaciones de velocidad en el fluido y en consecuencia la zona donde el flujo está agitado y la duración de la turbulencia (el tiempo que le lleva a las fluctuaciones atenuarse) también se ve incrementado. La interacción entre las estelas además propicia un comportamiento peculiar en la turbulencia relacionado con la aleatoriedad del flujo al cual se le conoce como isotropía, del cual se hablará a continuación.

3.2. Turbulencia isotrópica

La turbulencia isotrópica es aquella donde no existe un gradiente principal de velocidad, es decir que las fluctuaciones de las componentes de velocidad son equiparables entre sí [31, 34]. Al tener un flujo turbulento como el producido por un chorro, es claro que se tiene un flujo principal. Aun así, mientras la turbulencia se desarrolla, las variaciones de velocidad se incrementan en las tres componentes. Si la amplitud de dichas fluctuaciones son de la misma magnitud, significa que la turbulencia disipa la misma cantidad de energía en todas direcciones en este caso diremos que la turbulencia tiene un carácter isotrópico.

La isotropía implica que no existe una dirección preferencial, Esto se extrae del hecho de que no existe una velocidad principal. Una partícula sujeta a este tipo de flujos sentirá los efectos del campo turbulento y actuará en consecuencia, si la partícula no tiene la suficiente inercia para vencer las fluctuaciones de velocidad ésta se moverá siguiendo al flujo. En el caso contrario donde la inercia de la partícula sea lo suficientemente alta en comparación con la energía debida a las fluctuaciones del campo, ésta simplemente sentirá las perturbaciones del flujo alterando levemente su trayectoria.

Para el caso de una burbuja inmersa en un campo turbulento isotrópico, la influencia del entorno afectará la trayectoria de la burbuja, debido a que las fluctuaciones de velocidad en el flujo afectan directamente sus componentes de velocidad, alterando su trayectoria natural. Sin embargo al ser las fluctuaciones de la misma magnitud en todas las componentes, las alteraciones en el recorrido de la burbuja serán comparables a las fluctuaciones de velocidad en el líquido, a no ser que exista un cambio considerable en la magnitud de las fluctuaciones o un desequilibrio entre las fuerzas que mantienen el movimiento de la partícula y flujo.

3.3. Relación entre burbujas y turbulencia

Estrictamente las burbujas no generan turbulencia, como se mencionó en la sección 2.2. Las burbujas producen el movimiento aleatorio del fluido; sin embargo, este movimiento carece de la inestabilidad característica de los flujos a un alto número de Reynolds. En consecuencia la cantidad de energía que se disipa por medio de las burbujas será diferente en comparación con la de un flujo a alta velocidad. Por esta razón a la agitación producida por burbujas se le conoce como pseudo-turbulencia. A pesar de esto, la presencia de burbujas en flujos turbulentos ha demostrado tener un gran impacto sobre los procesos de mezclado y difusión, debido, a que de acuerdo a la cantidad y las dimensiones de las burbujas, éstas pueden incrementar o atenuar las fluctuaciones producidas por la turbulencia [35,36].

De las investigaciones realizadas con burbujas, se han encontrado distintos factores que alteran la tasa de generación de turbulencia, entre los más importantes se encuentran, la dimensión y la cantidad de burbujas. La primera se relaciona con la energía que la burbuja suministra al fluido. Al tener un tamaño mayor las burbujas poseen mayor inercia, por lo que producen vórtices de gran tamaño que contiene mucha energía y éstos son los que generan la agitación del medio. Por otra parte, la reducción en el tamaño de las burbujas implica un menor suministro de energía al fluido, por lo que el paso de éstas no tiene gran influencia sobre la agitación del líquido.

Existen otros factores que se ven afectados por el incremento en el número de burbujas, como la disminución de la velocidad de las partículas en conjunto, así como la aparición de burbujas que coalescen, debido a que el espacio de separación entre ellas se reduce [15, 28].

El paso de un gran número de burbujas a través de un líquido produce fluctuaciones similares a las que se tienen en un flujo turbulento isotrópico, debido, a que la interacción entre las estelas genera alteraciones de magnitud similar en todas direcciones [21, 37]. Entendiendo esto es posible recrear estas condiciones y analizar la forma en la que las burbujas contribuyen a la generación de turbulencia estudiando simplemente las variaciones de velocidad en el líquido. Por otra parte nos permite estudiar otras características de los flujos con burbujas como la influencia del medio sobre el paso de una burbuja y como ésta responde físicamente a las perturbaciones. En este trabajo se generó un entorno turbulento isotrópico a partir de un arreglo de esferas colocado de manera aleatoria, con lo cual se busca estudiar la respuesta en velocidad y distribución espacial de una burbuja aislada y de esta forma obtener datos sobre el fenómeno de dispersión en flujos burbujeantes.

Capítulo 4

Proceso experimental

Los experimentos se llevaron a cabo utilizando un circuito de flujo que incluye un canal donde se tiene un arreglo aleatorio de esferas. Dentro del canal se indujo un flujo en dirección descendente, esto en conjunto con el arreglo de esferas producen la agitación del medio. Posteriormente se introdujeron burbujas aisladas con el propósito de estudiar su interacción con el medio y la forma en que este influye en su trayectoria. Los fluidos de trabajo fueron agua para la fase líquida en condiciones ambientales (1 atm y 20°C), el gas utilizado para las burbujas es aire.

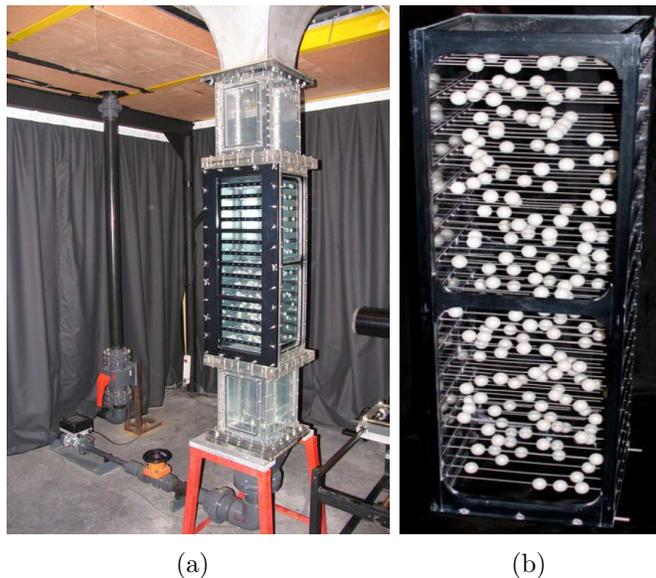


Figura 4.1: a) Canal conectado al circuito, b) Arreglo aleatorio de esferas. [37]

4.1. Dispositivo experimental

El arreglo experimental forma un circuito cerrado por donde circula el líquido, figura 4.2. Este es almacenado en dos contenedores conectados entre sí por una tubería, el primer contenedor está conectado a una bomba de una capacidad de 0.75 KW , la cual transporta el fluido hasta un deposito en la parte superior de la entrada al canal. Las características del canal se explican más adelante. El deposito se encarga de mantener un nivel constante de agua. El excedente que la bomba suministra es devuelto al primer contenedor, esto garantiza un flujo constante y minimiza las perturbaciones que la bomba pueda producir.

La volumen de líquido que pasa por el canal es controlada por una válvula conectada al segundo contenedor el cual está colocado por debajo de la salida, regulando esta válvula podemos ajustar la velocidad del flujo, sin embargo existe un límite dado por la potencia de la bomba. Después de que el líquido llega al segundo contenedor es transportado nuevamente al primero por gravedad y el ciclo comienza nuevamente.

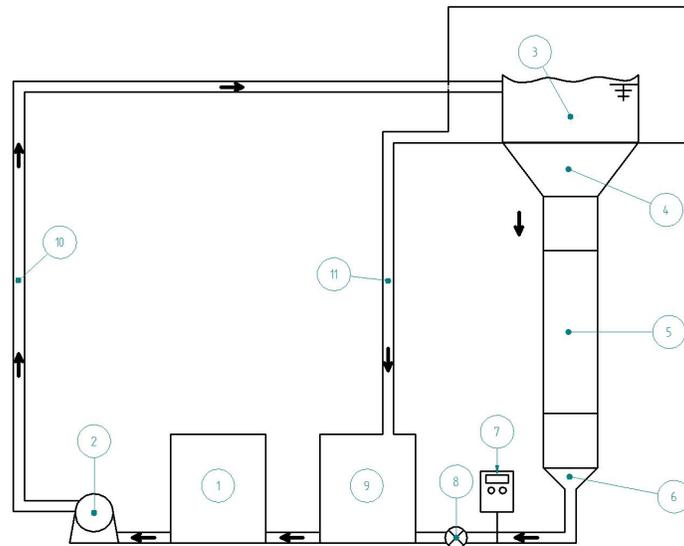


Figura 4.2: Esquema del circuito de flujo: 1) Tanque de almacenamiento primario, 2) Bomba, 3) Deposito a nivel constante, 4) entrada al canal, 5) Canal con arreglo de esferas, 6) Salida de flujo, 7) Medidor de flujo, 8) Válvula de control, 9) Deposito secundario, 10) Tubería primaria, 11) Tubería de recirculación de excedente

La zona de medición del experimento consta de un canal vertical de sección cua-

drada 22×22 [cm] y una longitud de 80 [cm], este es el que contiene el arreglo de esferas que generan la agitación del fluido. El canal está colocado entre dos secciones de longitud más corta 46 [cm], la parte superior sirve de entrada de flujo mientras que la inferior es la salida además de ser la zona donde las burbujas son inyectadas. Para los experimentos enfocamos el estudio en 3 distintas zonas de medición (figura

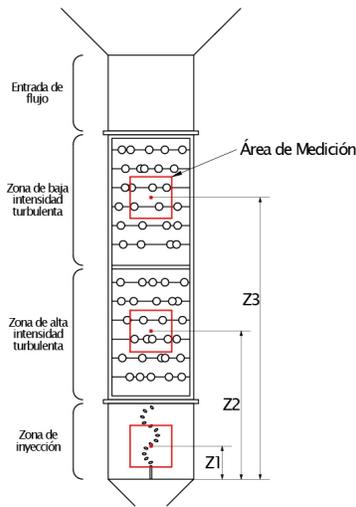


Figura 4.3: Zonas de medición

4.3). La primera es la zona de inyección $Z_1 = 9.5$ [cm], donde se tiene la salida del flujo, y al estar alejada de la región de las esferas, las burbuja solo se encuentran bajo la influencia del movimiento del fluido que va en dirección descendente; la segunda es la zona de mayor agitación $Z_2 = 51$ [cm], en esta sección es donde existe un mayor interacción entre las estelas producidas por las esferas y donde se tiene una turbulencia isotrópica desarrollada; la tercera región es la zona de menor agitación $Z_3 = 91$ [cm], aquí aunque se tiene turbulencia desarrollada no es tan intensa debido a que el número de estelas que interactúan para generar la agitación es menor que las que se tienen en la segunda zona, todo esto está ligado a la cantidad de esferas que alteran el movimiento del fluido, y ya que la dirección del flujo es descendente, mientras más nos alejamos de la parte superior más esferas perturban el movimiento del fluido. Los detalles sobre las características del flujo en la región turbulenta se darán a conocer más adelante.

