



**UNIVERSIDAD DE CHILE
FACULTAD DE CIENCIAS FÍSICAS Y MATEMÁTICAS
DEPARTAMENTO DE INGENIERÍA MECÁNICA**

**ESTUDIO FLUIDODINÁMICO DE UN EQUIPO LAVADOR DE AIRE POR MEDIO DE
BURBUJEO EN UN MEDIO ACUOSO PARA UTILIZAR EN RECINTOS ABIERTOS**

MEMORIA PARA OPTAR AL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MECÁNICO

GONZALO DANIEL CHANG RAIMONDI

**PROFESOR GUÍA:
ÁLVARO VALENCIA MUSALEM**

**MIEMBROS DE LA COMISIÓN:
EUGENIO GÓMEZ RETAMAL
MAURICIO OSSES ALVARADO**

**SANTIAGO DE CHILE
MARZO 2009**

RESUMEN DE LA MEMORIA
PARA OPTAR AL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL MECÁNICO
POR: GONZALO CHANG R.
FECHA: 26 DE MAYO DE 2009
PROF. GUÍA: SR. ÁLVARO VALENCIA M.

“ESTUDIO FLUIDODINÁMICO DE UN EQUIPO LAVADOR DE AIRE POR MEDIO DE BURBUJEO EN UN MEDIO ACUOSO PARA UTILIZAR EN RECINTOS ABIERTOS”

Los niveles de contaminación atmosférica que se han alcanzado y los peligros que esto conlleva en la salud al respirarla han hecho que se incrementen los esfuerzos en investigación acerca de la depuración del aire. Así es como se han desarrollado varios equipos que intentan separar los elementos contaminantes del aire respirable a través de procesos de tipo químico y físico.

Uno de estos procesos físicos corresponde a los flujos bifásicos, donde en un reactor se inyecta aire el cual atraviesa un líquido formando burbujas. El aire inyectado posee cierto porcentaje de partículas sólidas. No se tiene mucha información acerca de este tipo de equipos, ya que lo que más se conoce es el proceso inverso a éste, donde el flujo de gas es rociado con un líquido en forma de pequeñas gotas, capturando y deteniendo las partículas sólidas.

Este trabajo de título tiene por objetivo estudiar la factibilidad del principio de retener partículas suspendidas en un flujo de aire, a través de la inyección de este flujo en un líquido reactivo. Además, reproducir la reacción principal de este reactor por medio de una simulación computacional para observar la eficacia de este método en la limpieza de aire. En este sentido los programas de simulación computacional cumplen un rol fundamental en el ahorro temporal y económico.

La metodología fue la siguiente. Primero se investigó acerca de equipos existentes similares, para determinar los parámetros de diseño de éste. Con la información anterior, se construyó la geometría del reactor en el software FLUENT. Luego se impusieron las condiciones del fenómeno, cargas, velocidades y dimensiones.

Los resultados de la simulación arrojan que la mezcla de las fases es factible, produciéndose a partir de un tiempo de 1 [s], y el material particulado puede ser retenido en el líquido, logrando un rendimiento de un 99%. También, que el programa caracteriza muy bien el régimen de burbujas. Finalmente se concluye que sin la presencia de aditivos la mezcla no se producirá espontáneamente, pero movimientos caóticos del sistema propician la captura del material particulado en el líquido. Además, se recomienda la construcción de un prototipo para la obtención de datos experimentales y posterior validación de los resultados.

Índice general

1. Introducción	1
1.1. Antecedentes Generales	1
1.2. Motivación	3
1.3. Objetivos	3
1.3.1. Objetivo general	3
1.3.2. Objetivos específicos	3
1.4. Alcances	4
2. Antecedentes	5
2.1. Material particulado	5
2.1.1. Producción de material particulado	6
2.1.2. Composición del material particulado	7
2.1.3. Índices de calidad del aire	8
2.2. Tecnologías de limpieza de aire	9
2.2.1. Partículas de diámetro mayores a 10 [μm]	10
2.2.2. Partículas de diámetro menores a 10 [μm]	12
2.2.3. Patentes de equipos orientados a la purificación de aire	15

2.2.4.	Acerca del líquido lavador	16
2.3.	Flujo bifásico	17
2.3.1.	Formación de burbujas	17
2.3.2.	Dinámica de las burbujas	22
2.3.3.	Columna de burbujeo	27
2.3.4.	Características y tipos de regímenes de flujos	27
2.4.	Movimiento de partículas en un fluido	29
2.4.1.	La fuerza de arrastre de una partícula esférica	30
2.5.	Mecanismo de captura de partículas	33
2.5.1.	Tensión superficial y ángulo de contacto	34
2.5.2.	Fuerzas sobre una partícula en la interfaz líquido-gas	35
3.	Diseño	36
3.1.	Parámetros de diseño	36
3.1.1.	Simplicidad	36
3.1.2.	Capacidad	36
3.1.3.	Ambientes externos	37
3.1.4.	Dimensiones	37
3.2.	Descripción	37
3.2.1.	Entrada de aire ambiente	38
3.2.2.	Cámara de reacción	39
3.2.3.	Filtros	40
3.2.4.	Descarga de aire tratado	40

3.3. Aditivos	41
3.4. Esquema del equipo	41
4. Memoria de cálculo	43
4.1. Propiedades de las especies	43
4.2. Dimensiones	43
4.3. Definición del volumen a limpiar	44
4.4. Tamaño de las burbujas	46
4.5. Formación de chorros	46
4.6. Arrastre de las partículas	47
4.7. Potencia requerida	49
5. Simulación	51
5.1. Problema	51
5.1.1. Geometría	51
5.2. Metodología	52
5.2.1. Malla	53
5.2.2. Condiciones de borde	54
5.2.3. Implementación en FLUENT	55
5.3. Modelos utilizados	58
5.3.1. Multifase Mixture	58
5.3.2. Multifase VOF	60
6. Resultados	62

6.1. Descripción de la simulación	63
6.1.1. Acerca del régimen de burbujas	63
6.2. Acerca del material particulado	69
6.3. Campo de velocidades	76
6.4. Campo de presiones	86
7. Discusión	96
7.1. Modelos utilizados	96
7.2. Eficiencia	97
8. Conclusiones	98
Bibliografía	100

Nomenclatura

C'_D	Coeficiente de arrastre
d_{bl}	Diámetro equivalente de la burbuja [m]
d_{or}	Diámetro del orificio [m]
d_p	Diámetro de la partícula [m]
D_t	Diámetro del estanque [m]
E_{obl}	Número de Eötvös de la burbuja
E_{oor}	Número de Eötvös del orificio
η_{motor}	Eficiencia del motor
F	Fuerza de arrastre sobre una partícula [N]
Fr_{or}	Número de Froude del orificio
g	Aceleración de gravedad [kg m/s^2]
Ga_{or}	Número de Galileo del orificio
MO_{bl}	Número de Morton de la burbuja
μ_f	Viscosidad de la fase líquida [kg/m-s]
μ_g	Viscosidad de la fase gaseosa [kg/m-s]
μ_w	Viscosidad del agua [kg/m-s]
N_c^*	Número de capacitancia adimensional
p	Perímetro de la partícula [m]
P	Potencia de operación del equipo [HP]
p_a	Presión sobre la partícula en la zona seca [Pa]
p_{as}	Presión de aspiración del equipo [Pa]
p_b	Presión sobre la partícula en la zona mojada [Pa]
p_{bl}	Presión en la burbuja [Pa]
p_c	Presión en la cámara de gas [Pa]
p_{des}	Presión de descarga del equipo [Pa]
p_{or}	Presión en el orificio [Pa]

Q	Caudal volumétrico inyectado [m^3/s]
Q^*	Caudal adimensional
Q_T	Caudal de transición [m^3/s]
R'	Fuerza por unidad de área sobre una partícula [N/m^2]
Re'	Número de Reynolds de la partícula
Re_{bl}	Número de Reynolds de la burbuja
ρ_f	Densidad de la fase líquida [kg/m^3]
ρ_g	Densidad de la fase gaseosa [kg/m^3]
S	Sección transversal de la partícula [m^2]
σ	Coefficiente de tensión superficial [N/m]
σ_{lg}	Tensión superficial entre fases líquida-gaseosa [N/m]
σ_{sg}	Tensión superficial entre fases sólida-gaseosa [N/m]
σ_{sl}	Tensión superficial entre fases sólida-líquida [N/m]
θ	Ángulo de mojado entre las fases
u_{as}	Velocidad de aspiración del equipo [m/s]
u_{des}	Velocidad de descarga del equipo [m/s]
u_{bl}	Velocidad de ascenso de la burbuja [m/s]
u_{or}	Velocidad de inyección del aire [m/s]
V_{bl}	Volumen de la burbuja desprendida [m^3]
V_{bl}^*	Volumen de la burbuja adimensional
V_c	Volumen de la cámara de gas [m^3]
We_{bl}	Número de Weber de la burbuja

Capítulo 1

Introducción

1.1. Antecedentes Generales

Las actividades humanas desde su origen, han necesitado transformar el medio natural para satisfacer las necesidades de la comunidad. Así, la situación y características del ambiente están unidas a la evolución de la vida del hombre.

En este contexto, la problemática ambiental está relacionada con el necesario proceso de desarrollo de los países, lo cual crea comprensibles conflictos entre el medio natural y el medio social. La complejidad de los estudios del medio ambiente y del desarrollo sustentable, así como su tratamiento, exigen cada vez un marco integral y sistematizado que de curso oportuna y adecuadamente a las evaluaciones del impacto en el entorno que este proceso de desarrollo pueda provocar.

La separación de los contaminantes de la corriente gaseosa que los arrastra puede realizarse con diferentes mecanismos empleados aisladamente o en conjunto. Estos mecanismos se clasifican en dos grupos, según se aplique a contaminantes gaseosos y sólidos (partículas). Para los primeros, el proceso puede implicar modificaciones en su naturaleza, como sucede en la combustión catalítica. Para los segundos, el proceso es de tipo físico, sin que ello, en la mayoría de los casos, signifique variación en la naturaleza química del contaminante.

Los principales mecanismos empleados en la separación de partículas son los siguientes:

Gravedad: Las partículas sólidas y líquidas de mayor tamaño (superior a 50 [μm]), pueden sedimentar de forma efectiva si se disminuye la velocidad de la corriente gaseosa que las envuelve.

Inercia: El fenómeno de la inercia se utiliza para modificar la línea de progresión de la corriente gaseosa, de forma que la desviación que experimentan las partículas difiere marcadamente de ellas y se consigue

así una separación completa de ambos componentes.

Fuerza centrífuga: Si la modificación de la línea de progresión de la corriente gaseosa es de forma circular, las partículas se separan de ella debido a la acción de la fuerza centrífuga.

Intercepción: Consiste en la colisión de partículas con un obstáculo situado de tal modo que éste la retiene.

Precipitación electrostática: La separación se efectúa mediante la carga eléctrica del contaminante y su paso posterior a través de un campo eléctrico que lo desvía y obliga a sedimentar.

Difusión browniana: Puede considerarse como un caso especial de intercepción, donde la colisión de las partículas con el obstáculo se debe a la energía que les transmiten las moléculas gaseosas como resultado de los choques producidos a consecuencia del movimiento browniano. Este mecanismo es viable tan sólo en el caso de partículas de tamaño extraordinariamente pequeño. Si el diámetro es inferior a 10^{-1} [μm], el grado de separación por difusión es superior al rendimiento debido al impacto.

Difusión ultrasónica: Los ultrasonidos favorecen las colisiones y aglomeración de las partículas con el consiguiente aumento de tamaño y, por lo tanto, con una mayor eficacia de la separación. Este método, no es propiamente un mecanismo de separación, sino que consiste más bien, en un proceso auxiliar.

Todos estos mecanismos citados, constituyen los fundamentos operativos de los equipos depuradores. En algunos casos, estos equipos se basan en un solo mecanismo, mientras que en otros intervienen varios.

1.2. Motivación

En los últimos años ha habido un importante desarrollo de la mecánica computacional, especialmente en el desarrollo de programas que permiten modelar problemas de transferencia de calor, mecánica de fluidos y mecánica de sólidos.

Este gran desarrollo unido a una base teórica adecuada permite simular, resolver y cuantificar problemas muy complejos de la ingeniería mecánica, así como los fenómenos involucrados en procesos mecánicos.

El tema de interés tiene relación con el estudio de procesos involucrados en reactores donde es necesario conocer más detalladamente las reacciones que ocurren en ciertos equipos. Actualmente, gracias a softwares de diseño y fluidodinámica, se puede tener una idea más cercana de los mecanismos y tiempos de una reacción.

La motivación de este trabajo de título se sustenta entonces, en la necesidad de modelar los fenómenos existentes dentro de un equipo prototipo depurador de aire, en donde las partículas sólidas quedan retenidas en un líquido, separándolas del flujo de aire. Ya que no existe precedente de este tipo de equipo, es de sumo interés, conocer la eficacia del método.

Por otra parte, ya que sería muy costoso llevar a cabo este procedimiento de manera experimental, se quiere realizar un estudio teórico a través de una simulación numérica, lo que significa un bajo costo.

1.3. Objetivos

1.3.1. Objetivo general

- Realizar un análisis teórico acerca de la factibilidad del principio para atrapar material particulado suspendido en un flujo de aire, por medio de un proceso de burbujeo a través de un lecho acuoso.

1.3.2. Objetivos específicos

- Entender el comportamiento físico de los regímenes de flujo bifásico, y conocer las tecnologías existentes purificadoras de aire, mediante el contacto partícula-líquido (Wet scrubbers).
- Determinar los parámetros de diseño de este equipo.
- Realizar la simulación numérica en FLUENT del fenómeno de retención de partículas sólidas que atraviesan un líquido a través de una corriente gaseosa. De esta manera, se determinará el porcentaje de partículas suspendidas en el flujo de aire, antes y después de la reacción.

- Proponer un prediseño conceptual para la posible implementación de un prototipo futuro.

1.4. Alcances

- Se trata de un prediseño conceptual, es decir, el equipo que se investiga no se construirá.
- El equipo se diseña para filtrar partículas sólidas cuyo diámetro sea menor o igual a $10\ \mu\text{m}$.
- La simulación numérica que se desarrollará no podrá validarse debido a la inexistencia de pruebas realizadas en este tipo de equipos.

Capítulo 2

Antecedentes

2.1. Material particulado

La incorporación directa de contaminantes gaseosos y particulados a la atmósfera es por dos vías. La primera de ellas corresponde a las fuentes emisoras de origen natural. La otra vía está representada por las fuentes de origen antropogénico producto de las diferentes actividades que desarrolla el hombre. A este grupo pertenecen los procesos industriales y de combustión, el transporte vehicular y las pérdidas por evaporación, por nombrar algunas, que emiten gases y partículas según el proceso considerado.

En general, las fuentes emisoras son clasificadas como fijas, móviles y no convencionales. Las primeras son aquellas que emiten desde un lugar definido en el espacio, independiente del tamaño que tengan, entre las que están las salamandras o estufas de uso residencial, en calefacción.

Fuentes móviles son aquellas que emiten mientras están en movimiento y cambian constantemente de ubicación en el espacio. A este grupo pertenecen los medios de transporte terrestre, acuático y aéreo, impulsados por motores de combustión interna.

Las fuentes misceláneas corresponden a aquellas que aparecen en forma ocasional, como son los incendios de bosques y pastizales, el polvo levantado desde el suelo y la detonación de explosivos, entre otras.

A continuación se mencionan algunos de los contaminantes considerados como más críticos:

- Material particulado respirable, MP10: Se puede definir como partículas sólidas o líquidas, como polvo, cenizas, hollín, partículas metálicas, cemento o polen dispersos en la atmósfera, cuyo diámetro es inferior a 10 [μm].
- Material particulado respirable, MP2.5: Corresponde a la fracción más pequeña y agresiva del material

particulado cuyo diámetro es inferior a 2,5 [μm]. Por su tamaño, estas partículas son respirables en un 100% y por ello se alojan en bronquios, bronquiolos y alvéolos.

- Material particulado secundario: Aquel material particulado que se forma a partir de distintas reacciones químicas entre precursores como NO_x , SO_2 y NH_3 .

2.1.1. Producción de material particulado

Este tipo de contaminante de variado tamaño y composición química es producido durante el desarrollo de una combustión incompleta o debido a procesos de síntesis que se generan durante su transcurso. De esta forma se producen, por ejemplo, los hidrocarburos aromáticos policíclicos (HAP). Depende fundamentalmente del tipo de combustible utilizado, es así, como para los gases la cantidad generada es muy reducida, pero se va incrementando con la menor volatilidad del combustible. Aquellas sustancias que son líquidas y presentan una baja presión de vapor (reducida volatilidad) y alta viscosidad, como sucede con el carbón mineral de diferentes clases y la leña, son sustancias que tienen una alta tasa de emisión de partículas por unidad de combustible quemado, siendo especialmente significativas para la leña y el carbón mineral. Al emplear estos últimos, la emisión de partículas está estrechamente asociada al contenido de cenizas de ellos.

Adicionalmente, tienen importancia en la producción de partículas, la presencia de aditivos tanto en los combustibles líquidos como gasolina y petróleo, como en los diferentes tipos de aceite que usan los motores de combustión interna, cuando éstos lo consumen, debido a un estado defectuoso, producto de una mantención deficiente. A modo de ejemplo están el plomo tetraetilo en la gasolina y compuestos de zinc, molibdeno y fósforo, presentes en algunos aceites.

Por último, la emisión de material particulado está estrechamente relacionada con la composición química de los combustibles, en especial es interesante destacar el contenido de azufre, de ceniza y de algunas sustancias o elementos provenientes del proceso productivo.

Los antecedentes entregados son aplicables tanto a la combustión interna como externa, cambiando solamente la cantidad a emitir según el proceso en estudio.

Por lo general, la combustión interna aporta una mayor cantidad de NO_x , CO y HC que la externa; pero esta última contribuye con más partículas.

Por otra parte, los procesos de combustión se incluyen en las fuentes fijas (calderas y hornos industriales) y móviles (vehículos gasolineros y petroleros).