4.2. Inyección de burbujas

Las burbujas son generadas inyectando aire de un compresor a través de un tubo capilar de 2 [mm] de diámetro interno el cual produce burbujas de diámetro promedio de 3 [mm]. La cantidad de aire que se inyecta puede ser controlada por medio de una válvula neumática. Para este trabajo se requirió la inyección de burbujas aisladas, de esta forma las estelas producidas por una primera burbujas no alteraran el movimiento de una segunda, por lo cual se asegura que las perturbaciones a las que están sometidas las burbujas se deban exclusivamente a su interacción con el medio.

El punto de inyección es variable en la sección transversal del canal dándonos la posibilidad de estudiar cómo responde la dispersión de las burbujas a cambios espaciales. La localización de los puntos de inyección se muestran en la figura 4.4

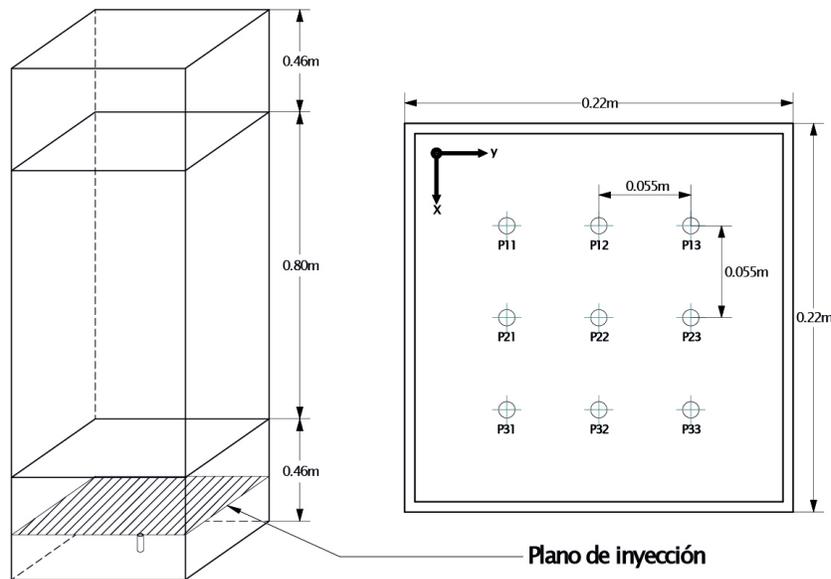


Figura 4.4: Puntos de inyección

4.3. Adquisición de imágenes

Las imágenes fueron obtenidas por medio de una cámara de alta velocidad *photon FASTCAM Mini UX50* equipada con un lente de enfoque telecéntrico. Este tipo de lentes permiten observar las burbujas en un campo de profundidad más amplio que un lente convencional, por lo que la distorsión causada por el movimiento en la dirección del eje de visión de la cámara es nula; la resolución alcanzada con este arreglo óptico fue de 1024×1024 [*pix*] dando un área de visión aproximada de 12×12 [*cm*]. Las imágenes obtenidas son en escala de grises con 16[*bit*] de profundidad. La cámara estaba apoyada sobre una base que permitía el desplazamiento en dirección vertical, para observar las 3 distintas zonas, y un desplazamiento horizontal para ajustar la visión de la cámara al punto de inyección. La tasa de adquisición se fijó en 500 *cuadros/s* para todas las secuencias y se trabajó con iluminación trasera.

Se grabaron alrededor de 240 secuencias de imágenes con una duración promedio de 12 segundos y una cantidad promedio de 6000 cuadros por secuencia, cada grabación captó el paso de un promedio de 20 burbujas y se registraron 900 burbujas por punto de inyección dándonos un total de 300 burbujas por cada zona de medición.

4.4. Caracterización del flujo en el canal

La agitación producida dentro del canal depende de tres factores: el primero es la velocidad del líquido, que está en función del gasto volumétrico medido a la salida del canal, el segundo es la dimensión de los objetos que producen la agitación y por último la distribución espacial que estos tengan a lo largo del canal. Para nuestro caso se utilizaron esferas con un diámetro $d_E = 2$ [*cm*] distribuidas de forma aleatoria. Las esferas ocupan el 2% del volumen total del canal y están sujetas por 97 cables de 2[*mm*] de diámetro, los cuales están orientados en dirección perpendicular al flujo del canal. Para mayor información sobre la distribución de las esferas es posible consultar el trabajo de *Z. Amoura* [37], donde se explica más detalladamente la distribución de probabilidad utilizada en la colocación de las esferas.

Las mediciones se llevaron a cabo utilizando un valor fijo de la velocidad del líquido $U_\infty = 0.05[m/s]$. Con esta velocidad se calcula el número de Reynolds para el canal utilizando

$$Re_C = \frac{U_\infty a}{\nu},$$

donde: $a = 0.22[m]$ es la longitud característica del canal y $\nu = 1.002 \times 10^{-6}[m^2/s]$ es la viscosidad cinemática del agua. De forma similar se calcula el número de Reynolds para las esferas cambiando la longitud característica a por el diámetro de las esferas d_E , con lo cual se obtienen los valores de $Re_C = 10980$ para el canal y $Re_E = 1000$ para las esferas. Estos valores nos dan certeza del régimen de flujo en cual se está trabajando.

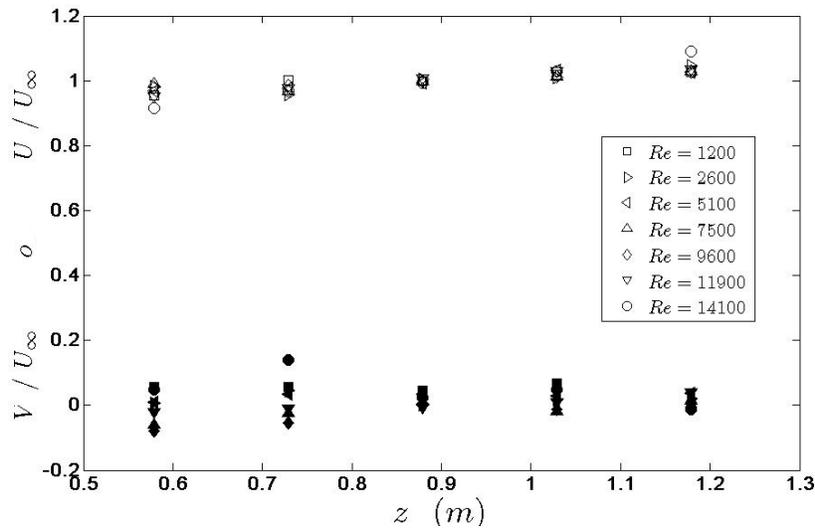


Figura 4.5: Velocidad media longitudinal (\bar{u} , símbolos claros) y transversal (\bar{v} , símbolos oscuros) en el centro del canal para distintos valores de Re_C y su variación con respecto a z . [37]

En el trabajo [37] se reportan la velocidad media en la dirección longitudinal y transversal del canal en función de la altura z (figura 4.5). Aquí se observa que para distintos valores de Re_C , las velocidades oscilan en rangos bajos lo que indica que la velocidad se conserva independientemente de la zona de medición. De igual manera se reportan las fluctuaciones de velocidad para ambas componentes. De la figura 4.6

se puede notar que la magnitud de las fluctuaciones disminuye conforme z aumenta. Esto muestra que al tener más interacciones con las esferas, los cambios en la velocidad tienden a ser menores y por consiguiente la agitación del medio también disminuye. Todo esto está relacionado con las estelas producidas por las esferas, cuando se tiene una mayor cantidad de interacciones entre ellas, las fluctuaciones tienden a homogeneizarse y sin embargo no desaparecen por lo que llegan a acotarse en ciertos rangos, lo que explicaría porque las variaciones son más grandes en la zona con menos esferas.

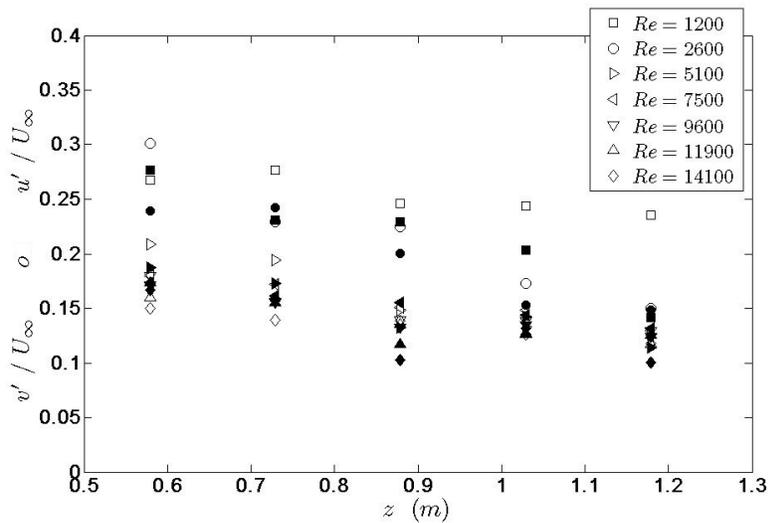


Figura 4.6: Fluctuaciones de velocidad longitudinal (u' , símbolos claros) y transversal (v' , símbolos oscuros) en el centro del canal para distintos valores de Re_C y su variación con respecto a z . [37]

Finalmente para caracterizar el tipo de turbulencia que produce el arreglo, se reporta el factor de isotropía para distintos valores de Re_C y su variación respecto a z , figura 4.7. Aquí se observan altas variaciones en el factor de isotropía para el valor de Reynolds más bajo $Re_c = 1200$, debido principalmente a que la velocidad del fluido no es lo suficientemente grande para que las estelas de las esferas interactúen y se desarrolle en cierta manera la isotropía. Para los demás valores de Re_C se tienen factores cercanos a la unidad lo que indica que las esferas producen una turbulencia cercana a la isotrópica y ésta se conserva para toda la longitud del canal.

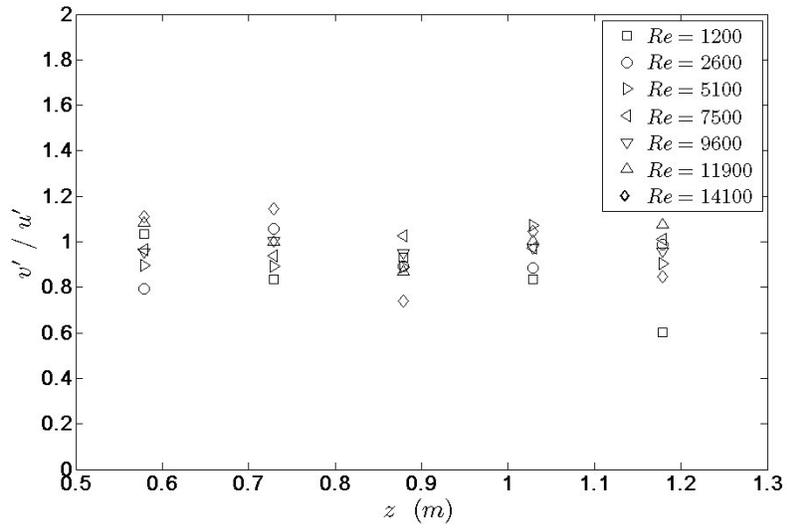


Figura 4.7: Factor de isotropía para distintos valores de Re_C y su variación con respecto a z . [37]

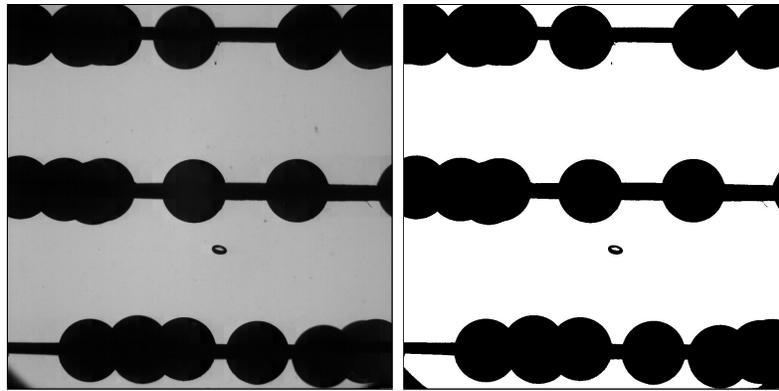
Capítulo 5

Resultados

5.1. Procesamiento de imágenes

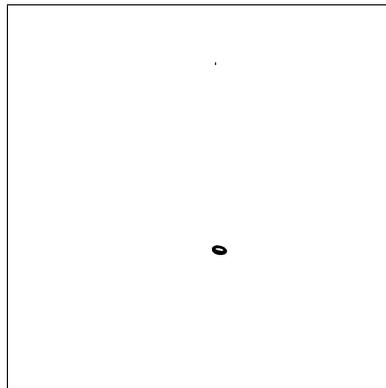
De las imágenes adquiridas se requiere extraer la información concerniente al movimiento de la burbuja. Para esto fue necesario procesar cada secuencia de grabación siguiendo un algoritmo con el cual se obtienen los datos de posición para cada burbuja. El análisis de las imágenes se lleva a cabo de la siguiente manera: se parte de la imagen original y se ajusta el umbral de la escala de gris para obtener una imagen binaria. A continuación se utiliza una segunda imagen de referencia que contiene todos los objetos inmóviles, esto permite sustraer el fondo de la imagen original dejando únicamente el cuerpo de la burbuja, posteriormente se identifica la posición del centroide de la partícula referida al marco de la imagen. Este proceso se repite para cada imagen en la secuencia (figura 5.1).

Una vez determinada la posición de todas las burbujas, la información se guarda en una base de datos. El cambio de unidades se hace por un factor de conversión obtenido por medio de imágenes de calibración. Cabe mencionar que para las imágenes obtenidas en las zonas z_2 y z_3 se tienen trayectorias parciales de las burbujas debido a que las esferas bloquean la luz y no permiten observar a la burbuja cuando ésta pasa delante o por detrás de las esferas, aun así al tener una gran cantidad de imágenes para cada secuencia se tiene certeza de que los huecos en la trayectoria no tendrán un gran impacto en el conjunto estadístico.

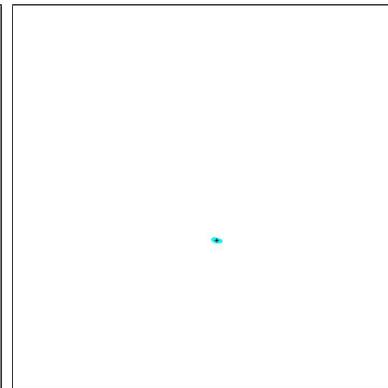


(a) Imagen original

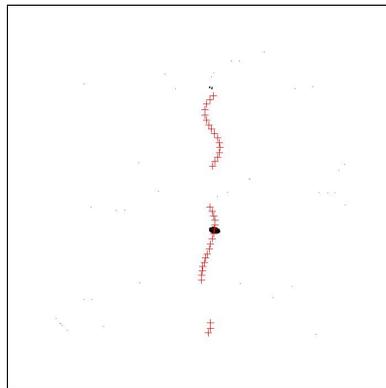
(b) Imagen binaria



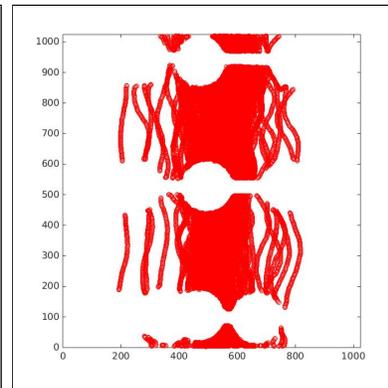
(c) Sustracción del fondo



(d) Identificación de burbuja



(e) Obtención de trayectoria



(f) Trayectorias para la secuencia

Figura 5.1: *Secuencia para el análisis de imágenes.*

5.2. Procesamiento de datos

Al tener una gran cantidad de eventos es conveniente analizar estadísticamente las bases de datos. De esta forma es posible obtener los valores promedio

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i,$$

$$\bar{u} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N u_i$$

y

$$\bar{v} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N v_i$$

donde x_i , u_i y v_i son los datos de posición transversal, velocidad transversal y velocidad longitudinal respectivamente y N es la cantidad de datos analizados. También se calcula el segundo momento estadístico o varianza (σ^2):

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (X_i - \bar{X})^2,$$

con el cual se obtiene la desviación estándar (σ). Este parámetro es un indicador de las fluctuaciones de la variable analizada, en nuestro caso nos proporciona información sobre las variaciones de posición y velocidad en cada zona.

Una vez obtenidos los valores promedio y desviación estándar se construyen funciones de densidad de probabilidad (FDP) utilizando una distribución gaussiana:

$$f(x, \bar{x} : \sigma) = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\bar{x}}{\sigma}\right)^2},$$

esta función muestra la probabilidad que una variable tiene de adquirir algún valor y de acuerdo a sus características de forma, proporciona información acerca del comportamiento de dicha variable. Al ajustar una distribución gaussiana es evidente la filtración de ciertos datos, sin embargo en este caso, el ajuste representa en buena medida lo que ocurre en el experimento.

Convergencia estadística

Cuando se realizan análisis estadísticos es imprescindible saber si el número de datos es representativo del fenómeno que se estudia. La mejor manera de comprobar lo anterior es observar la evolución del valor promedio conforme la cantidad de datos aumenta, si al incrementarse la cantidad de datos el valor promedio converge a una cantidad fija, se dice que hay convergencia estadística. En este trabajo se estudian las variables de posición y velocidad por lo que es necesario determinar si la cantidad de datos recolectados es suficiente para explicar lo que pasa en el experimento. Como se mencionó en el capítulo 4, se obtuvieron 900 trayectorias de burbujas por punto de inyección, que divididas en 3 zonas de medición, dan un total de 300 datos por evento. De acuerdo a los datos del movimiento del fluido en el canal, la zona donde se presentan las variaciones más significativas de velocidad es Z_2 , así que al comprobar si existe convergencia estadística en esta parte del arreglo podremos establecer que se tiene convergencia para todas las zonas del canal.

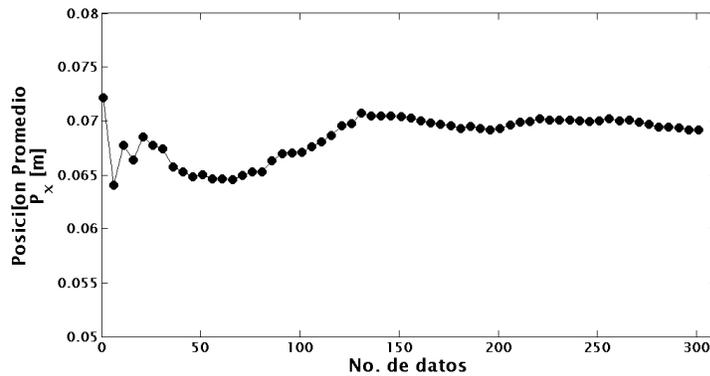


Figura 5.2: Evolución del valor promedio de la posición transversal, para el punto P_{22} en la zona Z_2

La figura 5.2 muestra la evolución del valor promedio de las posición transversal conforme aumenta el número de datos, podemos notar que realizando un promedio con pocos datos se obtienen variaciones que se atenúan mientras aumenta la cantidad de datos, así cuando el valor promedio no cambie de forma considerable se establece que la cantidad de datos es suficiente para representar el fenómeno. En nuestro caso con 300 datos tenemos una convergencia aceptable para los valores de posición.

Al igual que la posición, los datos de velocidad obtenidos deben converger a un valor promedio. Realizando el cálculo con la misma cantidad de datos utilizados en la posición, se obtuvo que el valor promedio de la componente longitudinal se estabiliza para el máximo número de datos (figura 5.4). Para la velocidad transversal (figura 5.3), se tienen variaciones relacionadas al movimiento oscilatorio de las burbujas, sin embargo éstas disminuyen considerablemente al alcanzar los 300 datos, por lo que se tiene certeza de una buena convergencia estadística para ambas velocidades.