2.1.2. Composición del material particulado

El material particulado se origina tanto de fuentes naturales como por las fuentes antropogénicas. Estas últimas, las cuales son generadas por el hombre, son el gran contribuyente a nivel urbano y están constituidos por:

- Partículas sólidas (humos), formadas por la combustión, por ejemplo, de petróleo, la leña o el carbón, ya sea desde fuentes fijas o móviles;
- Partículas de diámetro menor a $0,2 \mu\text{m}$, provenientes de la transformación gas-partícula y derivadas de reacciones fotoquímicas entre óxidos de nitrógeno (NO_x) e hidrocarburos antropogénicos, que son básicamente las reacciones químicas generadoras de “smog” fotoquímico;
- Otros aerosoles secundarios derivados de la transformación de gases en partículas, como los sulfatos, ya neutralizados o en forma de ácido sulfúrico, o la reacción de ozono con ciertas olefinas para formar productos condensables.

A partir del análisis de los filtros provenientes de las estaciones de monitoreo de calidad de aire de Las Condes, Parque O’Higgins y Pudahuel realizado durante el invierno de 1999, se ha determinado la composición química promedio del material particulado, según se señala en la siguiente tabla:

Tabla 2.1: Composición química del material particulado [4]

Compuesto	Participación [%]
Carbón orgánico	7
Carbón elemental	8
Nitrato	10
Sulfato	8
Amonio	8
Cloro	7
Polvo Background	38
Polvo Antropogénico	11
Otros	3
TOTAL	100

A partir de este análisis, es posible señalar que las emisiones directas de material particulado por procesos de combustión están dadas por la fracción de carbono orgánico y carbono elemental, que en conjunto aportan un 15 % del total.

El aporte del material particulado secundario, representado por el nitrato, sulfato y amonio alcanza un 26 % del total, lo cual es consistente con diversos estudios realizados por CONAMA, que indican que el material particulado secundario, es decir, aquél que se forma en la atmósfera a partir de gases precursores (NO_x, SO_x y NH₃) tiene una participación importante en las concentraciones de material particulado total. En la fracción fina, su aporte supera el 50 %. Siendo ésta la fracción más agresiva para la salud, su control debe ser abordado con una prioridad mayor que el de la fracción gruesa del material particulado, cuyo efecto en la salud es de menor magnitud.

Otro elemento que surge de este análisis es la existencia de concentraciones background de material particulado, las cuales dan cuenta de al menos un tercio de las concentraciones medidas en las redes de monitoreo de la Región Metropolitana. Esta fracción, se encuentra gobernada por procesos naturales y no antropogénicos.

2.1.3. Índices de calidad del aire

Los índices de calidad del aire han sido definidos por resolución del Ministerio de Salud para establecer los puntos de corte a partir de cuáles se exceden los límites de Alerta, Preemergencia y Emergencia Ambiental.

El ICAP, índice de calidad del aire por partículas, es una función que relaciona la calidad del aire expresada en concentraciones promedio de 24 horas con categorías numéricas, de forma tal que el valor de ICAP 100, corresponde exactamente al valor de la norma para 24 horas de MP10, 150 microgramos por metro cúbico.

Tabla 2.2: Índices de calidad del aire para material particulado [4]

	ICAP	CATEGORIA ICAP	MP10 $\mu\text{g}/\text{m}^3$ (24 hrs.)	NIVEL	EPISODIO
0 - 100	Bueno	0	0	0	-
101 - 200	Regular	100	150	0	-
201 - 300	Malo	200	195	1	Alerta
301 - 400	Crítico	300	240	2	Preemergencia
401 - 500	Peligroso	400	285	2	Preemergencia
> 501	Excede	500	330	3	Emergencia

Tabla 2.3: Normas primarias de calidad del aire [4]

CONTAMINANTE	NORMA	UNIDAD	TIPO DE NORMA	EXCEDENCIA
Material particulado respirable (MP10)	50	$\mu g/m^3$	Media aritmética anual	No se permite
	150	$\mu g/m^3$	Media aritmética diaria	Percentil 98
Dióxido de Azufre (SO_2)	80	$\mu g/m^3$	Media aritmética anual	No se permite
	250	$\mu g/m^3$	Media aritmética diaria	Percentil 99
Oxidantes fotoquímicos (O_3)	120	$\mu g/m^3$	Promedio aritmético móvil de 8 horas consecutivas	Percentil 99
Monóxido de Carbono (CO)	10.000	$\mu g/m^3$	Promedio aritmético móvil de 8 horas consecutivas	Percentil 99
	30.000	$\mu g/m^3$	Media aritmética horaria	Percentil 99
Dióxido de Nitrógeno (NO_2)	100	$\mu g/m^3$	Media aritmética anual	No se permite
	400	$\mu g/m^3$	Media aritmética horaria	Percentil 99

2.2. Tecnologías de limpieza de aire

El material particulado incluye pequeñas partículas líquidas y sólidas y también es referido como humo, polvo, vapor o neblina. Entre éstas, las partículas con menos de 10 y 2,5 [μm] de diámetro son reconocidas como contaminantes críticos. Estas pequeñas partículas tienen un efecto mucho mayor sobre la salud humana que las partículas más grandes. Las técnicas de control para las partículas se centran en capturar las partículas emitidas por una fuente contaminante.

Antes de elegir un dispositivo de control de partículas se deben considerar muchos factores. Usualmente, las partículas son recogidas y encauzadas por un canal o chimenea. Las características de la corriente de partículas afectan la elección del dispositivo de control. Estas características incluyen la variedad del tamaño de las partículas en la corriente de escape, la tasa de flujo del escape, temperatura, contenido de humedad y propiedades químicas del flujo de la corriente de escape como capacidad explosiva, acidez, alcalinidad e inflamabilidad.

Los dispositivos de control más usados para controlar la emisión de partículas son:

- precipitadores electrostáticos

- filtros
- lavadores Venturi
- ciclones
- cámaras de sedimentación
- lavadores de aire (wet scrubbers)

En muchos casos, se usa más de uno de estos dispositivos en serie para obtener la eficiencia deseada de remoción. Por ejemplo, se puede usar una cámara de sedimentación para retirar partículas grandes antes de que el flujo contaminante ingrese a un precipitador electrostático. A continuación se describe cada uno de estos dispositivos de control de partículas.

2.2.1. Partículas de diámetro mayores a 10 [μm]

Cámaras de sedimentación

Las cámaras de sedimentación emplean la fuerza de gravedad para remover partículas sólidas. El flujo de gas ingresa a una cámara donde disminuye la velocidad del gas. Las partículas más grandes caen del flujo de gas en una tolva y son muy eficientes atrapando partículas de tamaño mayores a 50 [μm]. Debido a que las cámaras de sedimentación son efectivas sólo para la remoción de partículas más grandes, usualmente se usan junto con un dispositivo más eficiente de control.

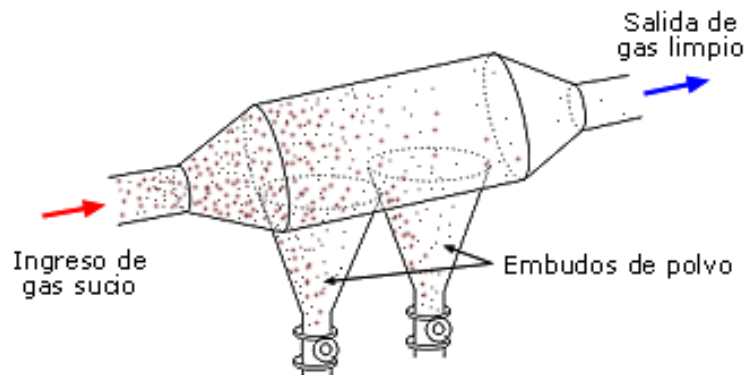


Figura 2.1: Cámara de sedimentación [12]

Ciclones

Los ciclones usan el principio de la fuerza centrífuga para remover el material particulado. En un ciclón, el flujo contaminante es forzado a un movimiento circular. Este movimiento ejerce fuerza centrífuga sobre las partículas y las dirige a las paredes exteriores del ciclón. Las paredes del ciclón se angostan en la parte inferior de la unidad, lo que permite que las partículas sean recolectadas en una tolva. El aire limpio sale del ciclón por la parte superior de la cámara, pasando por un espiral de flujo ascendente o vórtice formado por una espiral que se mueve hacia abajo. Los ciclones son eficientes para remover partículas grandes, del orden de los 10 a 15 [μm], pero no son tan eficientes para partículas pequeñas. Por esta razón, a menudo se usan con otros dispositivos de control.

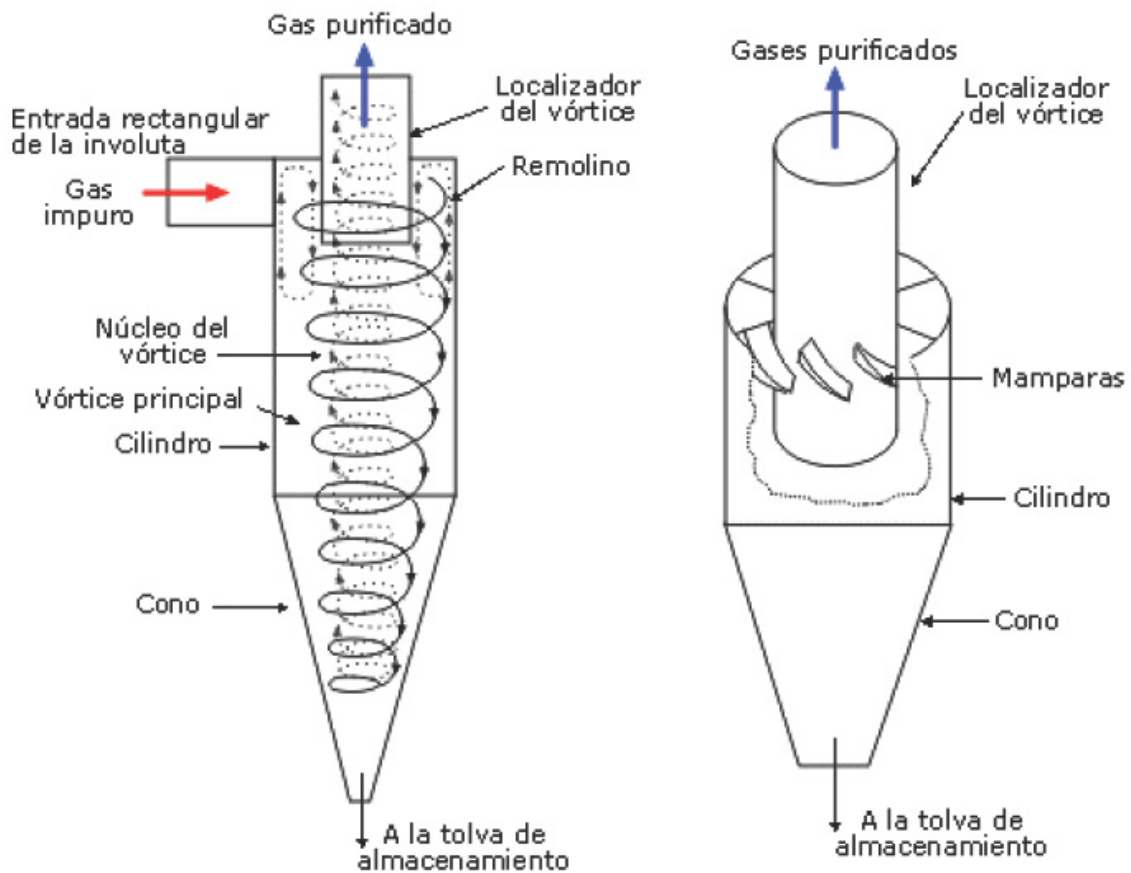


Figura 2.2: Ciclones [12]

2.2.2. Partículas de diámetro menores a 10 [μm]

Precipitadores electrostáticos

Los precipitadores electrostáticos (PES) capturan las partículas sólidas en un flujo de gas por medio de la electricidad. El PES carga de electricidad a las partículas atrayéndolas a placas metálicas con cargas opuestas ubicadas en el precipitador. Las partículas se retiran de las placas mediante “golpes secos” y se recolectan en una tolva ubicada en la parte inferior de la unidad. La eficiencia de remoción de los PES es muy variable. La eficiencia de remoción es de aproximadamente 99% para partículas bajo los 10 [μm]. Sin embargo si se tiene una gran cantidad de partículas bajo 1 [μm], la precipitación electrostática podría llegar a ser insatisfactoria.

Filtros de tela

El filtro de tela o cámara de filtros de bolsa trabaja bajo el mismo principio que una aspiradora de uso doméstico. El flujo de gas pasa por el material del filtro que retira las partículas. El filtro de tela es eficiente para retener partículas finas y puede sobrepasar 99% de remoción para partículas de tamaño bajo los 0,3 [μm]. Una desventaja del filtro de tela es que en caso de tratarse de gases a altas temperaturas, éstos a menudo tienen que ser enfriados antes de entrar en contacto con el medio filtrante.

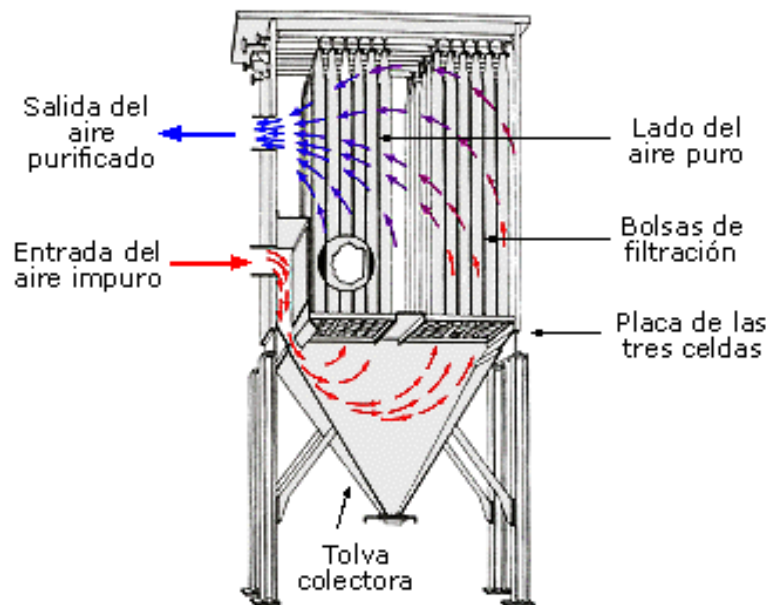


Figura 2.3: Filtro de tela [12]

Wet scrubbers

Hay muchos tipos de lavadores de aire, dependiendo de diferencias relacionadas al método de contacto gas-líquido y a la forma geométrica se tienen, lavadores Venturi, torres de spray, lavadores ciclones, lavadores de impacto, filtros o rejillas húmedas, etc. El diseño de los lavadores y los parámetros de operación incluyen, la caída de presión del gas, caída de presión del líquido, la relación de la tasa de flujo líquido/gas (L/G), la forma geométrica del lavador, la ubicación de los sprays o puntos de inyección, el tiempo de residencia del gas, la distribución del tamaño de las gotas, las velocidades del gas, la temperatura del agua, la cantidad de vapor de agua, y la solubilidad de la partícula en el agua. A continuación se describen brevemente algunos ejemplos:

Lavadores Venturi. Los lavadores Venturi usan un flujo líquido para remover partículas sólidas. En el lavador Venturi, el gas cargado con material particulado pasa por un tubo con una sección estrecha. Esta constricción hace que el flujo de gas se acelere cuando disminuye la presión. El flujo de gas recibe un rocío de agua antes o durante la constricción en el tubo. La diferencia de velocidad y presión que resulta de la constricción hace que las partículas y el agua se mezclen y combinen. La reducción de la velocidad en la sección expandida del cuello permite que las gotas de agua con partículas caigan del flujo de gas. Los lavadores Venturi pueden alcanzar altas eficiencia en la remoción de partículas pequeñas, en el rango de 0,5 a 5 [μm]. Sin embargo, una desventaja de este dispositivo es la producción de aguas residuales.

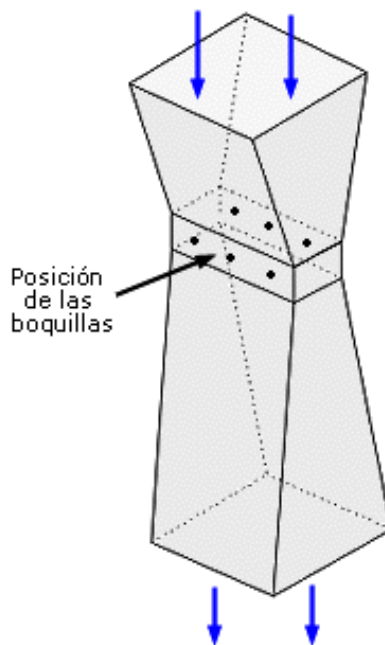


Figura 2.4: Lavador Venturi [12]

Lavadores de bandeja y placas. Estos lavadores son llamados así por el uso de placas perforadas, el gas fluye verticalmente hacia arriba y el líquido en contracorriente hacia abajo. Deflectores ubicados inmediatamente aguas abajo de las placas, pueden ser usados como superficies colectoras de partículas. El líquido fluye hacia abajo a través de las perforaciones de la placa. Con un poco de líquido depositado sobre las placas perforadas, el gas que fluye hacia arriba formará burbujas y espuma. La retención de partículas ocurre en estas burbujas en la capa de espuma. La profundidad del líquido y la espuma depende de la tasa de flujo del líquido, la altura de la presa. Estos equipos son muy eficientes para la colección de partículas sobre $1\ \mu\text{m}$ de diámetro.