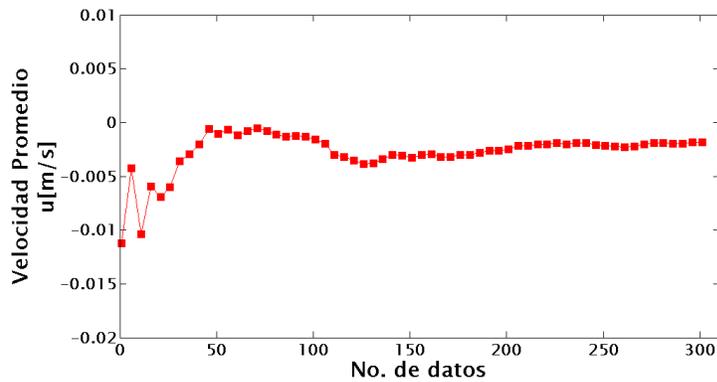


Figura 5.3: Evolución del valor promedio de la velocidad en dirección transversal para el punto P_{22} en Z_2 .

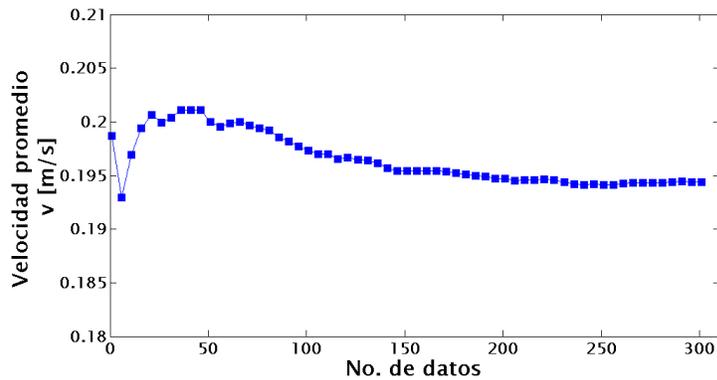


Figura 5.4: Evolución del valor promedio de la velocidad en dirección longitudinal para el punto P_{22} en Z_2 .

5.3. Análisis de dispersión

Al tener un flujo que pasa por un arreglo aleatorio de esferas es de esperarse que las trayectorias que siguen las burbujas sean modificadas dependiendo de la ubicación en el canal. Ya que las burbujas siguen el camino por donde se opone una menor resistencia. Podemos esperar que una partícula que es inyectada cerca del centro del canal se comportara diferente a otra que se encuentra cerca de una pared; sin embargo, no debemos olvidar que la agitación producida por el fluido se encuentra en régimen que puede considerarse turbulento e isotrópico, así que el movimiento de las burbujas está sometido a un medio donde en promedio no existe una dirección preferencial. De lo anterior se establece que las variaciones a las que están sujetas las burbujas es independiente de la zona de donde son inyectadas y en consecuencia las fluctuaciones referidas a su punto de inyección serán muy parecidas entre sí.

Por otro lado, sabemos que la agitación del medio cambian de intensidad conforme nos movemos en el eje z , por lo que hay un cambio progresivo en la dirección del eje de canal, y ya que la isotropía se mantiene en todo el arreglo, en cada punto se tiene una evolución similar. La figura 5.5 muestra las FDP de cada punto, el eje horizontal representa al número d^* adimensional el cual se expresa

$$d^* = \frac{x - P_{iny}}{d_b},$$

donde d_b es el diámetro de la burbuja y P_{iny} es la posición del punto de inyección relativa al cuadro de referencia de la imagen.

Podemos notar que en la zona de inyección (Z_1) el ensanchamiento de la función es pequeño comparado con Z_2 y Z_3 , esto indica que estadísticamente: las burbujas tienden a oscilar cerca del punto donde fueron inyectadas. Esto es un resultado obvio ya que en Z_1 solo se percibe el movimiento del fluido en dirección vertical, es decir que no hay perturbaciones en la componente transversal, entonces las burbujas simplemente ascienden de forma libre oscilando en rangos pequeños. Respecto a las zonas por encima de la inyección se observan cambios en la estructura de la función, ahora se tiene valores de posición dispersos en un rango amplio. Por esta razón se

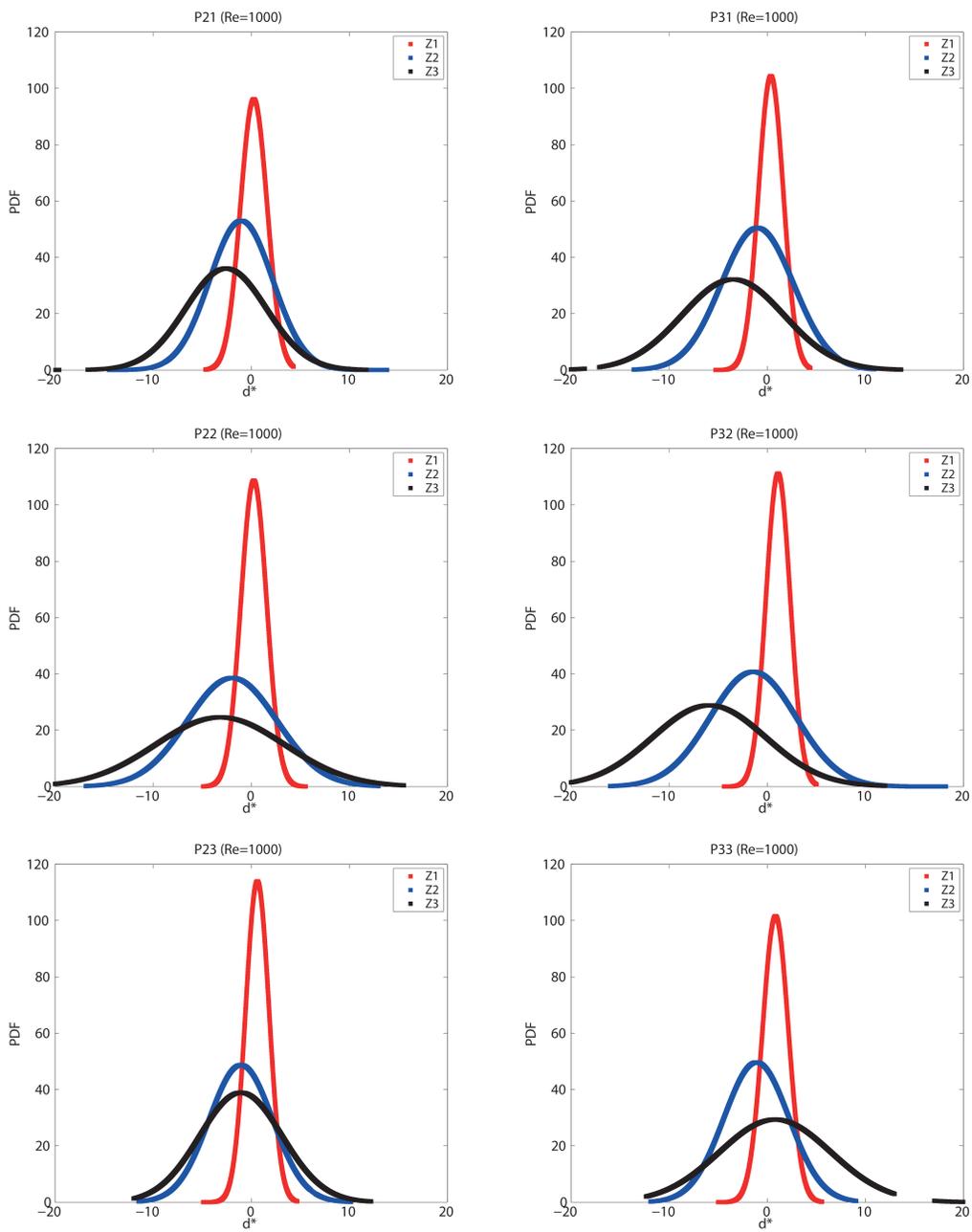


Figura 5.5: Función densidad de probabilidad para la posición horizontal promedio de las burbujas en cada punto y para las tres zonas.

obtiene un ensanchamiento mayor para Z_2 y Z_3 . Significa que la probabilidad de encontrar burbujas alejadas del punto de inyección se incrementa para la segunda zona y aumenta aún más para la tercera. Lo anterior se puede entender como un crecimiento en la dispersión de las burbujas en función de la altura z . Otra de las variaciones que se observan para las zonas con turbulencia es el desplazamiento de la función fuera del cero. Esto implica que la posición promedio de las burbujas se aleja del valor de referencia (P_{iny}) y tiene que ver con las restricciones que el flujo impone al paso de la burbuja, así notamos que las burbujas, en promedio, cambian su trayectoria en las zonas turbulentas para facilitar su desplazamiento.

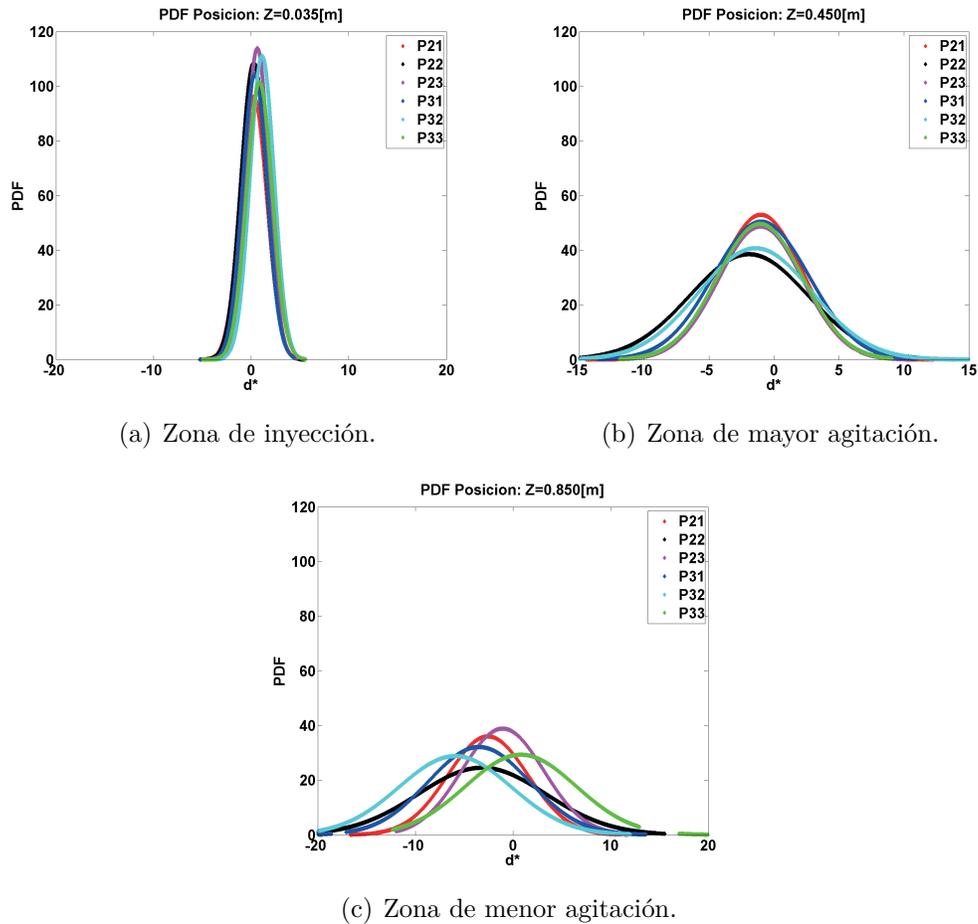


Figura 5.6: Comparación de FDPs de posición para las distintas zonas turbulentas: a) Z_1 , zona de inyección b) Z_2 zona de mayor agitación y c) Z_3 zona de menor agitación.

La comparación de las FDP en las distintas zonas de medición (figura 5.6) muestra cómo responde las burbujas de acuerdo a la zona de turbulencia. Observando las gráficas encontramos que para Z_1 no existen grandes diferencias como se mencionó anteriormente, ya que es una zona donde la agitación es prácticamente nula. En Z_2 se tiene una distribución similar para todos los puntos de inyección, existen variaciones para 2 puntos en el plano central del canal, relacionados al cambio en el valor promedio de la posición. El hecho de que las burbujas en promedio se trasladen a otro punto, significa que hay una región de menor resistencia. Esto se aclarará cuando se analicen las fluctuaciones de velocidad de las burbujas. Para la zona más alta se observa un desajuste total en las funciones, no existe concordancia en los valores promedio, aun así se conserva una estructura similar en las funciones, lo que apunta a que en esta zona las fluctuaciones de velocidad en el fluido son mayores que en la zona aguas abajo, y ya que las burbujas siguen el patrón de flujo su respuesta es ampliar las variaciones de sus desplazamientos, lo cual se traduce en una dispersión mayor para esta zona.

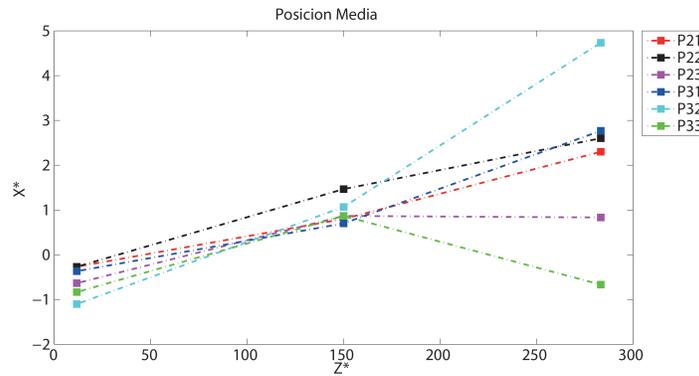


Figura 5.7: Evolución del valor medio de la posición con respecto a la altura para todos los puntos.

Otra manera de interpretar la evolución de las FDP de cada punto, es examinando los cambios en sus parámetros principales (\bar{X} y σ). La figura 5.7 muestra el valor medio de posición de los punto analizados y para cada zona, aquí x^* se define como:

$$x^* = \frac{\bar{x} - P_{iny}}{d_b},$$

donde \bar{x} es el valor promedio de la posición en cada punto, P_{iny} es su posición de inyección correspondiente y d_b es el diámetro de la burbuja; también definimos a z^* como:

$$z^* = \frac{z}{d_b},$$

donde z es el valor de la altura de la zona de observación. Podemos notar que en Z_1 la media se concentran alrededor de un punto y esto se conserva para la segunda zona, sin embargo existe un desplazamiento para todos los puntos y aunque algunos valores se mueven más que otros, todos lo hacen en la misma dirección. En Z_3 , no parece haber una región en canal donde los valores converjan, lo que indica que las variaciones de velocidad en el líquido alteran considerablemente las trayectorias de las burbujas, distribuyéndolas a lo largo de la sección transversal del canal.

En la figura 5.8 se gráfica la desviación estándar de la posición para cada punto y en cada zona, aquí se puede notar un incremento gradual para cada punto de inyección, lo que indica que las áreas en las que se mueven las burbujas incrementan su amplitud en función de la altura del canal. La magnitud de las fluctuaciones en la región de inyección es prácticamente la misma para todos los puntos, nuevamente debido a que las burbujas oscilan siguiendo una trayectoria “semi-libre”. Para la primera zona turbulenta las fluctuaciones incrementan de forma considerable y sobre una misma magnitud para la mayoría de los puntos, exceptuando aquellos que se encuentran en el plano central del canal, esta es la razón de que las FDPs de estos dos puntos se vean diferentes de las demás y como se mencionó anteriormente se debe a la resistencia que el medio opone al paso de la burbuja incluyendo los obstáculos que las burbujas deben evitar durante su ascenso.

5.4. Análisis de fluctuaciones de velocidad

En ascenso libre, las burbujas siguen una trayectoria definida a partir del balance entre las fuerzas de gravedad y flotación. Al añadir alguna perturbación, como el movimiento del fluido, se producen alteraciones en la velocidad que modifican dicha trayectoria. Las variaciones en la velocidad del fluido pueden tener un carácter aleatorio, como en el caso turbulento, lo que propiciará el ajuste en la trayectoria

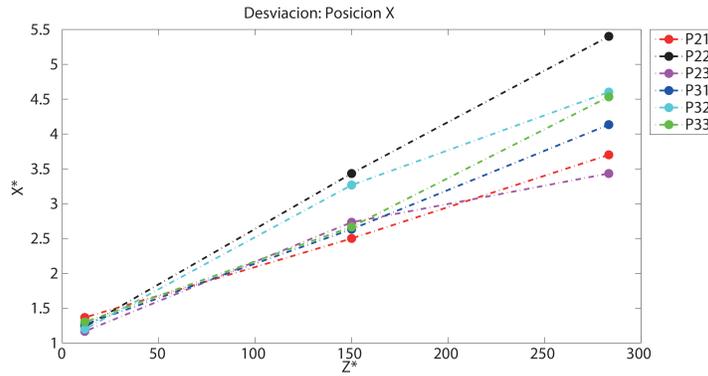


Figura 5.8: fluctuaciones en la posición con respecto a la altura para todos los puntos.

de las burbujas hacia el camino que presente una menor resistencia. Sin embargo, la magnitud de las fluctuaciones deben ser lo suficientemente grandes para vencer la inercia natural de la burbuja, en tal caso se dice que la burbuja está sujeta al movimiento del fluido.

La turbulencia se caracteriza por tener rápidas variaciones de presión y velocidad, estos cambios se presentan en todas direcciones por lo que un objeto que se encuentre inmerso en este tipo de flujos está sujeto a los efectos dinámicos que el fluido ejerza sobre él. Las fluctuaciones afectan principalmente la trayectoria “natural” que trazaría el cuerpo sujeto a las fuerzas de flotación y gravedad. Para este trabajo se ha separado el análisis en: velocidad horizontal, que se encarga de estudiar las fluctuaciones que generan la dispersión de las burbujas; y velocidad vertical, que se enfoca en el análisis de las variaciones en la velocidad de ascenso de las burbujas.

Velocidad horizontal

En el canal, las esferas alteran el movimiento del fluido produciendo agitación, este movimiento aleatorio del fluido es quien modifica la trayectoria de las burbujas, de esta forma, al analizar los cambios producidos en las distintas zonas del canal, se obtendrá información para entender la forma en que las burbujas se distribuyen dentro del entorno. De la misma manera que en el análisis de posición se construyeron funciones de densidad de probabilidad a partir de los valores medios (\bar{u}) y sus fluctuaciones (u'), los resultados se muestran en la figura 5.9, la velocidad de

oscilación u se adimensionaliza como:

$$u^* = \frac{\bar{u} - u}{U_\infty},$$

donde \bar{u} es el valor promedio de la componente en la dirección horizontal de la burbuja y U_∞ es la velocidad de flujo en el canal.

Puede notarse que las funciones son muy similares entre sí, ya que conservan la simetría para las 3 zonas, esto significa que las fluctuaciones de velocidad oscilan bajo el mismo rango promedio. Sin embargo existen pequeñas diferencias debido al incremento de las fluctuaciones en las zonas de turbulencia. Los cambios en las funciones aunque no son muy notables, indican que en promedio la velocidad en la componente horizontal de la burbuja se incrementa mientras permanece en la región con esferas. El aumento en el rango de las fluctuaciones se relaciona directamente con el análisis previo de posición, mientras las variaciones en la velocidad horizontal incrementen, la posición en la componente transversal de las burbujas oscilara en valores más amplios, lo cual significa una mayor dispersión.

Comparando la velocidad de las burbujas de acuerdo a las distintas zona, como se muestra en la figura 5.10, se observa un comportamiento idéntico para todos los puntos en las regiones Z_1 y Z_2 , esto significa que los cambios en la velocidad de la burbuja son los mismos independientemente de la zona donde son inyectadas. De lo anterior se resalta la influencia de la isotropía del medio sobre las burbujas, ya que estas siguen el movimiento del flujo.

Al no tener diferencias significativas en las funciones de probabilidad el análisis se enfocara en la evolución de los valores promedio de velocidad así como en los cambios en las fluctuaciones de velocidad. La figura 5.11 muestra el valor promedio de la velocidad en la dirección horizontal. En un movimiento oscilante, como el que se observa en las burbujas, se espera que el promedio de la velocidad sea cero, debido a que esta varía en valores positivos y negativos bajo el mismo rango, sin embargo en nuestro caso al tener velocidades promedio distintas de cero nos dice