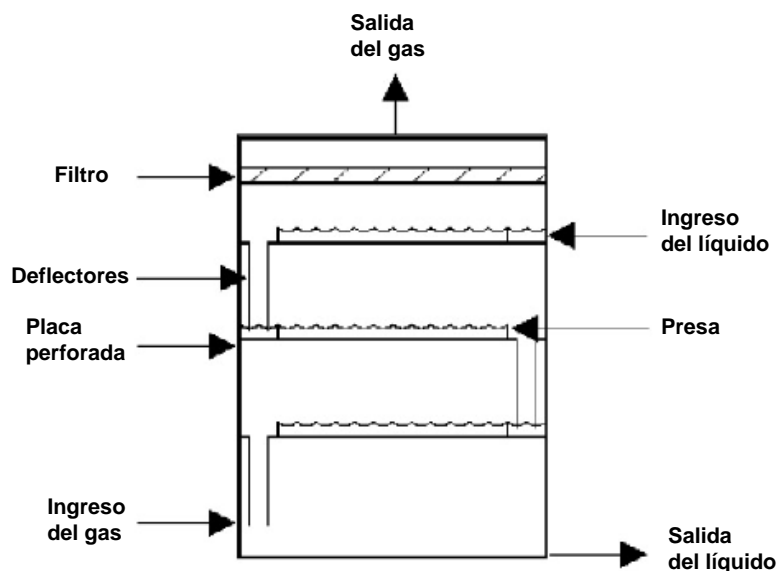
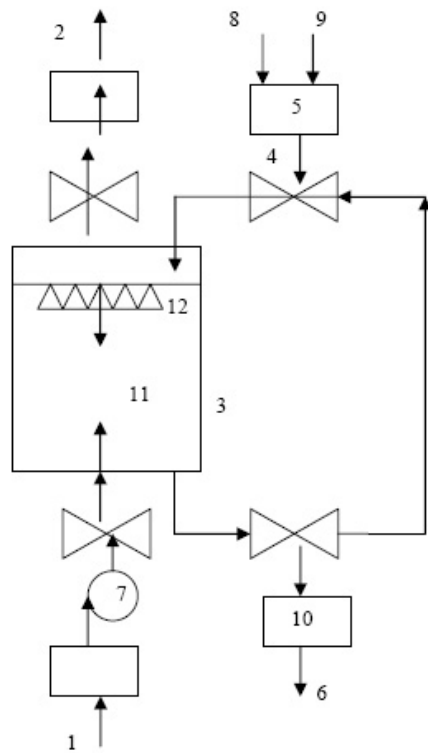


Figura 2.5: Lavador de aire por placas perforadas [13]

Lavador de spray. Este tipo de limpiadores, funcionan en base al contacto de un líquido limpiador con un flujo de gases. El gas introducido desde la parte de abajo del equipo y es rociado por líquido en forma de gotitas en contracorriente, capturando las impurezas y descargandolas por la parte inferior del reactor. El equipo esquematizado en la figura 2.6 funciona en base a este principio y además posee un circuito que recircula el líquido limpiador que ha sido usado hasta su saturación. Posteriormente es eliminado. Su eficiencia es baja si se trata de partículas cuyo tamaño es menor a $5\ \mu\text{m}$.



1. Ingreso aire del ambiente
2. Salida aire limpio
3. Estructura principal
4. Ingreso líquido de limpieza
5. Contenedor del líquido
6. Descarga de líquido usado
7. Ventilador
8. Líquido de limpieza
9. Aditivos
10. Contenedor de líquido saturado
11. Cámara principal
12. Distribuidor

Figura 2.6: Lavador de spray [5]

2.2.3. Patentes de equipos orientados a la purificación de aire

Método para filtrar un flujo de aire a través de una espuma acuosa

Este procedimiento incluye el paso de un flujo de aire contaminado, a través de un filtro, el cual ingresa en una solución acuosa dentro de una cámara expansiva, generando una espuma de base líquida. Esta espuma es contenida sobre la solución y se impide su crecimiento a través de un material de espuma sólida.

El aparato para filtrar aire, incluye, una fase inicial que consiste en un baño del aire por medio del líquido; una segunda fase que consiste en el paso del aire a través de una espuma acuosa; finalmente una tercera fase, donde el aire al abandonar la espuma acuosa, entra en un material sólido, también espumoso.

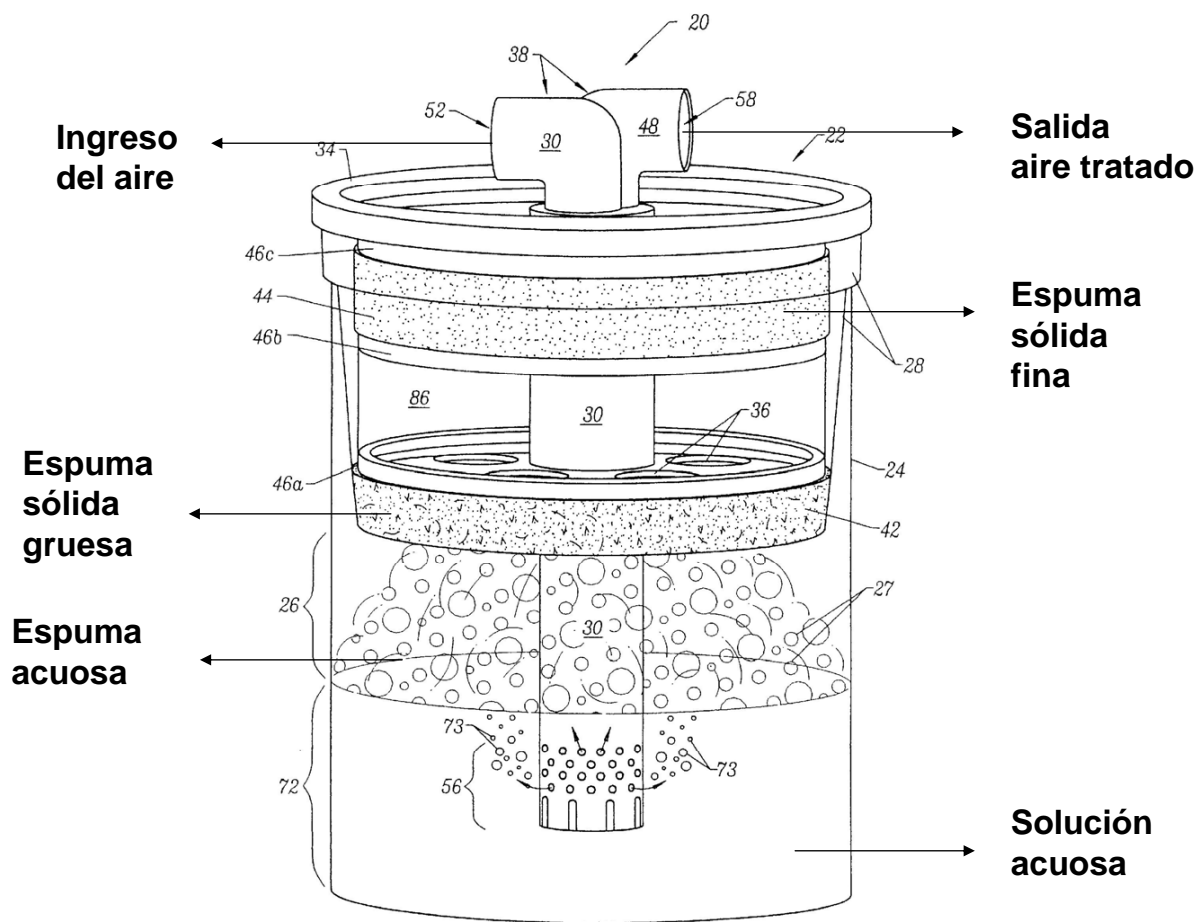


Figura 2.7: Lavado de aire por medio de espuma acuosa [6]

2.2.4. Acerca del líquido lavador

También llamado scrubbing liquor, consiste en una solución acuosa de distintos aditivos disueltos en agua. Éstos permiten la transferencia de masa entre la interfaz líquido-aire y la solubilización de agentes contaminantes contenidos en el aire.

Tabla 2.4: Aditivos de la solución limpiadora [5][8]

Aditivos	Ejemplos	Aplicaciones
Agentes tensoactivos	Sales de Na, K, Amonio	Romper la tensión superficial del agua, dispersantes, mojado, espumado
Aceites	Parafinas, ácidos grasos, aceites naturales	Absorción de contaminantes hidrofóbicos
Agentes secuestradores	Ácidos co-poliméricos y sus sales, Policarboxilatos y sus sales. Edetato de calcio disódico (CaNa ₂ EDTA)	Prevenir la nucleación o coagulación de partículas sólidas en la solución, Captura de metales (Pb)
Compuestos poliméricos orgánicos	etilenglicol, propilenglicol, isopropilenglicol, glicerol	Agentes dispersantes, anti-redeposición
Dispersantes	Silicatos, carbonatos, sulfatos	Absorción de contaminantes en la solución, dispersión de material sólido
Sorbentes sólidos	Carbón activado, zeolitos, aluminas, sílica	Adsorción de moléculas de N, Oxígeno, Secado de gases

2.3. Flujo bifásico

2.3.1. Formación de burbujas

Un problema de este tipo es aquel en el cual el gas es forzado a través de un orificio (o varios orificios) sumergido en el líquido. Dependiendo del flujo de gas, éste saldrá del orificio como burbujas individuales (tasa de flujo baja) o continuamente como un jet (tasa de flujo alta). El jet irrumpe en el líquido como burbujas de diversos tamaños.

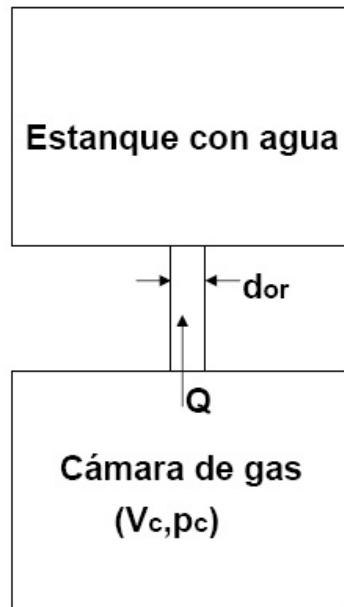


Figura 2.8: Esquema de una instalación experimental [7]

Considerando un sistema compuesto por un recipiente que aloja un baño en reposo de un fluido newtoniano incompresible con un orificio circular de diámetro d_{or} , que lo conecta a una cámara de gas de volumen V_c , un gas es inyectado con un caudal Q a presión p_c en la cámara, entonces por el orificio se obtendrán burbujas generadas con un caudal $q(t)$. Una representación esquemática se muestra en la figura 2.8. El flujo está controlado por las presiones en la cámara y en la burbuja, $p_c(t)$ y $p_{bl}(t)$ respectivamente, y ambas se asumen homogéneas al interior de sus respectivos volúmenes, por lo que el crecimiento de la burbuja está afectada por la presión dentro de la burbuja, la presión de la cámara y el volumen de la cámara. Los parámetros que influyen en la formación de burbujas se clasifican en:

- Variables de equipo: diámetro del orificio, volumen de cámara, etc.
- Variables del sistema: tensión superficial, densidad del medio líquido, viscosidad del medio líquido, etc.
- Variables de operación: caudal volumétrico de gas, velocidad de la fase continua, etc.

La formación de burbujas está ligada a la geometría de la instalación en la cual serían obtenidas, la cual puede ser a flujo constante o a presión constante, lo que se detalla más adelante, en donde se presentan

relaciones empíricas para generar burbujas, y para facilitar la presentación de ellas se definen una serie de números adimensionales: el volumen de burbuja adimensional,

$$V_{bl}^* = \frac{V_{bl}}{d_{or}^3} \quad (2.1)$$

el número de Froude de orificio,

$$Fr_{or} = \frac{u_{or}^2}{d_{or} g} \quad (2.2)$$

el número de Eötvös de orificio,

$$Eo_{or} = \frac{\rho_f d_{or}^2 g}{\sigma} \quad (2.3)$$

el número de Galileo de orificio,

$$Ga_{or} = \frac{\rho_f^2 d_{or}^3 g}{\mu_f^2} \quad (2.4)$$

el caudal adimensional,

$$Q^* = Eo_{or} \sqrt{Fr_{or}} = \frac{\rho_f u_{or}}{\sigma} \sqrt{d_{or}^3 g} \quad (2.5)$$

y el número de capacitancia adimensional,

$$N_c^* = \frac{4 g V_c \rho_f}{\pi d_{or}^2 p_{or}} \quad (2.6)$$

con el cual se pueden establecer los intervalos para las condiciones de inyección de gas. En particular, si el gas inyectado es aire, los intervalos del número de capacitancia adimensional son los siguientes:

- Flujo constante: $N_c^* \in [0,1[$
- Caso intermedio: $N_c^* \in [1,9]$
- Presión constante: $N_c^* \in]9,+\infty[$

donde V_{bl} es el volumen de la burbuja desprendida [m^3], u_{or} es la velocidad de inyección por el orificio [m/s], g es la aceleración de gravedad (9,8 [m/s^2]), ρ_f es la densidad de la fase líquida [kg/m^3], σ es el coeficiente de tensión superficial [N/m], μ_f es la viscosidad de la fase líquida [Ns/m^2], y p_{or} es la presión del orificio [Pa].

Condición de flujo constante

Si el volumen de la cámara de gas es despreciable, las fluctuaciones de presión debidas a la formación de burbujas es menor que el decaimiento. En este caso el caudal de gas se considera constante y el crecimiento de las burbujas es igual a la cantidad de gas que entra al sistema. Esta condición es a la que se refiere como “formación de burbujas a flujo constante”.

El modelamiento del tamaño de la burbuja depende del caudal de gas inyectado, este caudal puede ser pequeño, medio o grande. el criterio a usar para considerar si el caudal es pequeño o no es mediante el “caudal de transición”, definido como:

$$Q_T = \begin{cases} \frac{\pi g |\Delta\rho|}{108 \mu_f} \left(\frac{6 \sigma d_{or}}{g |\Delta\rho|} \right)^{\frac{4}{3}} & \text{si } Re_{bl} < 1 \\ 0,38 \sqrt{g} \left(\frac{6 \sigma d_{or}}{g |\Delta\rho|} \right)^{\frac{5}{6}} & \text{si } Re_{bl} \gg 1 \end{cases} \quad (2.7)$$

donde Re_{bl} es el número de Reynolds de la burbuja, definido como:

$$Re_{bl} = \frac{\rho_f u_{bl} d_{bl}}{\mu_f} \quad (2.8)$$

donde u_{bl} es la velocidad terminal de la burbuja.

Si el caudal de gas es pequeño ($Q < Q_T$), y siempre y cuando la densidad de la fase líquida mucho mayor que la gaseosa ($\rho_f \gg \rho_g$), el tamaño de la burbuja se puede modelar como:

$$V_{bl}^* E_{o_{or}} = 0,89 \pi \left(\frac{\mu_f}{\mu_w} \right)^{0,15} \quad (2.9)$$

donde μ_f es la viscosidad del líquido y μ_w es la viscosidad del agua, a idénticas temperaturas.

Para caudales intermedios ($Q > Q_T$) existe una clasificación según la viscosidad de la fase líquida, debido a que en líquidos poco viscosos como el agua, la magnitud de los esfuerzos viscosos es mucho menor que la presión inercial debida al movimiento del líquido que rodea a la burbuja en crecimiento, debido a ello, la influencia de la viscosidad del líquido en la burbuja es considerada despreciable, exceptuando la vecindad del orificio. Para viscosidades bajas, de Davidson y Schüler [7], la expresión que modela el tamaño de la burbuja resultante es:

$$V_{bl}^* E_{o_{or}} = \frac{1,03 Q^{*1,2}}{E_{o_{or}}^{0,2}} \quad (2.10)$$

la cual despejada para el diámetro equivalente de la burbuja queda como:

$$d_{bl} = 0,794 d_{or}^{0,8} u_{or}^{0,4} = 0,875 Q^{0,4} \quad (2.11)$$

y para viscosidades altas se tiene la siguiente expresión:

$$V_{bl}^* E_{o_{or}} = \frac{5,41 Q^{*0,75} E_{o_{or}}^{0,25}}{G d_{or}^{0,375}} \quad (2.12)$$

la que despejada para el diámetro equivalente de la burbuja queda como:

$$d_{bl} = 2,178 \sqrt[4]{\frac{u_{or} \mu_f d_{or}^2}{\rho_f g}} \quad (2.13)$$

Para caudales altos, la expresión que entrega el tamaño de la burbuja despreendida es:

$$V_{bl}^* E_{o_{or}} = \frac{1,15 Q^{*1,2}}{E_{o_{or}}^{0,2}} \quad (2.14)$$

lo que despejada para el diámetro equivalente de la burbuja queda como:

$$d_{bl} = 0,887 d_{or}^{0,8} u_{or}^{0,4} = 0,976 Q^{0,4} \quad (2.15)$$

donde d_{bl} es el diámetro equivalente de la burbuja [m], u_{or} es la velocidad inyección en el orificio [m/s], Q es el caudal de inyección [m^3/s], g es la aceleración de gravedad (9,8 [m/s^2]), ρ_f es la densidad de la fase líquida [kg/m^3], y μ_f es la viscosidad de la fase líquida [$N\cdot s/m^2$].

Condición de presión constante

Cuando el volumen de la cámara es muy grande en comparación al volumen de las burbujas formadas, la variación del caudal de gas no cambiará significativamente la presión en la cámara: esta condición es la que se refiere como “formación de burbujas a presión constante”, pero a medida que el tamaño de la burbuja aumenta, la presión al interior de ella decrece; por lo tanto, en arreglos de presión constante, las condiciones de flujo constante no se mantienen y la tasa de crecimiento de la burbuja variará.

Entonces, para un caudal adimensional acotado por $Q^* < 16$, es modelado mediante:

$$V_{bl}^* E_{o_{or}} = 28,8 \quad (2.16)$$

2.3.2. Dinámica de las burbujas

Una clasificación y caracterización de la ascensión de una burbuja singular en un fluido se puede efectuar mediante los siguientes números adimensionales: el número de Reynolds de la burbuja,

$$Re_{bl} = \frac{\rho_f u_{bl} d_{bl}}{\mu_f} \quad (2.17)$$

el número de Eötvös de la burbuja,

$$E_{o_{bl}} = \frac{g d_{bl}^2 (\rho_f - \rho_g)}{\sigma} \quad (2.18)$$

y el número de Morton de la burbuja,

$$M_{o_{bl}} = \frac{g \mu_f^4 (\rho_f - \rho_g)}{\sigma^3 \rho_f^2} \quad (2.19)$$

donde μ_f es la viscosidad de la fase líquida [$N s/m$], ρ_f y ρ_g son las densidades de la fase líquida y gaseosa respectivamente [kg/m^3], d_{bl} es el diámetro equivalente de la burbuja, u_{bl} es la velocidad terminal

de ascenso de la burbuja [m/s], σ es la tensión superficial de la fase líquida [N/m], y g es la aceleración de gravedad.

Por lo tanto, las propiedades físicas y dinámicas de una burbuja quedan inequívocamente caracterizadas con los números de Reynolds, Eötvös y Morton de la burbuja.

Acerca del número de Eötvös, conocido también como el número de Bond de la burbuja, entrega principalmente la relación entre el empuje y la tensión superficial.

Por otro lado, dado que el número de Morton está compuesto solamente por las propiedades de las especies involucradas, él se mantendrá invariable aún cuando cambie el régimen de la burbuja.

Finalmente, el número de Reynolds nos entrega la relación entre la inercia y las fuerzas viscosas.

Frecuentemente, en la literatura se hallan otros números adimensionales, los que pueden quedar en función de los tres anteriores. Por ejemplo, se tiene el número de Weber de la burbuja,

$$We_{bl} = \frac{\rho_f u_{bl}^2 d_{bl}}{\sigma} = \frac{Re_{bl}^2 \sqrt{Mo_{bl}}}{\sqrt{Eo_{bl}}} \quad (2.20)$$

El número de Weber entrega la relación entre la inercia y la tensión superficial.

Laminaridad e inestabilidad

La descripción de un régimen de laminaridad o estabilidad se puede obtener a partir del trabajo de Bhaga y Weber [7], los que identifican dos grandes zonas:

- Una zona considerada laminar, que está acotada por $Mo_{bl} > 10^{-4}$ y $Re_{bl} < 110$, en la cual las burbujas al ascender no presentan desprendimientos de vórtice, y tienen una forma toroidal.
- Otra zona que presenta inestabilidades, a partir de $Re_{bl} > 110$, en la cual la ascensión de las burbujas presenta desprendimientos de vórtice y tienen forma variable

Formación de chorros

Debido a que el fenómeno a estudiar son burbujas y no chorros, del trabajo de Zhao y Irons [7] se obtiene un criterio para considerar si el flujo de burbujas se convierte o no en un chorro, éste es:

$$We_{bl} \geq 10,5 \sqrt{\frac{\rho_f}{\rho_g}} \quad (2.21)$$

Relación entre las variables adimensionales

En la literatura existe una gran cantidad de trabajos experimentales de burbujas aisladas ascendentes en fluidos en reposo, en conjunto ha sido reunido de buena manera en el trabajo de Clift, Grace y Weber [7], los cuales con aquellos trabajos han confeccionado un diagrama que esquematiza el comportamiento esperado de las burbujas, este diagrama se expone en la figura 2.9, en él, la disposición de los grupos adimensionales es: número de Eötvös de la burbuja en el eje de las abscisas y número de Reynolds de la burbuja en el de las ordenadas, observándose que las curvas son valores del número de Morton, expresados en logaritmo en base decimal.

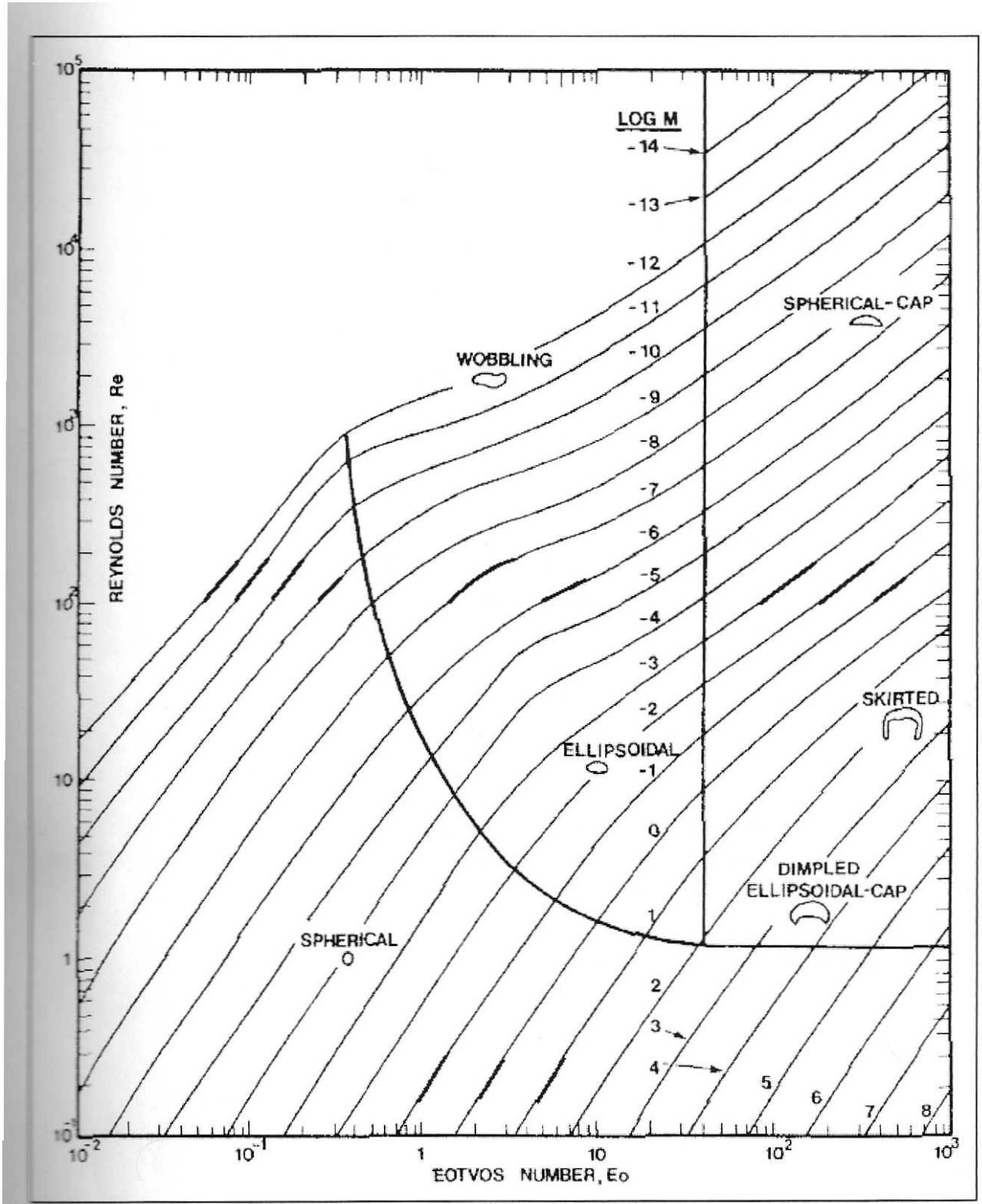


Figura 2.9: Regiones de comportamiento de burbuja en una gráfica del número de Reynolds versus el número de Eötvös [7]

En resumen, a partir de la figura 2.9, se pueden definir cuatro grandes familias de burbujas, cuya clasificación depende de sus correspondientes valores adimensionales:

- Burbujas Esféricas : $0,01 \leq Eo_{bl} \leq 1, 0,1 \leq Re_{bl} \leq 10$
- Burbujas Elipsoidales : $0,2 \leq Eo_{bl} \leq 30, 1 \leq Re_{bl} \leq 10.000$
- Burbujas Tapa esférica : $30 \leq Eo_{bl} \leq 1.000, 100 \leq Re_{bl} \leq 100.000$
- Burbujas con Falda : $30 \leq Eo_{bl} \leq 1.000, 1 \leq Re_{bl} \leq 100$

Relación entre el volumen y la velocidad terminal de la burbuja

Para un valor determinado del número de Morton de la burbuja, a partir del diagrama de la figura 2.9 se puede obtener un gráfico que entregue la velocidad de ascensión de la burbuja con respecto a su diámetro equivalente. Como ejemplo, para el sistema aire-agua en condiciones normales se tienen las siguientes propiedades físicas: $\mu_f=0,001$ [N s/m²], $\rho_f=998,2$ [kg/m³], $\rho_g=1,225$ [kg/m³], y $\sigma=0,0728$ [N/m], entonces el logaritmo en base decimal del número de Morton será $\log Mo=-10,6$, y despejando pares de números de Eötvös y Reynolds que satisfacen la figura 2.9, se obtiene la curva que se muestra en la figura 2.10.

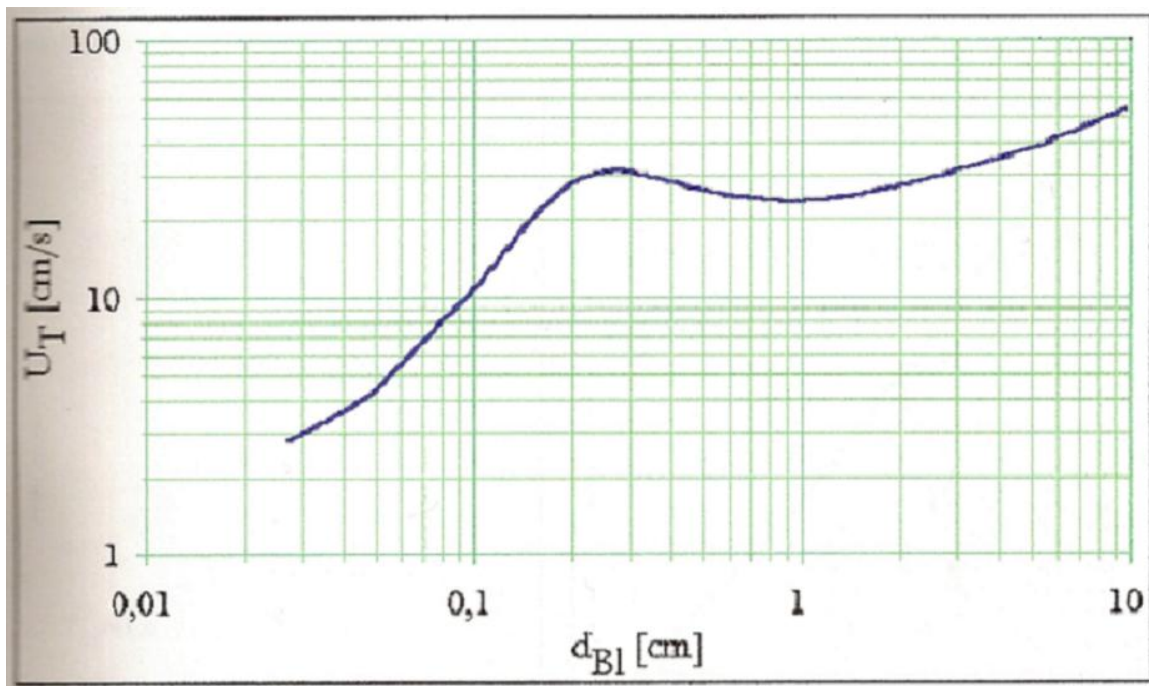


Figura 2.10: Velocidad de ascenso de una burbuja dependiendo de su diámetro equivalente para un número de Morton de burbuja de $Mo_{bl} = 2,63 \cdot 10^{-11}$ [7]

2.3.3. Columna de burbujeo

Una columna de burbujeo (bubble columns) corresponde un sistema bifásico gas-líquido en donde el gas se inyecta en un líquido y las burbujas se dispersan a través de éste dentro de una columna cilíndrica, que puede incluir o no, aparatos como intercambiadores de calor. Cuando sólidos finos quedan suspendidos en el líquido, se forma una fase barrosa. Con respecto al flujo de gases, el flujo de la fase líquido/barro puede ser cocorriente o contracorriente, o una combinación de ambos. El tamaño de las partículas sólidas se encuentra típicamente en un rango entre 5 a 150 μm y la carga de sólidos en rangos de hasta un 50% en volumen. La fase gas contiene uno o más reactantes, mientras la fase líquida contiene usualmente productos y/o reactantes (o a veces inertes). Las partículas sólidas son típicamente catalizadores. Generalmente, la velocidad superficial del líquido (en el rango de 0 a 2 cm/s) es un orden de magnitud más pequeño que la velocidad superficial del gas (1 a 50 cm/s) [3].

Las columnas de burbujeos ofrecen numerosas ventajas: buenas características de transferencia de calor y masa, sin partes móviles, desgaste reducido, un catalizador de mayor durabilidad, facilidad de operación y bajos costos de mantenimiento y operación. Una de las principales desventajas de estos reactores es la significativa mezcla que ocurre, lo cual puede afectar la conversión del producto. Esta excesiva mezcla puede ser superada modificando el diseño del reactor.

Estos reactores han sido usados en la industria química, petroquímica, bioquímica y farmacéutica para diversos procesos. Ejemplos de tales procesos son la oxidación parcial de etileno a acetaldehído, la oxidación de aire húmedo, la síntesis de la fase líquida de metanol, la hidro conversión de aceites pesados y materias primas para petróleo, cultivos de bacterias y tratamiento de aguas servidas.

2.3.4. Características y tipos de regímenes de flujos

En columnas de burbujeo, se han observado cuatro tipos de patrones de flujo, homogéneo (burbujas), heterogéneo, de pistón y anular. En estos diferentes regímenes de flujo, la interacción de la fase dispersa de gas con la fase continua de líquido, varía considerablemente. Sin embargo, los regímenes burbujeantes homogéneo y heterogéneo son los que se encuentran con más frecuencia. Dependiendo de las condiciones de operación, estos dos regímenes pueden ser separados por un régimen de transición.

El régimen de flujo homogéneo generalmente ocurre a velocidades bajas o moderadas. Se caracteriza por el tamaño pequeño y uniforme de las burbujas, y porque viajan verticalmente con muy poca oscilación transversal o axial. Prácticamente no hay coalescencia ni ruptura de las burbujas, por lo tanto existe una pequeña distribución de tamaño de la burbuja. El gas suspendido es radialmente uniforme. El tamaño de las burbujas depende principalmente de la naturaleza de la distribución del gas y de las propiedades físicas del líquido.

El flujo heterogéneo ocurre a altas velocidades superficiales del gas. Debido a la intensa coalescencia y ruptura de las burbujas, éstas son grandes y pequeñas, lo que lleva a una amplia distribución de tamaño de las burbujas.

Como se puede ver, regímenes homogéneos y heterogéneos tienen características hidrodinámicas completamente diferentes. Tales diferencias resultan en diferentes relaciones de mezclas y de transferencia de calor y masa en estos regímenes de flujo. Por lo tanto, la demarcación de los regímenes se vuelve una importante tarea en el diseño y extensión de tales reactores y han llevado a considerables esfuerzos en investigación, los cuales han resultado en modelos y métodos experimentales para identificar el régimen de transición.

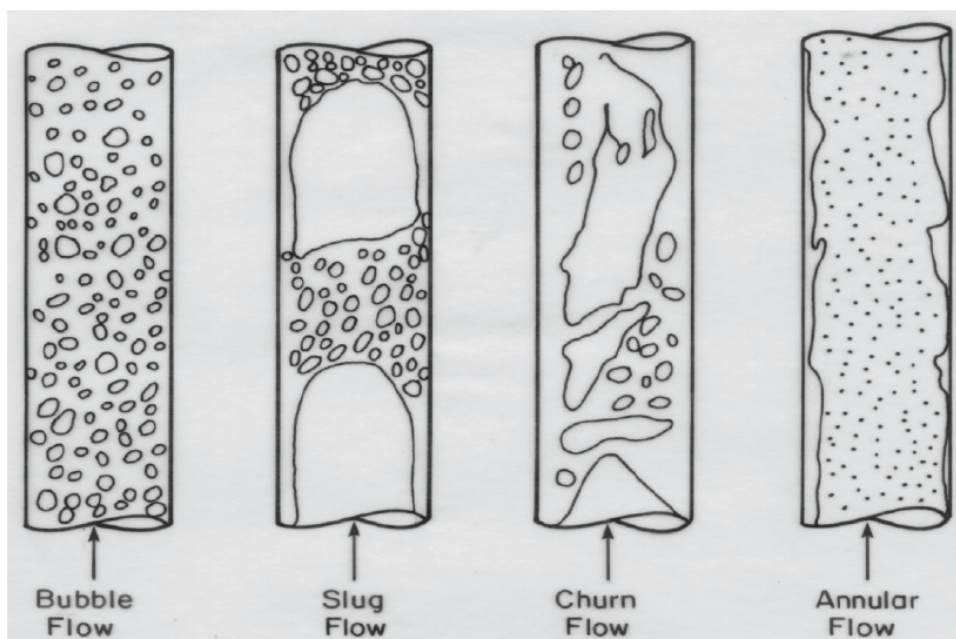


Figura 2.11: Tipos de regímenes de flujo bifásico [3]

La transición del régimen de burbujeante homogéneo a burbujeante heterogéneo o a otro tipo de flujo depende simultáneamente de parámetros tales como la velocidad superficial del gas, el diámetro de la columna, las propiedades de las fases líquida y gas y el diseño del distribuidor. La figura 2.12 muestra uno de los pocos mapas existentes de regímenes de flujo, donde se mide velocidad de transición versus el diámetro de la columna en donde se distingue entre los cuatro tipos de flujo mencionados. Sin embargo, está limitado a los sistemas de baja viscosidad en condiciones ambientales.