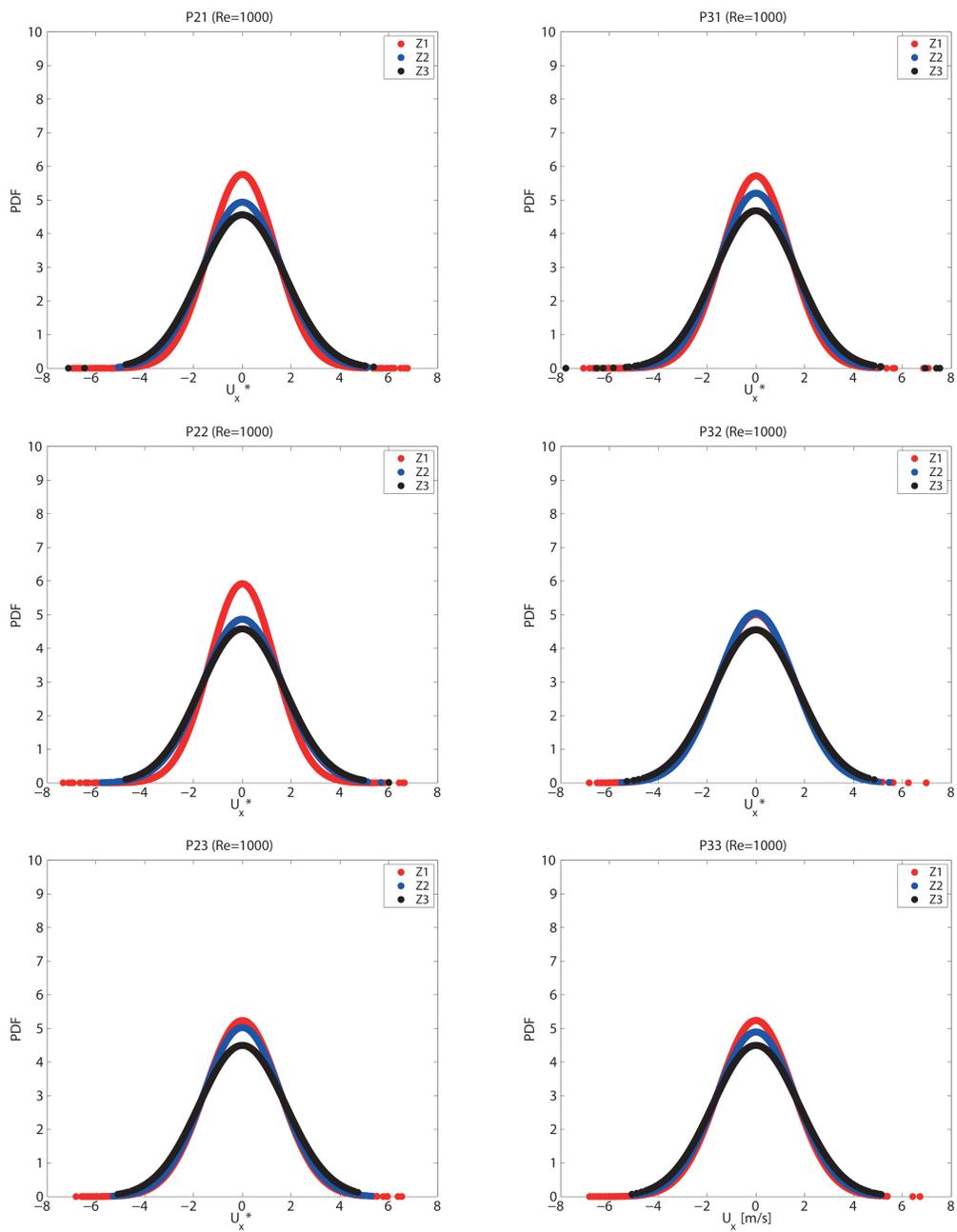
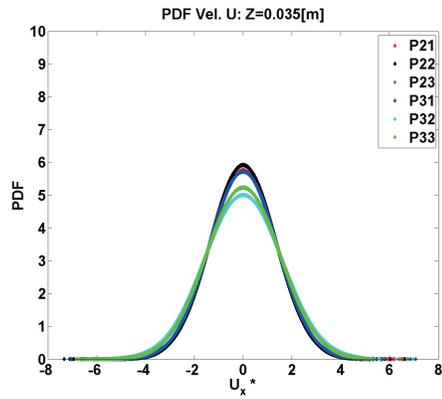
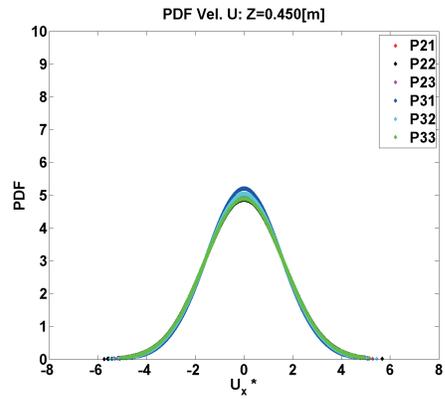


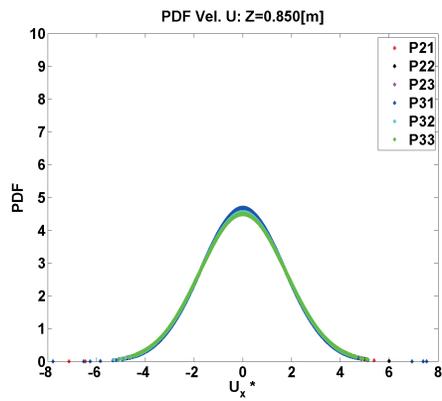
Figura 5.9: Funciones de densidad de probabilidad de la componente transversal de la velocidad para todos los puntos en las tres zonas.



(a) Zona de inyección



(b) Zona de mayor agitación.



(c) Zona de menor agitación.

Figura 5.10: FDP de la velocidad transversal en las distintas zonas de medición a) z_1 zona de inyección, b) z_2 zona de baja intensidad turbulenta y c) z_3 zona de alta intensidad turbulenta.

que las partículas tienden a desplazarse horizontalmente, lo que explica por qué las funciones de densidad de probabilidad para la posición tienen formas similares pero están desplazadas del valor de referencia.

En lo que respecta a las fluctuaciones de velocidad, podemos decir que la amplitud de dichas fluctuaciones está directamente relacionada con la dispersión de las burbujas observada en el análisis de posición. Al tener variaciones con grandes amplitudes, las partículas se distribuirán sobre un área más extensa sobre el canal y en el caso contrario, donde se tengan fluctuaciones bajas, las trayectorias de las burbujas se distribuirán en zonas pequeñas. Además, el cambio en la magnitud de las variaciones puede observarse en las FDP debido a que el parámetro σ está ligado a las fluctuaciones y es este valor quien determina el ensanchamiento de la curva.

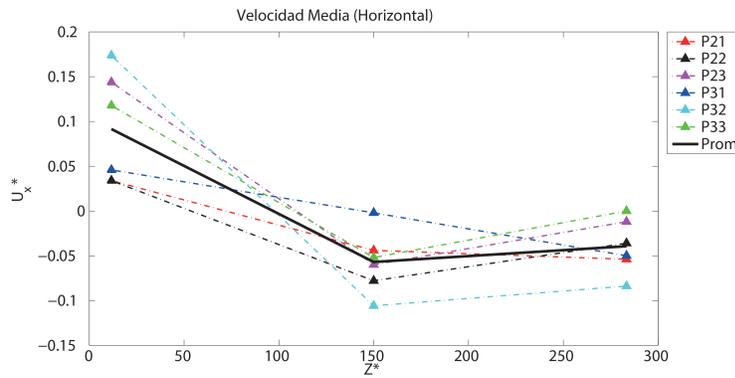


Figura 5.11: Evolucion de la velocidad transversal promedio para las 3 zonas,

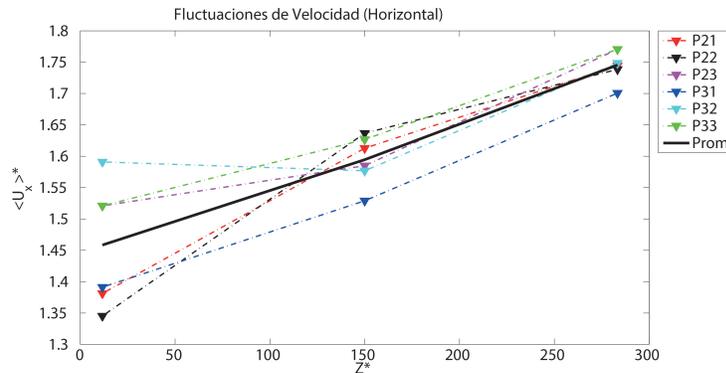


Figura 5.12: Evolución de las fluctuaciones en la velocidad transversal par las 3 zonas.

La figura 5.12 muestra el incremento de las variaciones en la velocidad horizontal para las tres distintas alturas, puede notarse que para la zona de inyección obtenemos los valores más bajos y que a medida que ascendemos en el canal las variaciones se incrementan, esto quiere decir que cuando las burbujas inician su trayecto no modifican significativamente su posición debido a la baja amplitud de su fluctuaciones, sin embargo conforme el fluido comienza a perturbar su movimiento, los cambios en la velocidad provocan que la burbuja oscile en rangos más amplios lo que al final se traduce en una dispersión espacial en la dirección transversal del canal.

Velocidad de ascenso

De igual forma que las oscilaciones de las burbujas influyen en su distribución en el canal, la velocidad de ascenso es importante para determinar el tiempo que pasara la burbuja dentro de la zona turbulenta, esto quiere decir que si existe alguna disminución en la velocidad con la que sube la burbuja esto implicaría que la turbulencia opone resistencia al paso de la burbuja a través del medio, por lo cual el tiempo al que está sometida la partícula variaría y en consecuencia la influencia de las perturbaciones en la dirección horizontal actuaran por un mayor periodo de tiempo sobre la burbuja, en consecuencia las trayectorias sufrirán mayores modificaciones. La figura 5.13 muestra las funciones de densidad de probabilidad normal para la velocidad de ascenso por cada punto en sus tres distintas alturas.

La velocidad de ascenso v se adimensionaliza como:

$$v^* = \frac{\bar{v} - v}{U_\infty},$$

aquí \bar{v} es la velocidad promedio de ascenso y U_∞ es la velocidad del fluido en el canal. En comparación con las curvas obtenidas para la velocidad horizontal, las funciones de la componente vertical poseen estructuras diferentes, la más notable es la falta de simetría, esto se debe a que a diferencia de la velocidad en la dirección transversal, en el ascenso se presenta una disminución en la magnitud de la velocidad. Esto se observa por la presencia de largas “colas” al costado derecho de