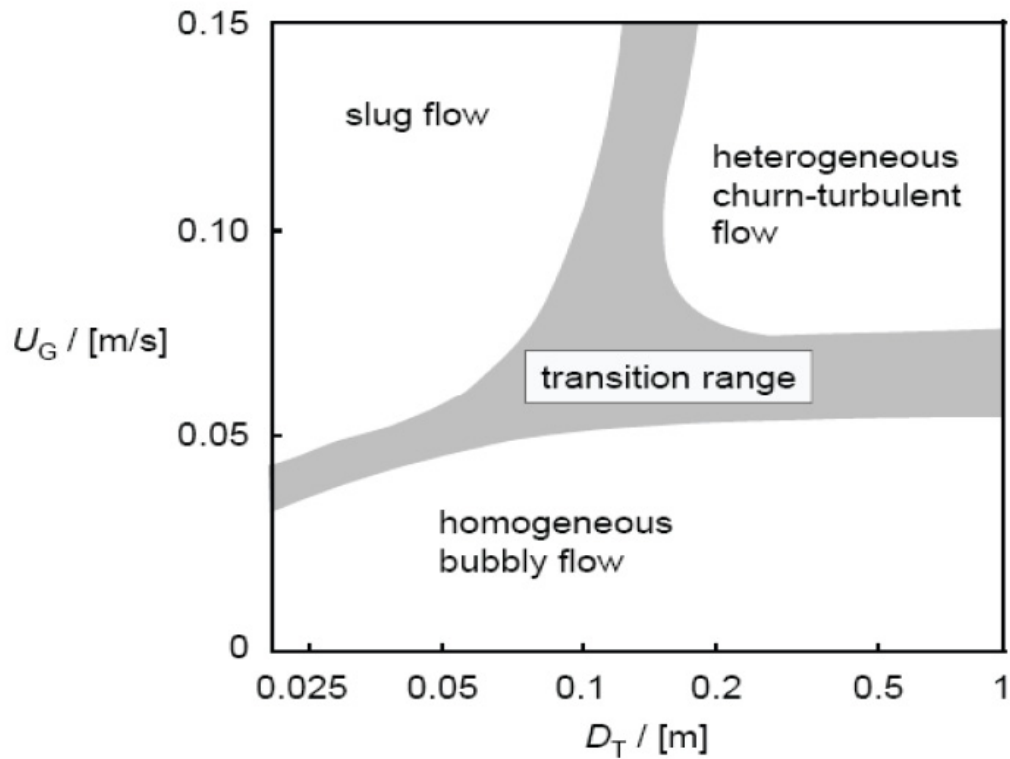


Figura 2.12: Mapa de regímenes de flujo para el sistema aire-agua a temperatura ambiente [3]

Las aplicaciones de la columna de burbujeo pueden ser clasificadas basadas en sus regímenes de flujo. La mayoría de las aplicaciones bioquímicas son desarrolladas en flujo burbujeante. Ejemplos como cultivos de bacterias, producción de proteína celular y tratamiento de aguas servidas. Otros ejemplos tratan de la hidroconversión de aceites pesados. El régimen heterogéneo es preferible para los procesos altamente exotérmicos, tales como la síntesis de la fase líquida de metanol.

2.4. Movimiento de partículas en un fluido

Muchos procesos de separación de partículas de diferentes tamaños y formas dependen de la variación en el comportamiento de las partículas cuando éstas están sujetas a la acción de un fluido en movimiento. Además, muchos de los métodos para la determinación del tamaño de partículas muy pequeñas involucran el movimiento relativo entre las partículas y un fluido.

2.4.1. La fuerza de arrastre de una partícula esférica

Coefficientes de arrastre

La manera más satisfactoria de representar la relación entre la fuerza de arrastre y la velocidad es usando dos grupos adimensionales. El primer grupo es el número de Reynolds de la partícula $Re' (=ud_p\rho/\mu)$, donde ρ es la densidad del fluido, μ es la viscosidad del fluido, d_p es el diámetro de la esfera, y u es la velocidad del fluido relativa a la partícula.

El segundo grupo es $R'/\rho u^2$, donde R' es la fuerza por unidad de área proyectada de la partícula en un plano perpendicular a la dirección del movimiento. En el caso de una esfera el área proyectada es un círculo del mismo diámetro de la esfera.

De este modo:

$$R' = \frac{F}{\frac{\pi d^2}{4}} = \frac{4F}{\pi d^2} \quad (2.22)$$

y

$$\frac{R'}{\rho u^2} = \frac{4F}{\pi d^2 \rho u^2} \quad (2.23)$$

$R'/\rho u^2$ es una forma del coeficiente de arrastre y puede ser nombrado con el símbolo C'_D . Frecuentemente el coeficiente de arrastre C_D es definido como la relación entre R' y $\frac{1}{2}\rho u^2$.

Así:

$$C_D = \frac{2R'}{\rho u^2} = 2C'_D \quad (2.24)$$

De esta manera, cuando la fuerza está dada por la ley de Stokes ($F = 3\pi\mu du$):

$$\frac{R'}{\rho u^2} = 12 \frac{\mu}{ud\rho} = \frac{12}{Re'} \quad (2.25)$$

Sin embargo, esta ecuación es válida para valores muy bajos del número Re' .

Varios trabajos han usado métodos numéricos para resolver las ecuaciones de movimiento para valores más altos del número Re' relativo a partículas esféricas.

La relación entre $R'/\rho u^2$ y Re' está graficada como se muestra en la figura 2.13. Este gráfico se encuentra dividido en 4 regiones. La región (b) es esencialmente la transición entre la zona (a), donde se aplica la ley de Stokes, y la región (c), donde $R'/\rho u^2$ es aproximadamente constante.

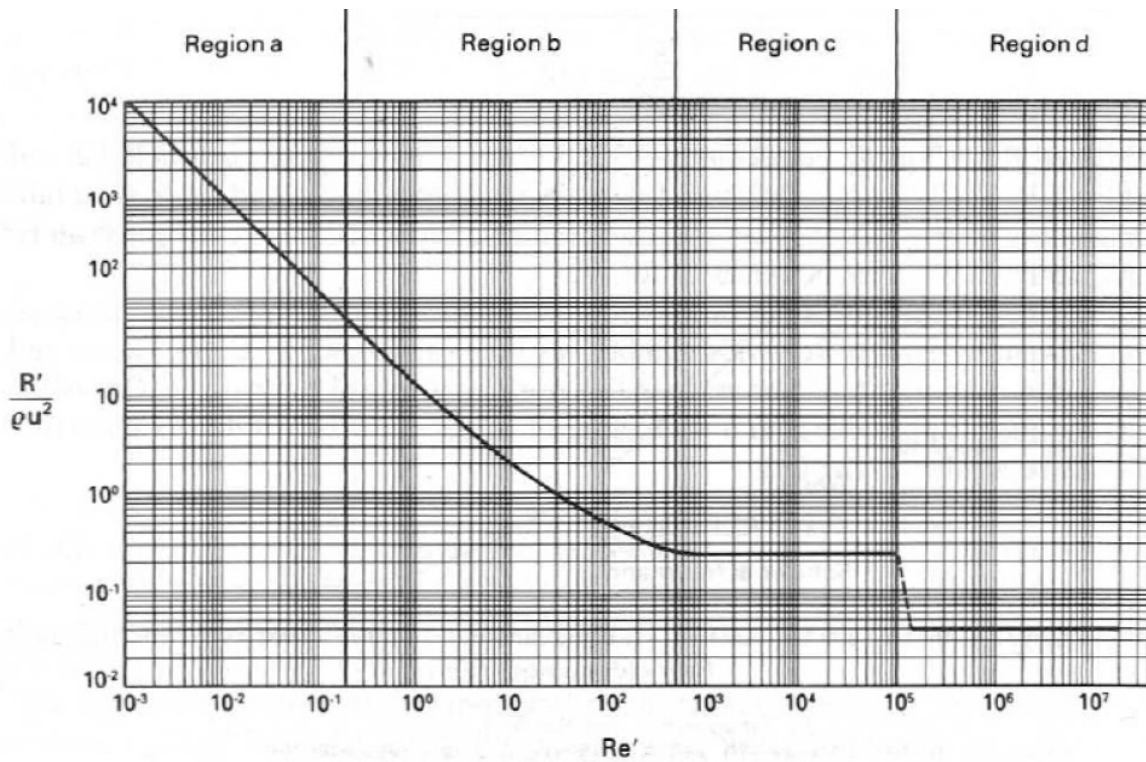


Figura 2.13: Relación de $R'/\rho u^2$ y Re' para partículas esféricas [8]

- Región (a) ($10^{-4} < Re' < 0,2$)

En esta región, la relación está dada por una línea recta de pendiente igual a -1, representada por la ecuación 2.25:

$$\frac{R'}{\rho u^2} = \frac{12}{Re'}$$

- Región (b) ($0,2 < Re' < 500 - 1000$)

En esta zona la pendiente de la curva cambia progresivamente desde -1 a 0 a medida que Re' crece. Varios trabajos han sugerido ecuaciones aproximadas para el flujo en esta región intermedia. Dallavelle [8] propuso que $R'/\rho u^2$ puede ser considerado como dos componentes, uno debido a la ley de Stokes y el otro, como una constante:

$$\frac{R'}{\rho u^2} = \frac{12}{Re'} + 0,22 \quad (2.26)$$

Schiller y Naumann [8] proponen la siguiente ecuación, la cual entrega una aproximación razonable para valores de Re' de hasta 1000:

$$\frac{R'}{\rho u^2} = \frac{12}{Re'} (1 + 0,15 Re'^{0,687}) \quad (2.27)$$

- Región (c) ($500 - 1000 < Re' < 2 \cdot 10^5$)

En esta región, la ley de Newton es aplicable y el valor de $R'/\rho u^2$ es aproximadamente constante:

$$\frac{R'}{\rho u^2} = 0,22 \quad (2.28)$$

- Región (d) ($Re' > 2 \cdot 10^5$)

Cuando Re' excede el valor $2 \cdot 10^5$ el flujo en la capa límite cambia de laminar a turbulento y la separación toma lugar cerca de la parte trasera de la esfera; la fuerza de arrastre decrece considerablemente:

$$\frac{R'}{\rho u^2} = 0,05 \quad (2.29)$$

Fuerza total en una partícula

La fuerza en una partícula esférica puede ser expresada usando las ecuaciones 2.25, 2.27, 2.28 y 2.29 para cada una de las regiones a, b, c y d.

En la región (a):

$$R' = 12\rho u^2 \frac{\mu}{u d \rho} = \frac{12u\mu}{d} \quad (2.30)$$

Como el área proyectada de una partícula es $\frac{\pi d^2}{4}$, la fuerza total de una partícula está dada por:

$$F = \frac{12u\mu}{d} \frac{\pi d^2}{4} = 3\pi\mu d u \quad (2.31)$$

En la región (b), de la ecuación 2.27:

$$R' = \frac{12u\mu}{d}(1 + 0,15Re^{0,687}) \quad (2.32)$$

se obtiene:

$$F = 3\pi\mu ud(1 + 0,15Re^{0,687}) \quad (2.33)$$

En la región (c):

$$R' = 0,22\rho u^2 \quad (2.34)$$

$$F = 0,22\rho u^2 \frac{\pi d^2}{4} = 0,055\pi d^2 \rho u^2 \quad (2.35)$$

En la región (d):

$$R' = 0,05\rho u^2 \quad (2.36)$$

$$F = 0,0125\pi d^2 \rho u^2 \quad (2.37)$$

2.5. Mecanismo de captura de partículas

El método de separación de la mezcla será muy parecido al procedimiento de flotación, donde principalmente dependen las diferencias en las propiedades de las superficies de los materiales involucrados. Si la mezcla de fases corresponde a partículas introducidas a un líquido aireado, éstas van a tender a adherirse preferentemente a una de las dos fases restantes. Dependiendo de que tan fáciles de ser mojadas sean, quedarán atrapadas en el líquido, o subirán a la superficie arrastradas por la burbujas.

El proceso depende de la afinidad del líquido con las partículas. En general, esta afinidad debe ser inducida a través de aditivos, los cuales deben incrementar el ángulo de contacto entre el líquido y el sólido

Para entender lo que implica la mecánica de adsorción de una partícula por la fase líquida es necesario conocer las fuerzas que aparecen debido a la existencia de la frontera líquido-sólido, sólido-gas y líquido-gas.

Aparecen fuerzas debido a las tensiones superficiales, y el concepto de solubilidad (del sólido en el líquido) adquiere importancia.

Las fuerzas de tensión superficial, pueden hacer que el líquido moje o no a las partículas sólidas, es decir, que el líquido absorba a las partículas, o que por el contrario las rechace.

2.5.1. Tensión superficial y ángulo de contacto

Cuando aire y agua entran en contacto, en general, quedan separados por una delgada capa llamada interfaz. En el caso de una partícula sólida que se encuentra en la interfaz, se generan tensiones producto de la interacción entre las tres fases.

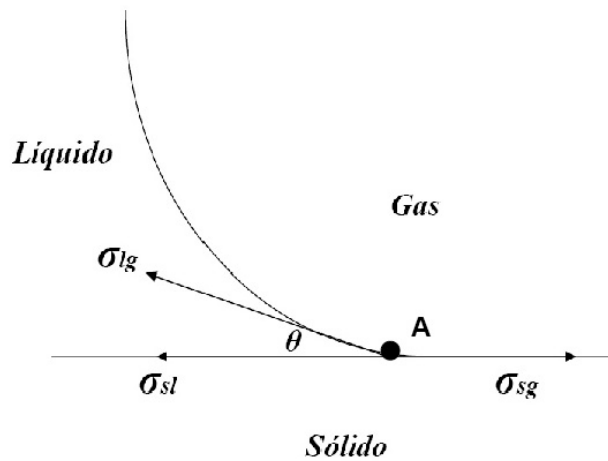


Figura 2.14: Definición del ángulo de contacto [9]

Este punto de contacto entre las tres fases puede ser desplazado para incrementar la interfaz sólido-gas en perjuicio de la interfaz sólido-líquido. Como se aprecia en la figura 2.14, el punto de contacto (A) está sometido a fuerzas producto de las tensiones superficiales y se puede denotar el punto de equilibrio como:

$$\sigma_{lg} \cos \theta = \sigma_{sg} - \sigma_{sl} \quad (2.38)$$

donde σ_{lg} es la tensión superficial de la interfaz líquido-gas; σ_{sg} es la tensión superficial sólido-gas; σ_{sl} es la tensión superficial de la interfaz sólido-líquido, y θ es el ángulo de contacto.

En algunos casos no es posible encontrar equilibrio en el punto de contacto. Esto ocurre cuando:

$$\sigma_{sg} > \sigma_{lg} + \sigma_{sl} \quad (2.39)$$

donde no existe un valor de θ que satisfaga la ecuación 2.38, y donde el punto A se desplaza infinitamente hacia la derecha en la figura 2.14 para que el líquido cubra completamente la superficie del sólido: se dice que el sólido es mojado perfectamente por el líquido; o, alternativamente,

$$\sigma_{sl} > \sigma_{lg} + \sigma_{sg} \quad (2.40)$$

en cuyo caso la superficie líquido-sólido es despalzada completamente y el punto A se mueve infinitamente hacia la izquierda en la figura 2.14: en este caso se dice que el líquido no moja al sólido.

2.5.2. Fuerzas sobre una partícula en la interfaz líquido-gas

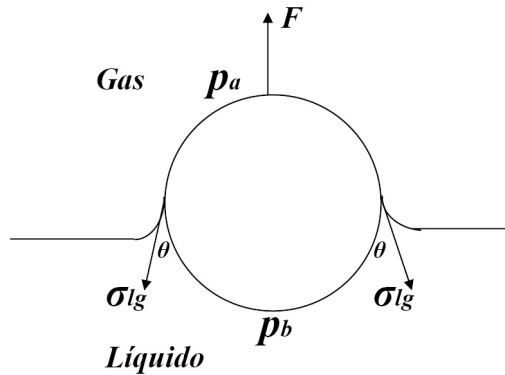


Figura 2.15: Fuerzas sobre una esfera ubicada en la interfaz líquido-gas [9]

Una partícula esférica que se encuentra en la interfaz entre un gas y un líquido, como se aprecia en la figura 2.15, por lo que ésta se encuentra parcialmente mojada. Si suponemos que la partícula se encuentra en equilibrio en la interfaz, las fuerzas que actúan sobre ella son el peso, la tensión superficial del líquido sobre la línea de contacto con el sólido. Si el perímetro de la partícula es P y la sección transversal de ésta es S , entonces:

$$F + S(p_b - p_a) - P\sigma_{lg}\cos\theta - mg = 0 \quad (2.41)$$

Donde p_b y p_a corresponden a las presiones hidrostáticas por debajo y sobre la partícula y F es la fuerza de arrastre que la fase gaseosa ejerce sobre ella.

Capítulo 3

Diseño

El diseño del equipo se basa principalmente en las características de la cámara principal, donde se produciría la reacción de intercambio de partículas desde la fase gaseosa a la fase líquida. A partir de esto, se decidirá los demás componentes que conforman el resto del equipo.

3.1. Parámetros de diseño

3.1.1. Simplicidad

El equipo propuesto es de fácil construcción ya que no requiere de componentes muy sofisticados y pueden ser encontrados en el país. Sus partes principales constituyen, un conducto para succionar aire ambiente y otro para descargarlo, dos ventiladores con sus respectivos motores, uno que produzca la succión y otro para la descarga, un estanque cilíndrico con perforaciones en su base, toberas o válvulas para la inyección de aire, filtros, agua más aditivos, y soportes para la estructura.

3.1.2. Capacidad

Este equipo está diseñado para tratar un flujo de aire cuya velocidad es relativamente baja, siendo capaz de proporcionar aire limpio a un sector acotado del ambiente, cubriendo aproximadamente un volumen desde los 27 $[m^3]$ (3x3x3) a los 90 $[m^3]$ (9x9x9), durante una hora. Esto último va a depender del tamaño de los agujeros y de que tan juntos se encuentren.

3.1.3. Ambientes externos

El equipo está pensado para lavar aire en ambientes externos. Es decir, toma aire sucio que se produzca en una dirección y, luego de ser tratado, lo descarga en otra. Algunas aplicaciones pueden ser: tomar aire de la calle y luego inyectarlo a la cancha de un estadio o al patio de una escuela; también podría capturar las emisiones directamente cuando se producen, a un costado de una carretera y descargarlo limpio hacia la calzada peatonal, etc.