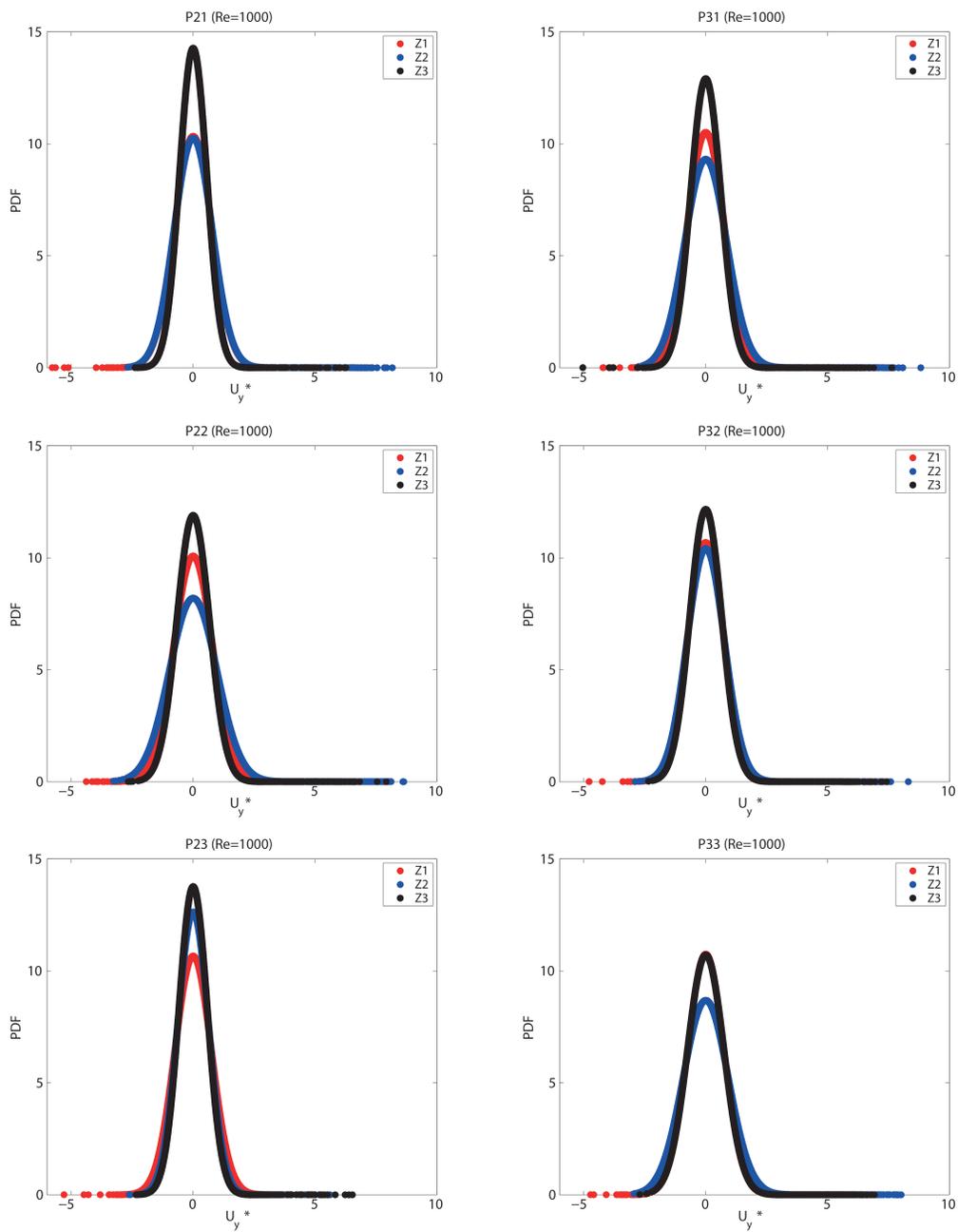


Figura 5.13: Funciones de densidad de probabilidad de la velocidad de ascenso para todos los puntos en las tres zonas.

$v^* = 0$, esto quiere decir que los valores registrados se encuentran por debajo del valor promedio y está relacionado a dos distintas causas dependiendo de la zona, en z_1 (zona de inyección) los valores bajos se deben a que la burbuja comienza su movimiento desde el reposo por lo que esa forma en la gráfica representa el incremento de velocidad desde una posición estática, mientras que en z_1 y z_2 (zonas de turbulencia) estas colas significan un decaimiento en la velocidad de ascenso.

Al equiparar las funciones en las distintas zonas (figura 5.14), podemos notar que tan estable se mantiene la burbuja mientras sube por el canal, para la primera región el comportamiento es el mismo, las burbujas siguen el mismo patrón de ascenso en cada punto, aun así en las regiones donde se tiene turbulencia existen diferencias relacionadas a las fluctuaciones, es decir una variación en σ , estos cambios se deben a la interacción con las estelas que producen las esferas y se puede observar que existen diferencias en cada punto por lo que podemos decir que la intensidad de estas fluctuaciones está relacionada con la posición en la región transversal del canal, lo que indica que la velocidad de ascenso no es independiente de la región de inyección, a diferencia de la componente en la dirección transversal. Sin embargo la presencia de colas en todos los puntos nos indica que existe una disminución en la velocidad para cada uno de ellos.

Los cambios en el valor medio de la velocidad de ascenso se muestran en la figura 5.15, aquí podemos notar el decaimiento en la velocidad lo que significa que las partículas son sometidas por más tiempo a la agitación del medio conforme estas suben por el canal. Esto como se mencionó anteriormente influye directamente en la dispersión de las burbujas en el entorno ya que al permanecer por un periodo más largo en las zonas turbulentas las fluctuaciones en la componente horizontal tendrán más tiempo para dispersar las partículas.

En el caso de las fluctuaciones (figura 5.16) observamos un comportamiento diferente al obtenido en caso horizontal, en el primero las variaciones se incrementaban conforme aumentaba la altura z mientras que en el segundo se tiene un incremento para la segunda zona y posteriormente un decaimiento, esto se ve reflejado directamente

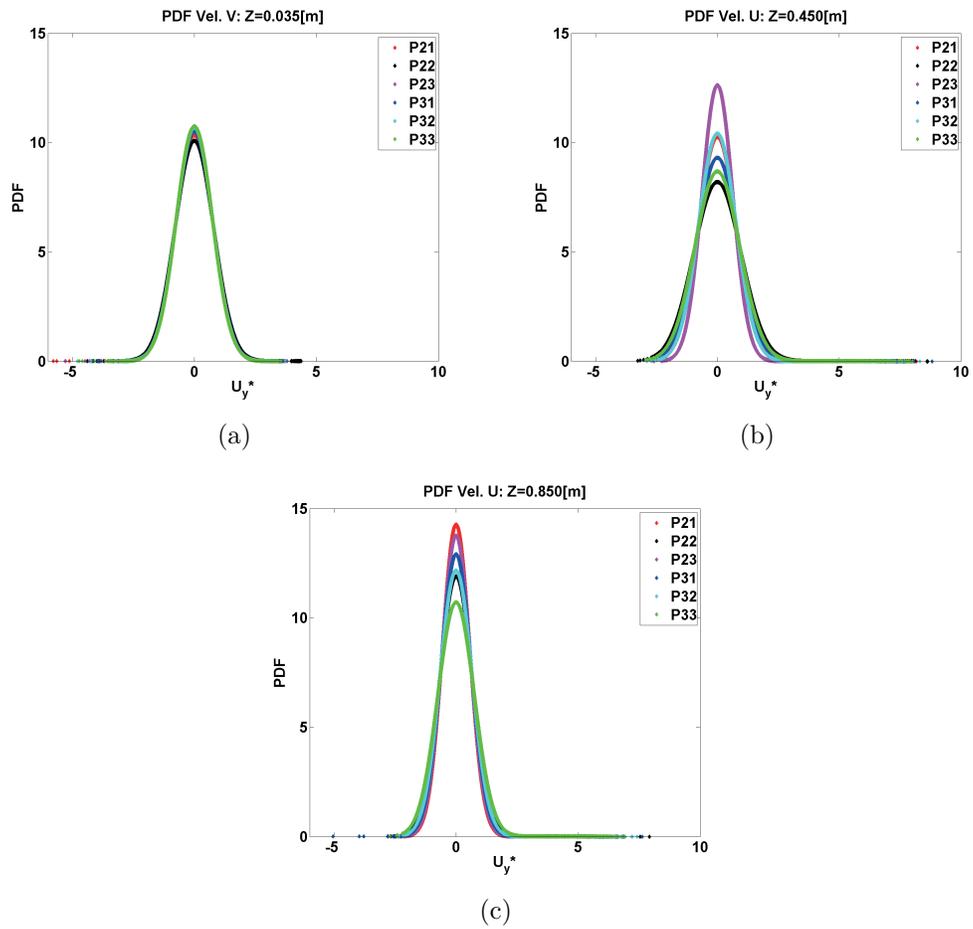


Figura 5.14: FDP de la velocidad de ascenso en las distintas zonas de medición a) z_1 zona de inyección, b) z_2 zona de mayor agitación y c) z_3 zona de menor agitación.

en las FDP ya que éstas dependen de los dos parámetros μ y σ , estos valores sufren alteraciones debido a que las burbujas, al entrar en la zona turbulenta, tienen que vencer la resistencia que presenta el medio. También debemos notar que las fluctuaciones más grandes se presentan en la segunda zona, que como se recordara, es la parte del arreglo donde se tienen más interacciones entre estelas lo cual también explica por qué los cambios en los promedios de velocidad en la componente horizontal son más significativos en esa zona, de todo lo anterior podemos decir que la región central del canal es la más importante para propiciar la dispersión de las burbujas en el medio.

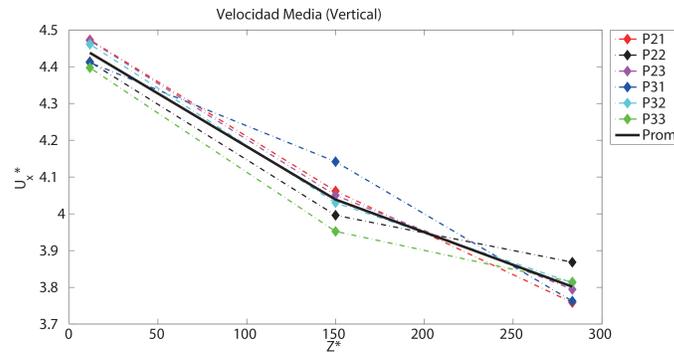


Figura 5.15: Evolución de la velocidad de ascenso promedio para las 3 zonas,

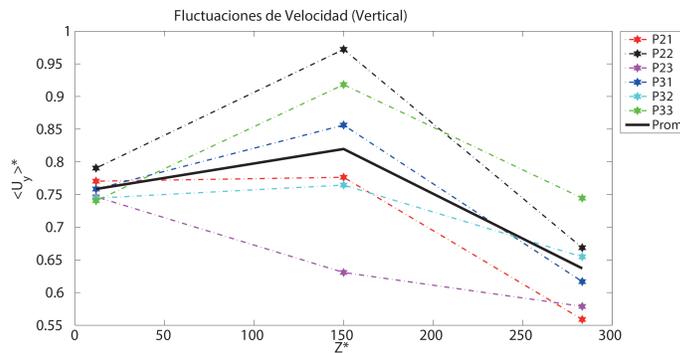


Figura 5.16: Evolución de las fluctuaciones en la velocidad vertical par las 3 zonas.