3.1.4. Dimensiones

Como el equipo se encontrará funcionando en la calle, no debe ocupar un espacio exageradamente grande, de manera que signifique molestias para los transeúntes. El equipo está pensado en dimensiones de aproximadamente de 2 [m] x 2 [m] x 2 [m], algo muy parecido a un kiosco pequeño.

3.2. Descripción

El equipo que se propone en esta memoria está orientado a ser capaz de atrapar partículas de tamaño de 10 [μm] y menores, que se encuentren suspendidas en el ambiente.

El aparato consiste en un reactor conformado por tres cámaras, cuyo funcionamiento se basa en principios de fluidodinámica bifásica.

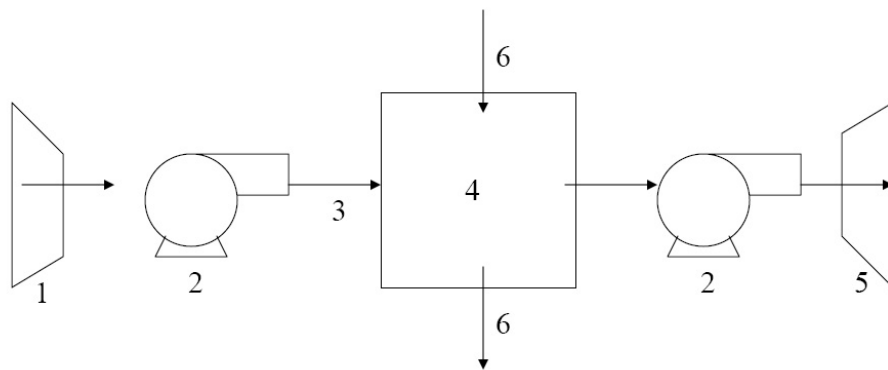


Figura 3.1: Diagrama de flujos del equipo para lavado de aire

El diagrama de flujo muestra las etapas del paso del aire y son las siguientes:

1. Entrada para aire ambiente

2. Ventiladores para aspiración y descarga
3. Inyección de aire a la cámara principal
4. Cámara principal (baño por burbujeo y filtrado)
5. Salida del aire tratado
6. Carga y descarga de la solución acuosa

3.2.1. Entrada de aire ambiente

En la primera cámara se lleva a cabo el ingreso del aire contaminado a través de un conducto, cuya sección transversal es circular de diámetro 35 [cm], el cual es dirigido al sector desde donde se quiere capturar el aire. La aspiración se lleva a cabo a través de un ventilador que se encuentra en el interior del ventilador.

La velocidad del flujo de aire que ingresa al ducto es de 5 [cm/s], para inyectarlo a la cámara se necesita una potencia 56 [W]. El caudal de aire es dirigido hacia la segunda cámara, donde ingresa a través de perforaciones o toberas disponibles en la base de dicha cámara.

Algunas características del ventilador necesario son:

Tabla 3.1: Características del ventilador [14]

Caudal [m^3/h]	2100
RPM	2870
Potencia [W]	60
ϕ [cm]	35



Figura 3.2: Ventilador monofásico, voltaje 230, 50 Hz [14]

3.2.2. Cámara de reacción

Esta cámara consiste en un cilindro de 1 [m] de diámetro por 1 [m] de altura. En la base de este cilindro existen 1900 perforaciones que permiten el ingreso del aire. Estas perforaciones corresponden a círculos de 10 [mm] de diámetro, separados por una distancia de 2 [cm] desde sus centros.

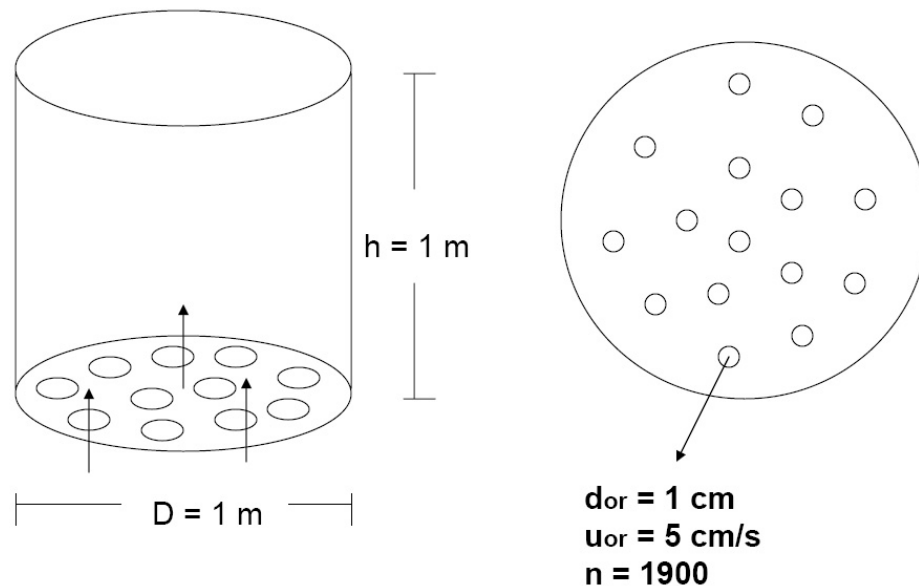


Figura 3.3: Dimensiones de la cámara principal

En esta cámara se encuentra una solución acuosa que hace contacto con el aire que ingresa. Al ingresar se forman burbujas cargadas de material particulado. Las partículas que se encuentren en la interfaz de la burbuja hacen contacto con el líquido. Este líquido debe tener la característica de buena solubilidad hacia las partículas con las que haga contacto, separándolas de la burbuja mientras ésta asciende, atravesando la

cámara.

Esta cámara, además, debe contar con un conducto de entrada para el llenado del líquido y una salida para la evacuación de este mismo.

3.2.3. Filtros

Luego que las burbujas ascienden y el aire aspirado abandona la solución acuosa, éste se debe enfrentar a una última etapa de filtrado antes de ser descargado de vuelta al ambiente.

Este filtro puede ser una malla o tela que sea capaz de detener el paso de las partículas que no fueron atrapadas por el baño. Otra opción puede ser elementos de empaquetamiento que además de interferir en el flujo de aire, son capaces de retener la humedad que éste lleva, además de tener características adsorbentes para la retención de contaminantes gaseosos.

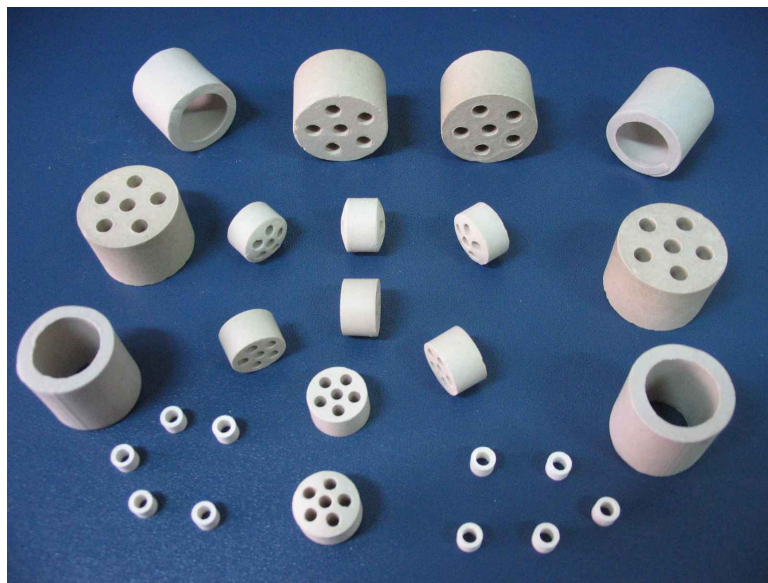


Figura 3.4: Anillos de empaquetamiento para torres scrubbers

3.2.4. Descarga de aire tratado

El flujo de aire abandona la cámara principal, para ingresar a una tercera cámara, donde es arrastrado gracias a un segundo ventilador y luego conducido hacia el exterior. El conducto de salida del aire tiene una sección transversal de diámetro 35 [cm], al igual que en la entrada.

3.3. Aditivos

Por las características de este equipo, para la captura de material particulado, se recomienda que los aditivos sean capaces de romper la interfaz de la burbuja, además de tener buena solubilidad, afinidad con componentes hidrofóbicos, dispersión de partículas sólidas en la solución, evitar la redeposición de la suciedad y captura de algunos metales tóxicos.

A continuación se enumeran algunos aditivos útiles, tomados de la tabla 2.4 para el tratamiento de aire contaminado en el equipo propuesto:

- Agentes tensoactivos: Sales de Na, K, Amonio
- Aceites: Parafinas aceites naturales
- Agentes secuestradores: Edetato de calcio disódico (CaNa₂EDTA)
- Compuestos poliméricos: Glicerol
- Detergentes

3.4. Esquema del equipo

En resumen, el equipo esta constituido de las siguientes partes:

1. Conducto para entrada del aire
2. Ventilador de aspiración
3. Perforaciones para ingreso del aire a cámara principal
4. Solución acuosa para lavado de aire, dentro de cámara principal
5. Filtros
6. Ventilador de descarga
7. Conducto de salida del aire
8. Entrada a la cámara principal para la solución acuosa
9. Salida para la descarga de la solución

A continuación se muestra un esquema primario del equipo propuesto.

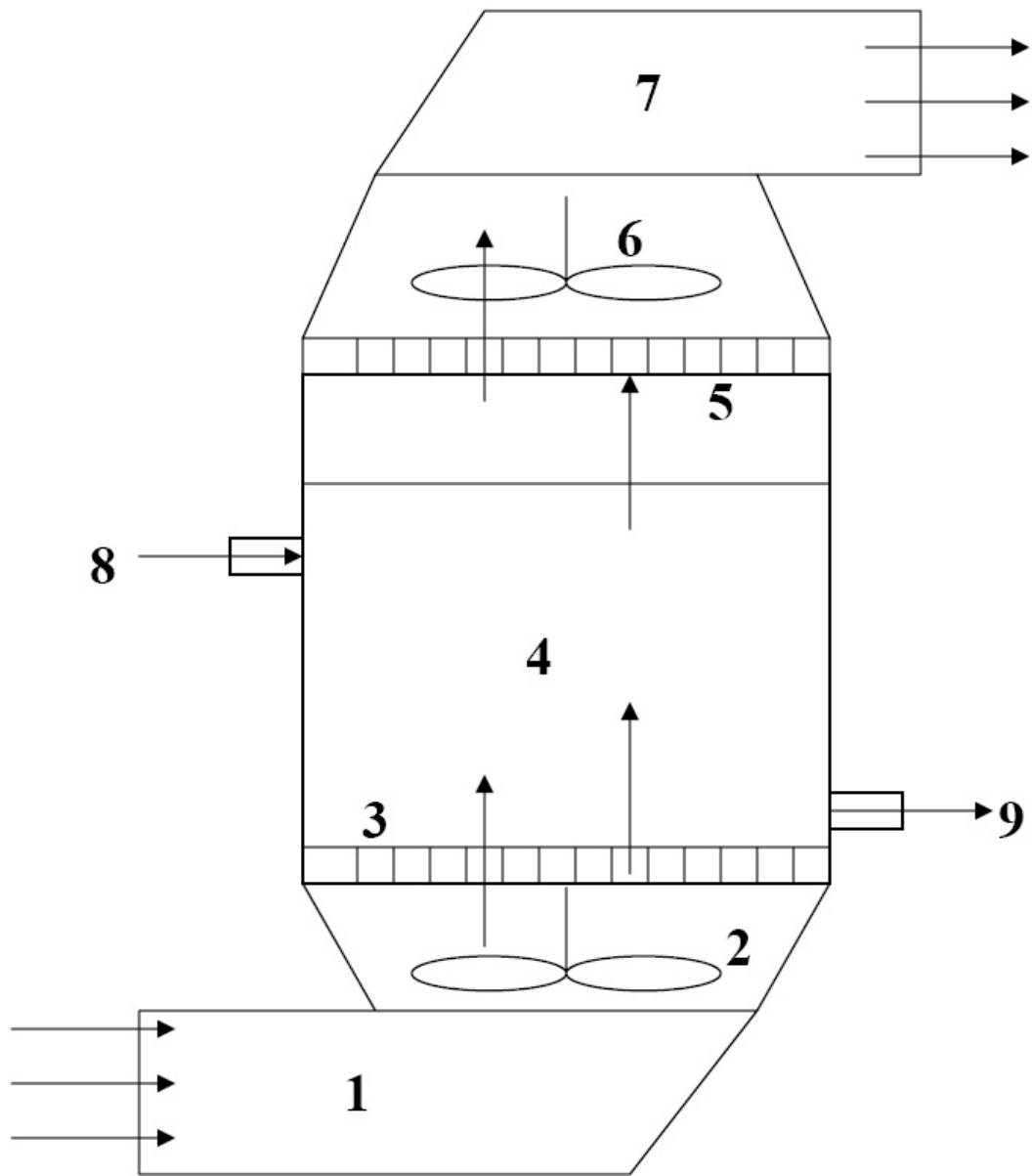


Figura 3.5: Esquema del diseño del equipo para lavado de gases contaminados con material particulado en suspensión

Capítulo 4

Memoria de cálculo

4.1. Propiedades de las especies

Las especies utilizadas para la primera aproximación del equipo son agua como fase primaria más aire y partículas como fase secundaria, las tres a temperatura ambiente, cuyas propiedades físicas se detallan en la tabla 4.1.

Tabla 4.1: Propiedades de las especies utilizadas [7]

	Densidad [kg/m ³]	Viscosidad [kg/m-s]	Tensión superficial [N/m]
Aire	1,225	$1,789 \cdot 10^{-5}$	-
Agua	998,2	$1,003 \cdot 10^{-3}$	0,0728
Carbón polvo	2000	$1 \cdot 10^{-5}$	-

4.2. Dimensiones

Para las dimensiones de la cámara principal, se ha tomado en cuenta los mapas de regímenes de la figura 2.12, en donde se tienen el diámetro del estanque y la velocidad de inyección de aire necesarios para obtener burbujas discretas.

Desde aquí, los datos de entrada son los siguientes:

$$D_t = 1 [m]$$

$$u_{or} = 5 [cm/s]$$

Además, según lo investigado en [13], se sabe que los agujeros de entrada del aire para equipos wet scrubbers, son de entre 3 a 15 [mm]. Para este caso:

$$d_{or} = 10 [mm]$$

Estas variables deben garantizar que el equipo cumple con dos características fundamentales en su operación, las cuales son, la obtención de burbujas pequeñas y evitar la formación de chorros.

4.3. Definición del volumen a limpiar

Partiendo con los datos de entrada que se han mantenido fijos (diámetro del estanque y la velocidad de inyección), se desea conocer cual es el posible volumen a limpiar, dadas las dimensiones del equipo.

El caudal a limpiar va a depender del tamaño de las perforaciones, del número de éstas y de la distancia que exista entre ellas. A una velocidad de inyección constante, mientras más grande y más cercanos se encuentren los agujeros, mayor será el caudal que pase. Por otro lado, si los agujeros son más pequeños, es posible tener una mayor cantidad de éstos en la base del estanque.

A continuación, se tiene la relación entre el tamaño de las perforaciones en la base del estanque y el caudal que pasa a través de ellas, suponiendo que se encuentran separadas a una distancia muy cercana, de 1 [mm] entre ellas.

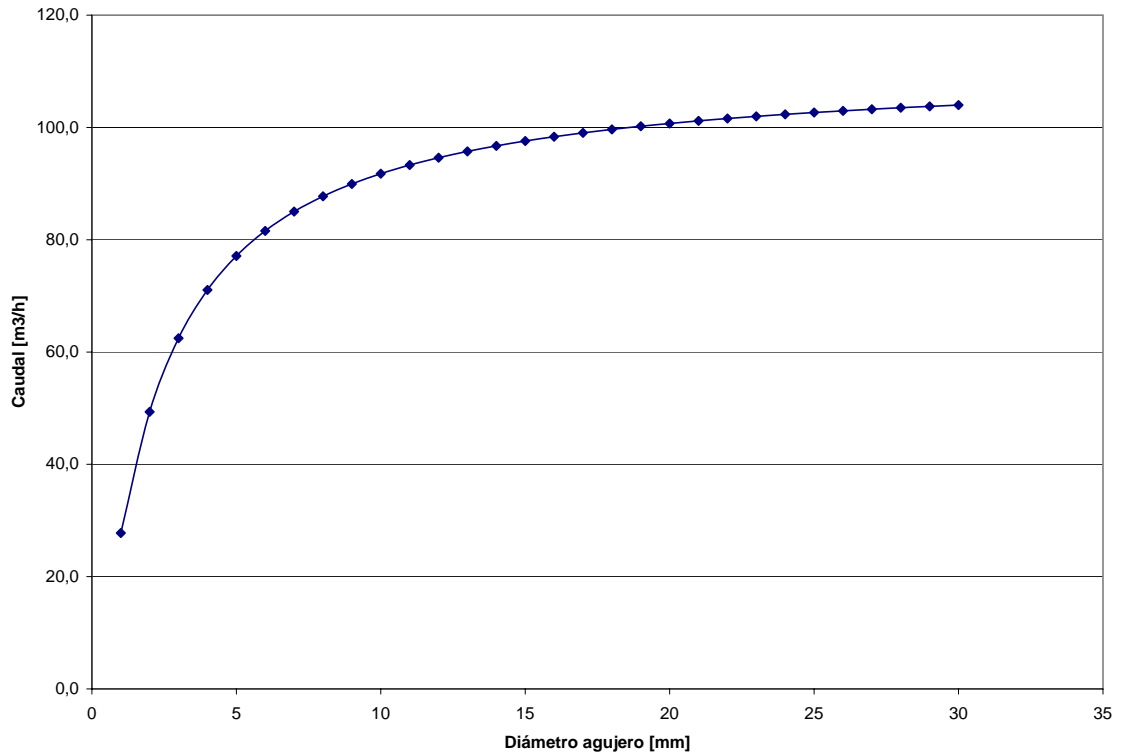


Figura 4.1: Relación del volumen a tratar vs el tamaño de los agujeros

Para un agujero de tamaño entre 1 y 30 [mm], se alcanza un caudal entre los 27 y 106 [m³/h]. A pesar de que el rango es amplio, no significa un cambio drástico en el régimen de burbujas que se desea, lo que se aprecia en la figura 2.9, donde los números Re_{bl} y Eo_{bl} que se obtienen ubican al fenómeno en la misma región.

Para agujeros de tamaño 1 [mm], los números relevantes resultantes son:

$$Re_{bl} = 849$$

$$Eo_{bl} = 1,56$$

Para el caso de un agujero de 30 [mm], los números resultantes son:

$$Re_{bl} = 3607$$

$$Eo_{bl} = 28,21$$

Valores que, en ambos casos, ubican a la burbuja dentro de la región de burbujas elipsoidales tambaleantes (wobbling), en la figura 2.9.

4.4. Tamaño de las burbujas

En la sección 2.3 se introdujeron las ecuaciones que predicen el tamaño de las burbujas según el caudal de inyección y las propiedades físicas de las especies. Como la única geometría usada es un cilindro con el líquido, el cual tiene orificios en la base por el cual es inyectada la fase gaseosa, no existe un volumen de cámara o más bien su valor es nulo, por lo tanto el número de capacitancia adimensional en la ecuación 2.6 es cero, lo que indica una condición de flujo constante, es decir, es correcto imponer una velocidad de inyección como condición de borde.

Para esto se necesita conocer el caudal de transición de la ecuación 2.7, el cual para un diámetro de orificio de 1 [cm] y un $Re_{bl} = 1829$, toma el valor de:

$$Q_T = 6,08 \cdot 10^{-6} [m^3/s]$$

y como el gas es inyectado con una velocidad de 5 [cm/s] ($u_{or}=0,05$ [m/s]), el caudal de transición es un poco más alto que el caudal de inyección, cuyo valor es

$$Q_T > Q = 3,93 \cdot 10^{-6} [m^3/s]$$

entonces la generación de burbujas es con un caudal de inyección bajo, y corresponde utilizar la ecuación 2.11, la cual entrega un diámetro equivalente de burbuja esperado de

$$d_{bl} = 7,35 [mm]$$

4.5. Formación de chorros

Para evitar la formación de chorros se debe cumplir la condición de la ecuación 2.21, cuyo valor, para el sistema aire agua corresponde a

$$We_{bl} \leq 300$$

lo que para las condiciones de este caso en particular

$$We_{bl} = 6 \leq 300$$

4.6. Arrastre de las partículas

De acuerdo a la sección 2.4 se puede conocer la fuerza a la que una partícula esférica es arrastrada por una corriente de aire. Primero se debe conocer el número de Reynolds de la partícula Re' , el cual se obtiene con los siguientes parámetros:

la densidad del aire,

$$\rho = 1,225 \text{ [kg/m}^3\text{]}$$

la viscosidad del fluido,

$$\mu = 1,789 \cdot 10^{-5} \text{ [kg/m-s]}$$

la velocidad del fluido,

$$u_{or} = 0,05 \text{ [m/s]}$$

el diámetro de la partícula esférica

$$d_p = 10 \text{ [\mu m]} = 10^{-5} \text{ [m]}$$

Por lo tanto:

$$Re' = 3,42 \cdot 10^{-2}$$

Como el número Re' nos ubica en la región (a) de la figura 2.13, se puede usar la expresión 2.25 para calcular el coeficiente de arrastre C'_D ,

$$C'_D = 350,5$$

Y la fuerza de arrastre, de la ecuación 2.31 es:

$$F_D = 8,43 \cdot 10^{-11} [N]$$

Ahora, si se realiza un balance de fuerzas como el de la figura 2.15, suponiendo que la parte de la partícula que está en contacto con el aire se encuentra a presión atmosférica y ésta se encuentra sumergida hasta la mitad, la diferencia de presión que actúa sobre la partícula es

$$p_b - p_a = 4,9 \cdot 10^{-2} [Pa]$$

El área proyectada de la esfera es

$$S = \frac{\pi d_p^2}{4} = 7,85 \cdot 10^{-11} [m^2]$$

y el perímetro

$$P = \pi d_p = 3,14 \cdot 10^{-5} [m]$$

Finalmente, el balance de fuerza queda de acuerdo a la ecuación 2.41 para distintos valores del ángulo θ

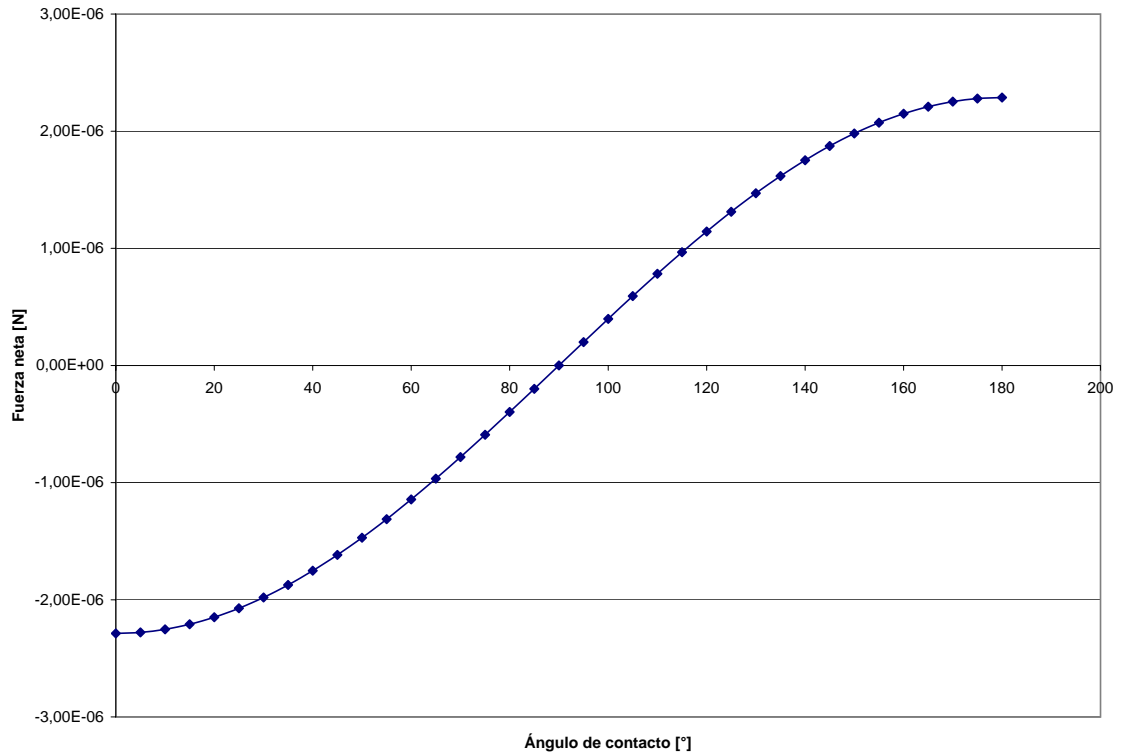


Figura 4.2: Fuerzas sobre una esfera ubicada en la interfaz para distintos valores de θ

lo que implica que para valores de $\theta \geq 90^\circ$ la partícula es atraída hacia la parte gaseosa de la interfaz, y en caso contrario, hacia la parte líquida.

4.7. Potencia requerida

Para saber la potencia requerida por el ventilador para la aspiración del aire ambiente, primero se requiere conocer el alza de presión para inyectarlo a la cámara principal con el caudal requerido, el cual es

$$Q_{total} = 0,0077 [m^3/s] = 7,7 [lt/s]$$

Este caudal corresponde a la suma de todas las perforaciones por donde entra el aire. Entonces, el alza de

presión se obtiene de acuerdo a la siguiente ecuación, la cual se obtuvo aplicando la ecuación de Bernoulli a la entrada y salida del equipo mostrado en la figura 3.5:

$$p = (p_{des} - p_{as}) + \frac{\rho_{aire}}{2} (u_{des}^2 - u_{as}^2) \quad (4.1)$$

donde p_{des} y u_{des} es la presión y la velocidad de descarga y p_{as} y u_{as} es la presión y la velocidad de aspiración. Cabe mencionar que la ecuación mencionada consta de dos términos, uno corresponde a la presión estática y el otro corresponde a la presión dinámica.

La presión p_{as} corresponde a la presión atmosférica, por lo tanto el valor de u_{as} es cero. Se sabe que el valor de u_{des} es el mismo que u_{or} (0,05 [m/s]). p_{des} corresponde a la presión en el punto de inyección a la cámara principal y corresponde a la presión hidrostática del agua en el interior del estanque, cuya altura es de 0,7 [m]. Por lo tanto:

$$p_d = \rho_{agua}gh = 6860 [Pa]$$

Entonces el alza de presión es de acuerdo a 4.1 es:

$$p = 0,007 + 6860 = 6860 [Pa]$$

La potencia necesaria para levantar dicha presión por sobre la atmosférica es:

$$P = \eta_{motor} p Q_{total} \quad (4.2)$$

Suponiendo una eficiencia de motor de 0,95, se tiene:

$$P = 56 [W] = 0,075 [HP]$$

Capítulo 5

Simulación

5.1. Problema

5.1.1. Geometría

El lugar geométrico donde se llevarán a cabo las simulaciones es una parte del estanque cilíndrico descrito en la sección 3.2.2. Este dominio trata de un paralelepípedo cuya base es cuadrado de 7 [cm] x 7 [cm] y su altura es de 1 [m]. En la base se ubican 9 círculos de 1 [cm] de diámetro, separados por 2 [cm] entre sus centros, en un arreglo de 3 x 3, como se aprecia en la figura 5.1.

A través de los agujeros ubicados en la base del paralelepípedo, se hace ingresar aire a una velocidad de 5 [cm/s]. Inicialmente el volumen no está lleno con agua hasta su parte superior, si no que hasta un 70% de él. La fase sólida es inyectada junto con el aire y corresponde a partículas esféricas de carbón, cuyo tamaño será de 10 [μm] de diámetro, con una concentración de 330 [$\mu\text{g}/\text{m}^3$].

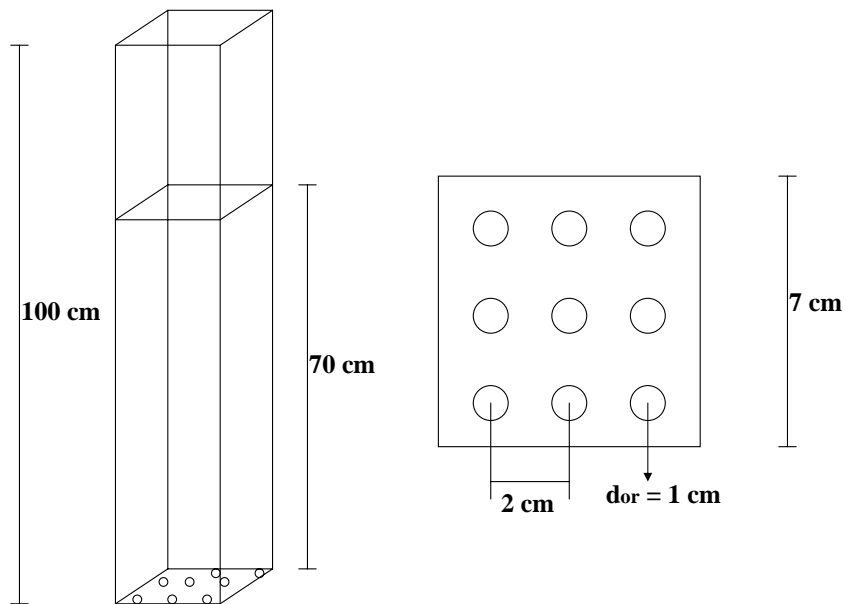


Figura 5.1: Geometría del dominio a simular

Según lo expuesto en antecedentes, la geometría de las burbujas está ligada a los números adimensionales citados en la sección 2.3, y al estar definidos los fluidos que participarán en la simulación, como así también las condiciones a las cuales están sometidos, es decir: la presión, temperatura, y especies dadas, se mantendrán constantes las densidades del medio líquido y gaseoso, la viscosidad y la tensión superficial del fluido también permanecerán, junto con el diámetro del orificio y la velocidad de inyección.

5.2. Metodología

Las simulaciones se llevaron a cabo utilizando un programa comercial específico para estos fines. El programa ocupado fue FLUENT v6.3, el que fue montado localmente en los computadores en los cuales se corrieron las simulaciones.

Los computadores en los cuales se efectuaron las simulaciones tienen un procesador Pentium IV de 3,2 [GHz] de velocidad. Al ser FLUENT un programa que se ejecuta bajo el ambiente LINUX, la distribución de aquel sistema operativo es Ubuntu.

5.2.1. Malla

El mallado del paralelepípedo está distribuido en varias zonas. Los elementos corresponden a paralelógramos y paralelepípedos y se ha mallado mas fino en las partes donde interesa conocer el fenómeno, como en los círculos de la base y a partir de esa malla se ha adecuado la cantidad de elementos a las demás zonas como se aprecia en la figura 5.2. Lo primordial es que varios elementos quepan en el volumen de una burbuja.

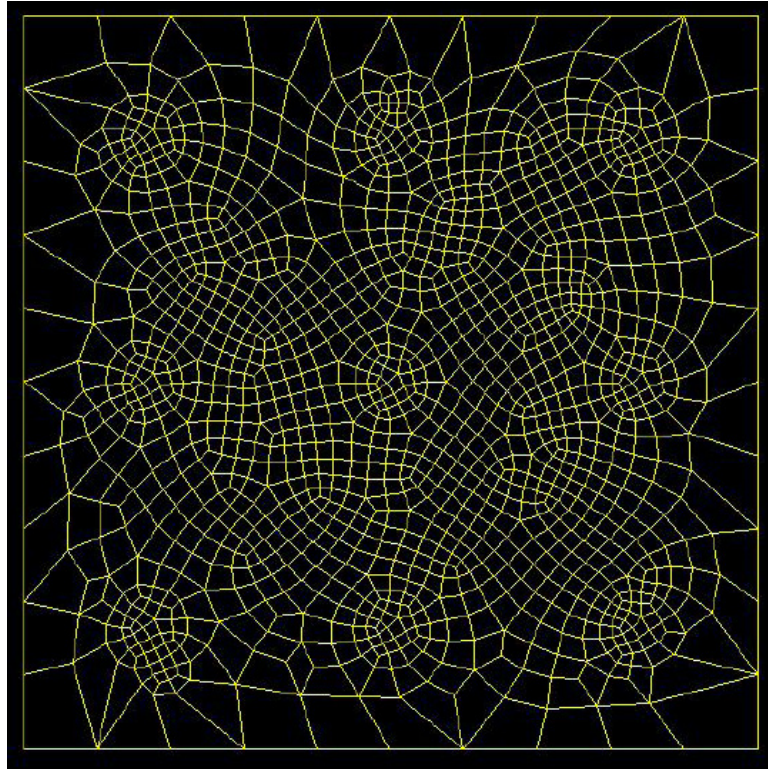


Figura 5.2: Mallado en los agujeros y la base

Además de tener una cantidad de elementos necesaria para caracterizar el fenómeno, también se ha considerado trabajar con una cantidad de elementos no tan grande, de manera que los tiempos de cálculo no sean demasiado extendidos. A continuación se muestra la cantidad de elementos de la malla para cada zona:

Tabla 5.1: Datos del mallado

Zona	Cantidad de elementos	Tamaño promedio [mm]
Agujeros	288 (32 c/u)	1,5
Base	1027	2,2
Tapa	1315	2
Lados	32000 (8000 c/u)	3
Interior	1052000	2
Total	1086630	2

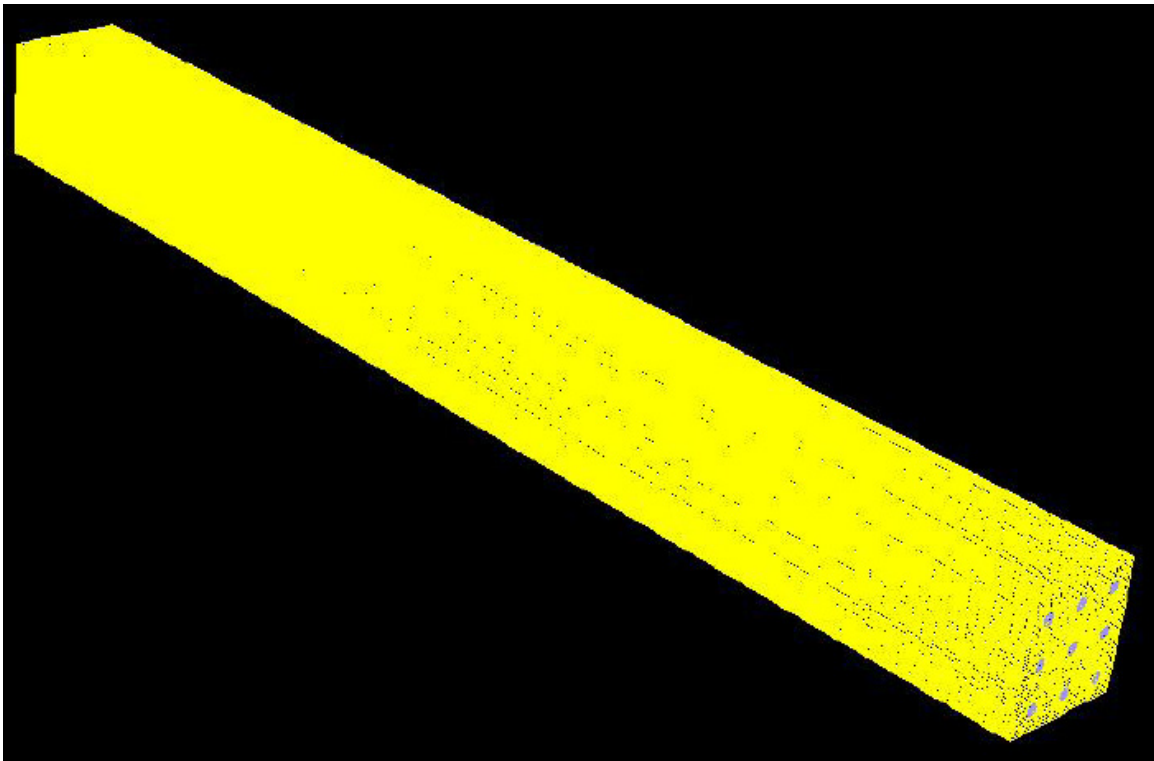


Figura 5.3: Mallado de la geometría completa

5.2.2. Condiciones de borde

Las simulaciones se efectúan en un volumen que consta de una fracción del volumen total del equipo descrito en 3.2.2, de modo que hay que considerar esto para imponer las condiciones del problema.