Capítulo 6

Conclusión

Después de estudiar estadísticamente las posiciones de las burbujas, así como sus cambios de velocidad en las distintas zonas turbulentas, se llegó a las siguientes conclusiones: En la zona de inyección (Z_1), se tiene un comportamiento uniforme para toda la sección transversal del canal. Las variaciones en la posición promedio y las fluctuaciones de velocidad de ambas componentes no poseen grandes diferencias entre sí, debido a que en esta región del canal, el fluido tiene una influencia mínima sobre el movimiento de las burbujas. La dispersión en esta zona se considera nula debido a que las burbujas simplemente oscilan en un mismo rango para todos los puntos de inyección analizados.

La primera zona de turbulencia (Z_2), donde se tiene la mayor cantidad de interacciones entre estelas, presenta fluctuaciones de velocidad para las dos componentes que alteran las trayectorias de las burbujas generando la dispersión de estas. El régimen isotrópico del flujo amplía la magnitud de las fluctuaciones naturales de la burbuja. Este comportamiento se repite para la mayoría de los puntos. Los cambios observados en el plano central de canal (puntos $P22$ y $P32$), son ocasionados por la resistencia del flujo, la cual contribuye a los cambios de velocidad de las burbujas propiciando el desplazamiento a una región de menor resistencia.

En la segunda zona de turbulencia (Z_3), la dispersión de las burbujas es más que evidente, si se observan las FDP de posición para esta zona. Esto es ocasionado por

las altas fluctuaciones en la velocidad del fluido, las cuales provocan el desplazamiento de los valores promedio de posición y en consecuencia se obtiene una mayor distribución de burbujas en la sección transversal del canal. A pesar de que se distinguen cambios significativos para la posición dependientes del punto de inyección, no es así para las fluctuaciones de velocidad transversal, lo cual indica una fuerte influencia del carácter isotrópico del medio sobre las burbujas.

En un marco global se observa una relación entre las fluctuaciones de la velocidad transversal y los valores promedio de la velocidad de ascenso. Mientras las primeras aumentan conforme las burbujas ascienden sobre el canal, los segundos disminuyen siguiendo la misma tendencia. Lo anterior implica, que el tiempo al que las burbujas están expuestas en las regiones turbulentas, afecta directamente la amplitud de las fluctuaciones de acuerdo a la zona. El nexo existente entre los cambios en el valor promedio y las fluctuaciones de velocidad indican conservación de momentum, debido a que la energía que la burbuja invierte en su desplazamiento vertical es ocupada para aumentar el rango de oscilación en la componente horizontal.

De forma general se concluye que la dispersión burbujas en un medio turbulento depende de la intensidad de la agitación, debido a que grandes fluctuaciones en el movimiento del fluido generan mayores variaciones en el movimiento de las burbujas. Por otro lado existe cierta independencia con la isotropía del medio y que esta solamente tiende a homogeneizar la amplitud de las fluctuaciones en toda la región turbulenta. Dicho comportamiento nos permite predecir de cierta forma la evolución y los cambios que pueden presentarse en un flujo burbujeante.

Agradecimientos

Este proyecto se realizó gracias al apoyo de el programa de becas de maestría y doctorado del *Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología*, el cual se llevo a cabo bajo la supervisión del Dr. J. Roberto Zenit Camacho y el Dr. Ernesto Mancilla Ramos.

También gracias al *Institute de Mécanique des Fluides de Toulouse* por las facilidades prestadas para la realización de la parte experimental del trabajo, el cual estuvo bajo la supervisión de la Dra. Veronique Roig.

Bibliografía

- [1] Guillaume Riboux, Dominique Legendre, and Frédéric Risso. A model of bubble-induced turbulence based on large-scale wake interactions. *Journal of Fluid Mechanics*, 719:362–387, 2013.
- [2] Guillaume Riboux, Frédéric Risso, and Dominique Legendre. Experimental characterization of the agitation generated by bubbles rising at high reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 643:509–539, 2010.
- [3] Alain Cartellier and Nicolas Rivière. Bubble-induced agitation and microstructure in uniform bubbly flows at small to moderate particle reynolds numbers. *Physics of Fluids (1994-present)*, 13(8):2165–2181, 2001.
- [4] Damien Colombet, Dominique Legendre, A Cockx, P Guiraud, Frédéric Risso, C Daniel, and S Galinat. Experimental study of mass transfer in a dense bubble swarm. *Chemical Engineering Science*, 66(14):3432–3440, 2011.
- [5] L Vinnett, F Contreras, and J Yianatos. Gas dispersion pattern in mechanical flotation cells. *Minerals Engineering*, 26:80–85, 2012.
- [6] Julián Martínez-Mercado, Carlos A Palacios-Morales, and Roberto Zenit. Measurement of pseudoturbulence intensity in monodispersed bubbly liquids for $10 \leq Re \leq 500$. *Physics of Fluids (1994-present)*, 19(10):103302, 2007.
- [7] M Iguchi, Kb Okita, and F Yamamoto. Mean velocity and turbulence characteristics of water flow in the bubble dispersion region induced by plunging water jet. *International Journal of Multiphase Flow*, 24(4):523–537, 1998.

- [8] Afshin J Ghajar. Non-boiling heat transfer in gas-liquid flow in pipes: a tutorial. *Journal of the Brazilian Society of Mechanical Sciences and Engineering*, 27(1):46–73, 2005.
- [9] Swapnil V Ghatage, Mayur J Sathe, Elham Doroodchi, Jyeshtharaj B Joshi, and Geoffrey M Evans. Effect of turbulence on particle and bubble slip velocity. *Chemical Engineering Science*, 100:120–136, 2013.
- [10] V Roig, C Suzanne, and L Masbernat. Experimental investigation of a turbulent bubbly mixing layer. *International Journal of Multiphase Flow*, 24(1):35–54, 1998.
- [11] Cai Ziqi, Bao Yuyun, and Gao Zhengming. Hydrodynamic behavior of a single bubble rising in viscous liquids. *Chinese Journal of Chemical Engineering*, 18(6):923–930, 2010.
- [12] Yoshihiko Oishi and Yuichi Murai. Horizontal turbulent channel flow interacted by a single large bubble. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 55:128–139, 2014.
- [13] Emmanuella Bouche, Véronique Roig, Frédéric Risso, and Anne-Marie Billet. Homogeneous swarm of high-reynolds-number bubbles rising within a thin gap. part 1. bubble dynamics. *Journal of Fluid Mechanics*, 704:211–231, 2012.
- [14] Christian Suzanne, K Ellingsen, Frédéric Risso, and Véronique Roig. Local measurements in turbulent bubbly flows. *Nuclear Engineering and Design*, 184(2):319–327, 1998.
- [15] Véronique ROIG and A Larue De Tournemine. Measurement of interstitial velocity of homogeneous bubbly flows at low to moderate void fraction. *Journal of Fluid Mechanics*, 572:87–110, 2007.
- [16] Matthieu Roudet, Anne-Marie Billet, Frédéric Risso, and Véronique Roig. Piv with volume lighting in a narrow cell: An efficient method to measure large velocity fields of rapidly varying flows. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 35(6):1030–1037, 2011.

- [17] Zhengliang Liu, Ying Zheng, Lufei Jia, and Qikai Zhang. Study of bubble induced flow structure using piv. *Chemical Engineering Science*, 60(13):3537–3552, 2005.
- [18] M Simiano, R Zboray, F De Cachard, D Lakehal, and G Yadigaroglu. Comprehensive experimental investigation of the hydrodynamics of large-scale, 3d, oscillating bubble plumes. *International Journal of Multiphase Flow*, 32(10):1160–1181, 2006.
- [19] K Ekambara and JB Joshi. Cfd simulation of mixing and dispersion in bubble columns. *Chemical Engineering Research and Design*, 81(8):987–1002, 2003.
- [20] Xiang Chai, Ivan Otic, and Xu Cheng. A new drag force model for the wake acceleration effect and its application to simulation of bubbly flow. *Progress in Nuclear Energy*, 80:24–36, 2015.
- [21] Frederic Risso, Veronique Roig, Zouhir Amoura, and A.M. Billet. The dual nature of pseudo-turbulence analyzed from spatial and time averaging of flow through random obstacles. *International Conference on Multiphase Flow*, 2010.
- [22] Marco Simiano and Djamel Lakehal. Turbulent exchange mechanisms in bubble plumes. *International Journal of Multiphase Flow*, 47:141–149, 2012.
- [23] M Lance and J Bataille. Turbulence in the liquid phase of a uniform bubbly air–water flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 222:95–118, 1991.
- [24] Dianchuan Xing, Changqi Yan, Licheng Sun, Jingyu Liu, and Bo Sun. Experimental study of interfacial parameter distributions in upward bubbly flow under vertical and inclined conditions. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 47:117–125, 2013.
- [25] GH Yeoh, Sherman CP Cheung, and JY Tu. On the prediction of the phase distribution of bubbly flow in a horizontal pipe. *Chemical Engineering Research and Design*, 90(1):40–51, 2012.
- [26] AK Chesters and G Hofman. Bubble coalescence in pure liquids. In *Mechanics and Physics of Bubbles in Liquids*, pages 353–361. Springer, 1982.

- [27] RV Mukin. Modeling of bubble coalescence and break-up in turbulent bubbly flow. *International Journal of Multiphase Flow*, 62:52–66, 2014.
- [28] M Lance and J Bataille. Turbulence in the liquid phase of a uniform bubbly air–water flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 222:95–118, 1991.
- [29] Mayur Sathe, Jyeshtharaj Joshi, and Geoffrey Evans. Characterization of turbulence in rectangular bubble column. *Chemical Engineering Science*, 100:52–68, 2013.
- [30] Jacques Magnaudet and Guillaume Mougine. Wake instability of a fixed spheroidal bubble. *Journal of Fluid Mechanics*, 572:311–337, 2007.
- [31] Hendrik Tennekes and John Leask Lumley. *A first course in turbulence*. MIT press, 1972.
- [32] William D McComb. The physics of fluid turbulence. *Chemical Physics*, 1, 1990.
- [33] Brian L White and Heidi M Nepf. Scalar transport in random cylinder arrays at moderate reynolds number. *Journal of Fluid Mechanics*, 487:43–79, 2003.
- [34] Pierre Sagaut and Claude Cambon. *Homogeneous turbulence dynamics*. Cambridge University Press Cambridge, 2008.
- [35] Prosenjit Bagchi and S Balachandar. Response of the wake of an isolated particle to an isotropic turbulent flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 518:95–123, 2004.
- [36] ME Shawkat, CY Ching, and M Shoukri. Bubble and liquid turbulence characteristics of bubbly flow in a large diameter vertical pipe. *International Journal of Multiphase Flow*, 34(8):767–785, 2008.
- [37] Zouhir Amoura. *Etude hydrodynamique de lécoulement traversant un réseau aléatoire de sphères fixes*. PhD thesis, Université de Toulouse, 2008.