Se impusieron condiciones en distintas zonas de la geometría de la figura 5.1. La idea es modelar un

paralelepípedo de agua a presión atmosférica, para que parezca un corte del estanque completo. En la tabla a continuación se resumen:

Tabla 5.2: Condiciones de borde

Zona	Condición de borde
Agujeros	Velocidad de entrada
Base	Pared
Tapa	Presión de salida
Lados	Simetría
Interior	Fluido

Tanto el mallado como las condiciones de borde fueron realizadas en el programa GAMBIT.

5.2.3. Implementación en FLUENT

Se trabajará de acuerdo a la implementación en 3D con doble precisión. Una vez construida la malla y planteadas las condiciones de borde, se cargan estos datos en el programa FLUENT. Posteriormente se debe escalar la malla cargada a las unidades con las que se quiera trabajar. En este caso las unidades se transformaron de [mm] a [m].

Definición del solver

El método de solución es el de solución segregada, en donde las ecuaciones gobernantes son resueltas secuencialmente, porque no son lineales y están acopladas, por lo cual se debe efectuar un ciclo con muchas iteraciones de la solución antes de converger a la solución final. Para este caso, el método de solución es el que viene por defecto, que es el basado en el gradiente de presión.

Las ecuaciones gobernantes no lineales se linealizan para producir un sistema de ecuaciones para las variables dependientes en cada celda computacional. El sistema linear resultante se resuelve para entregar una actualización de la solución del campo de flujo. La manera en que las ecuaciones gobernantes son linealizadas pueden tomar la forma explícita o implícita con respecto a la o las variables de interés. Para este caso la formulación es implícita.

Finalmente se escoge la opción para régimen no estacionario, ya que se necesita la parte de la ecuación que depende del tiempo para la caracterización del fenómeno.

Definición de modelos

Para trabajar con más de una fase, se selecciona el modelo de multifase. En la ventana que aparece se dan varias opciones de modelos multifásicos. En este caso se trabajará con el modelo Mixture, para el modelamiento del material particulado y el modelo Volume of Fluid (VOF) para el modelamiento del régimen de burbujas. En ambos casos se selecciona el número de fases, en este caso tres. Luego se activa la opción de Implicit Body Force y la ecuación de velocidad relativa para el modelo Mixture.

Definición de las especies

Para definir las especies, se ha seleccionado, desde la base de datos de FLUENT, aire, el cual viene por defecto. Además se cargan los elementos a incluir, agua y carbón sólido. Estas especies vienen también con todas sus propiedades implícitas, es decir, su densidad, viscosidad, etc.

Definición de las fases

Una vez definidos la cantidad de fases y la especie que las componen, se debe definir que rol cumple cada una. En el panel de Fases, se define la fase primaria, en este caso, se ha seleccionado aire; como fases secundarias se tiene al agua y al carbón.

Además, se debe definir las características de las fases secundarias, ya que se da la opción de definir un tamaño determinado para estas fases. Para modelar el polvo que se quiere inyectar, al carbón se selecciona para que sea granular, además se selecciona el tamaño de las partículas, las cuales son de $1 \cdot 10^{-5}$ [m] para el caso a simular.

En este paso, también está la opción de especificar la interacción entre cada una de las fases secundarias con la fase primaria. Para el caso de fuerzas de arrastre polvo-aire, se ha seleccionado como forma de cálculo, el desarrollo propuesto por Schiller-Naumann; y para el caso agua aire, ninguno. Para el caso de la velocidad relativa entre las especies, se ha seleccionado el desarrollo de Manninen et. al., para los casos polvo-aire y agua-aire.

Definición de condiciones de operación

Este paso corresponde a la especificación de las condiciones de presión y otras fuerzas. En este caso, se trabajará con las condiciones de presión que el programa entrega por defecto, la que corresponde a la presión atmosférica. Además se activa la gravedad y se setea para la coordenada Z con $-9,8$ [m/s^2].

Definición de las condiciones de borde

Las condiciones de borde que deben especificarse, son las de la entrada del aire y a la salida del flujo, ya que se requieren parámetros numéricos para éstas. El resto de las condiciones de borde ya vienen implícitas y no es necesario caracterizarlas con un valor numérico, es decir, la condición de simetría y de pared.

Las condiciones de borde para la salida se definen para la mezcla de las fases y para las fases secundarias. Para la mezcla hay que setear la presión y como viene por defecto a presión atmosférica, se deja tal cual. Para las fases secundarias, es decir, agua y polvo, se debe indicar la fracción de volumen que retorna al dominio; como no se quiere que arriba se encuentren estas fases, se setean ambas como 0. Esto quiere decir que en el borde de arriba sólo se encuentra aire, ya que la suma de las fracciones de las fases deben sumar la unidad.

Para las condiciones a la entrada, sólo es necesario indicar valores para las tres fases con respecto a la velocidad de entrada y a la fracción de volumen que participa en esa zona. Para el agua, se ha puesto una velocidad y una fracción de volumen nula, mientras que para la fase polvo se ha puesto una velocidad de 0,05 [m/s] y una fracción de volumen de $1,65 \cdot 10^{-4}$, que corresponde a la concentración de material particulado en condiciones de emergencia crítica. Finalmente para el aire se impone una velocidad también de 0,05 [m/s]. Por defecto, la fracción de volumen correspondiente es lo que resta para sumar la unidad.

Resolución

FLUENT provee la opción de elegir entre tres algoritmos de acoplamiento de presiones y velocidad: PISO, SIMPLE, SIMPLEC. Se utilizó el algoritmo SIMPLEC para el acoplamiento en las simulaciones efectuadas.

Para la interpolación de presión, FLUENT interpola por defecto los valores de presión en las caras utilizando los coeficientes de la ecuación de momentum. En los casos simulados se utilizó el esquema PRESTO!

Para la discretización de momentum, FLUENT integra las ecuaciones gobernantes alrededor de cada volumen de control, entregando ecuaciones discretas que conserven cada cantidad basada en un volumen de control. En las simulaciones realizadas en el presente trabajo el esquema utilizado para discretizar la ecuación de momentum ha sido el de “Upwind” de segundo orden.

Finalmente para el caso de la interpolación de la fracción de volumen se ha trabajado con el “Upwind” de primer orden. El resto de los parámetros han quedado por defecto.

Una vez completados los pasos de inicializa la simulación con todos los valores de velocidad y fracción de volumen en cero. Por último, se setea el paso de tiempo y el número de pasos. Se han calculado las soluciones cada centésima de segundo (10^{-2} [s]) con 500 pasos, de manera de estudiar el fenómeno durante

los primeros 5 [s], para darle tiempo a las burbujas de llegar a la superficie.

5.3. Modelos utilizados

5.3.1. Multifase Mixture

El modelo Mixture permite que las fases se interpenetren. Las fracciones de volúmenes α_q y α_p para un volumen de control pueden ser iguales o alcanzar un valor entre 0 y 1, dependiendo del espacio ocupado por la fase q y la fase p.

El modelo Mixture permite a las fases moverse a diferentes velocidades usando el concepto de velocidad de deslizamiento o velocidad relativa (para el caso en que las fases se muevan a la misma velocidad, el modelo Mixture se reduce a un modelo multifase homogéneo).

El modelo Mixture resuelve las ecuaciones de continuidad para la mezcla, la ecuación de momentum para la mezcla, y la ecuación de fracción de volumen para las fases secundarias, además de las expresiones algebraicas para las velocidades relativas (si las fases se mueven a distintas velocidades).

Ecuación de continuidad para la mezcla

La ecuación de continuidad para la mezcla es:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m) = \dot{m} \quad (5.1)$$

donde \vec{v}_m es la velocidad de la masa promedio:

$$\vec{v}_m = \frac{\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_k}{\rho_m} \quad (5.2)$$

y ρ_m es la densidad de la mezcla:

$$\rho_m = \sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \quad (5.3)$$

α_k es la fracción de volumen de la fase k.

\dot{m} representa la transferencia de masa debido a la cavitación.

Ecuación de momentum

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho_m \vec{v}_m) + \nabla \cdot (\rho_m \vec{v}_m \vec{v}_m) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \vec{v}_m + \nabla \vec{v}_m^T)] + \rho_m \vec{g} + \vec{F} + \nabla \cdot \left(\sum_{k=1}^n \alpha_k \rho_k \vec{v}_{dr,k} \vec{v}_{dr,k} \right) \quad (5.4)$$

donde n es el número de fases, \vec{F} es una fuerza del cuerpo, y μ_m es la viscosidad de la mezcla:

$$\mu = \sum_{k=1}^n \alpha_k \mu_k \quad (5.5)$$

$\vec{v}_{dr,k}$ es la velocidad de deriva (drift) de la fase k.

Velocidad relativa y velocidad drift

La velocidad relativa (slip velocity) es definida como la velocidad de la fase secundaria (p) con respecto a la fase primaria (q):

$$\vec{v}_{qp} = \vec{v}_p - \vec{v}_q \quad (5.6)$$

Se introduce el concepto de velocidad drift, la cual relaciona la velocidad promedio de la mezcla y la velocidad relativa (\vec{v}_{qp}) mediante la siguiente expresión:

$$\vec{v}_{dr,p} = \vec{v}_{qp} - \sum_{k=1}^n \frac{\alpha_k \rho_k}{\rho_m} \vec{v}_{qk} \quad (5.7)$$

El modelo Mixture hace uso de una formulación algebraica para el movimiento relativo. La suposición básica es que al prescribir una relación para la velocidad relativa, un equilibrio local entre las fases debe ser alcanzado sobre un tramo corto. La forma de la velocidad relativa está dada por:

$$\vec{v}_{qp} = \tau_{qp} \vec{a} \quad (5.8)$$

donde \vec{a} es la aceleración de la partícula de la segunda fase y τ_{qp} es el tiempo de relajación de la partícula. Siguiendo a Manninen et al. τ_{qp} queda de la forma:

$$\tau_{qp} = \frac{(\rho_m - \rho_p)d_p^2}{18\mu_q f_{drag}} \quad (5.9)$$

donde d_p es el diámetro de las partículas (o burbujas u gotas) de la fase secundaria p, y la función de arrastre es tomada de Schiller y Naumann:

$$f_{drag} = \begin{cases} 1 + 0,15Re^{0,687} & Re \leq 1000 \\ 0,0183Re & Re > 1000 \end{cases} \quad (5.10)$$

y la aceleración \vec{a} es de la forma

$$\vec{a} = \vec{g} - (\vec{v}_m \cdot \nabla)\vec{v}_m - \frac{\partial \vec{v}_m}{\partial t} \quad (5.11)$$

La formulación más simple para el deslizamiento es también llamada modelo de flujo drift flux model, en el cual la aceleración de la partícula está dada por la gravedad y/o la fuerza centrífuga y el tiempo de relajación de la partícula es modificado para tomar en cuenta la presencia de otras partículas.

Si la velocidad relativa no es resuelta, el modelo Mixture se reduce a un modelo multifase homogéneo.

Fracción de volumen para fases secundarias

De la ecuación de continuidad para una fase secundaria p, la ecuación de fracción de volumen para la fase secundaria p se puede obtener:

$$\frac{\partial}{\partial t}(\alpha_p \rho_p) + \nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_m) = -\nabla \cdot (\alpha_p \rho_p \vec{v}_{dr,p}) \quad (5.12)$$

5.3.2. Multifase VOF

La formulación VOF (Volume of Fluid) se apoya en el hecho de que dos o más fluidos (o fases) no se mezclan. Para cada fase que se agregue al modelo, se introduce una variable: la fracción de volumen de la fase en la celda computacional. En cada volumen de control, las fracciones de volumen de todas las fases suman la unidad. Se comparten los campos para todas las variables y propiedades de las fases y representan valores

promedio de volúmenes. Estas variables y propiedades en cualquier celda pueden ser representativas, ya sea, de una de las fases, o de la mezcla de ellas, dependiendo de los valores de sus fracciones de volúmenes. En otras palabras, si la fracción de volumen del q-ésimo fluido se denota como α_q , existen tres posibles situaciones:

- $\alpha_q=0$: la celda está vacía (por el q-ésimo fluido)
- $\alpha_q=1$: La celda está llena (por el q-ésimo fluido)
- $0 < \alpha_q < 1$: la celda contiene la interfase entre el q-ésimo fluido y uno o más fluidos

Basado en el valor local de α_q , serán asignadas las propiedades y valores apropiados a cada volumen de control dentro del dominio.

Capítulo 6

Resultados

A continuación se muestra el resultado de la simulaciones llevadas a cabo en FLUENT para la geometría indicada en el capítulo 5, para observar el flujo de burbujas inyectadas y el comportamiento del material particulado al interactuar con los fluidos.

A continuación se resumen algunos parámetros de la simulación:

Tabla 6.1: Datos de la simulación

Modelos	Mixture con resolución de velocidad relativa Volume of fluid Laminar
Materiales	Aire Agua Carbón en polvo de tamaño 10 [μm]
Condiciones de borde	Velocidad de entrada a 0,05 [m/s] Fracción de volumen de polvo en la entrada de $1,65 \cdot 10^{-4}$ Presión atmosférica a la salida
Tiempo de simulación	$\Delta t = 0,01$ [s] Nº de pasos = 500

6.1. Descripción de la simulación

6.1.1. Acerca del régimen de burbujas

A continuación se muestra la secuencia resultante de la simulación para el régimen de burbujas en los primeros 4 [s].

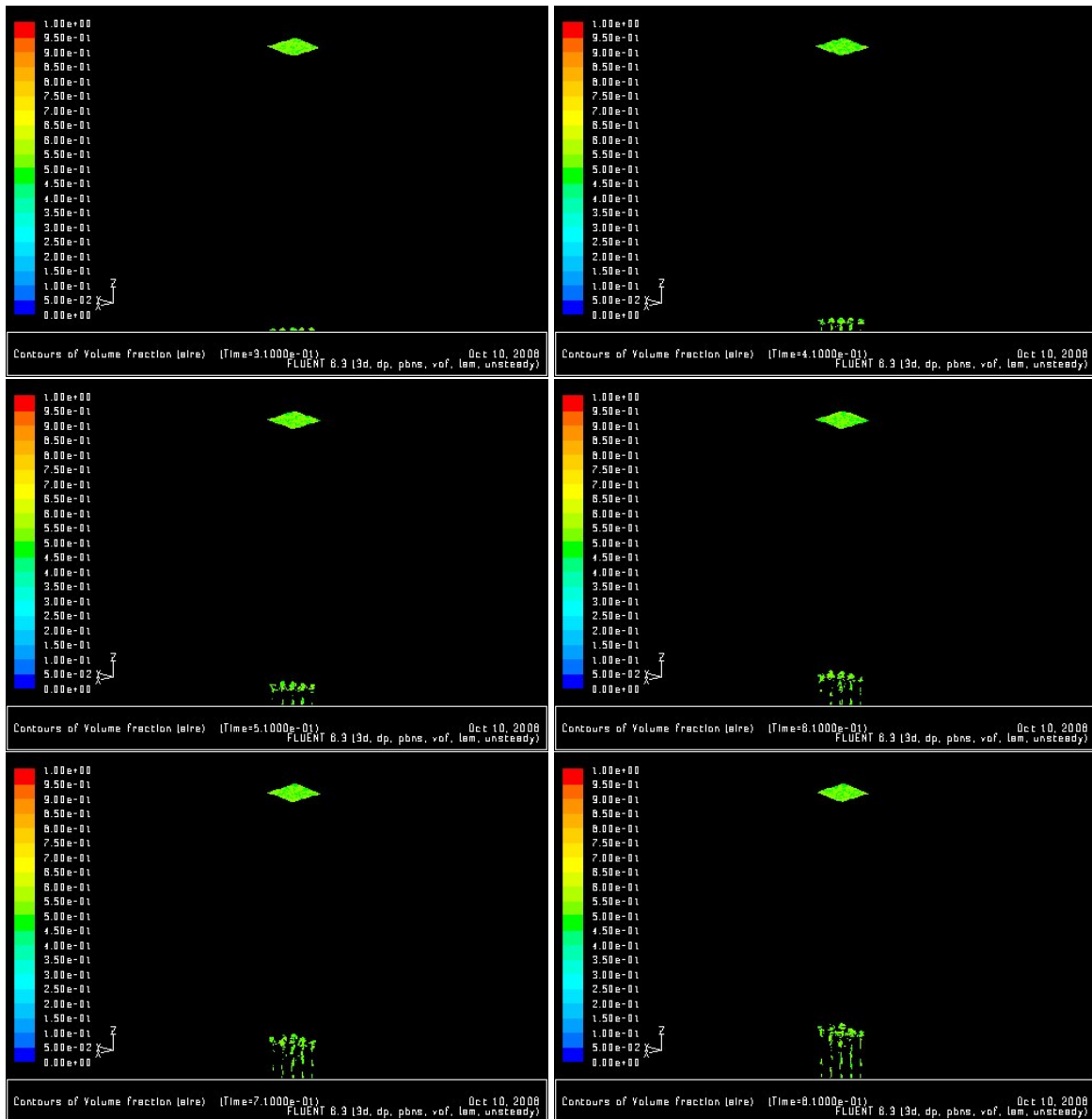


Figura 6.1: Evolución de las burbujas en el tiempo para tiempos de, $t = 0,3$ [s], $t = 0,4$ [s], $t = 0,5$ [s], $t = 0,6$ [s], $t = 0,7$ [s], $t = 0,8$ [s]

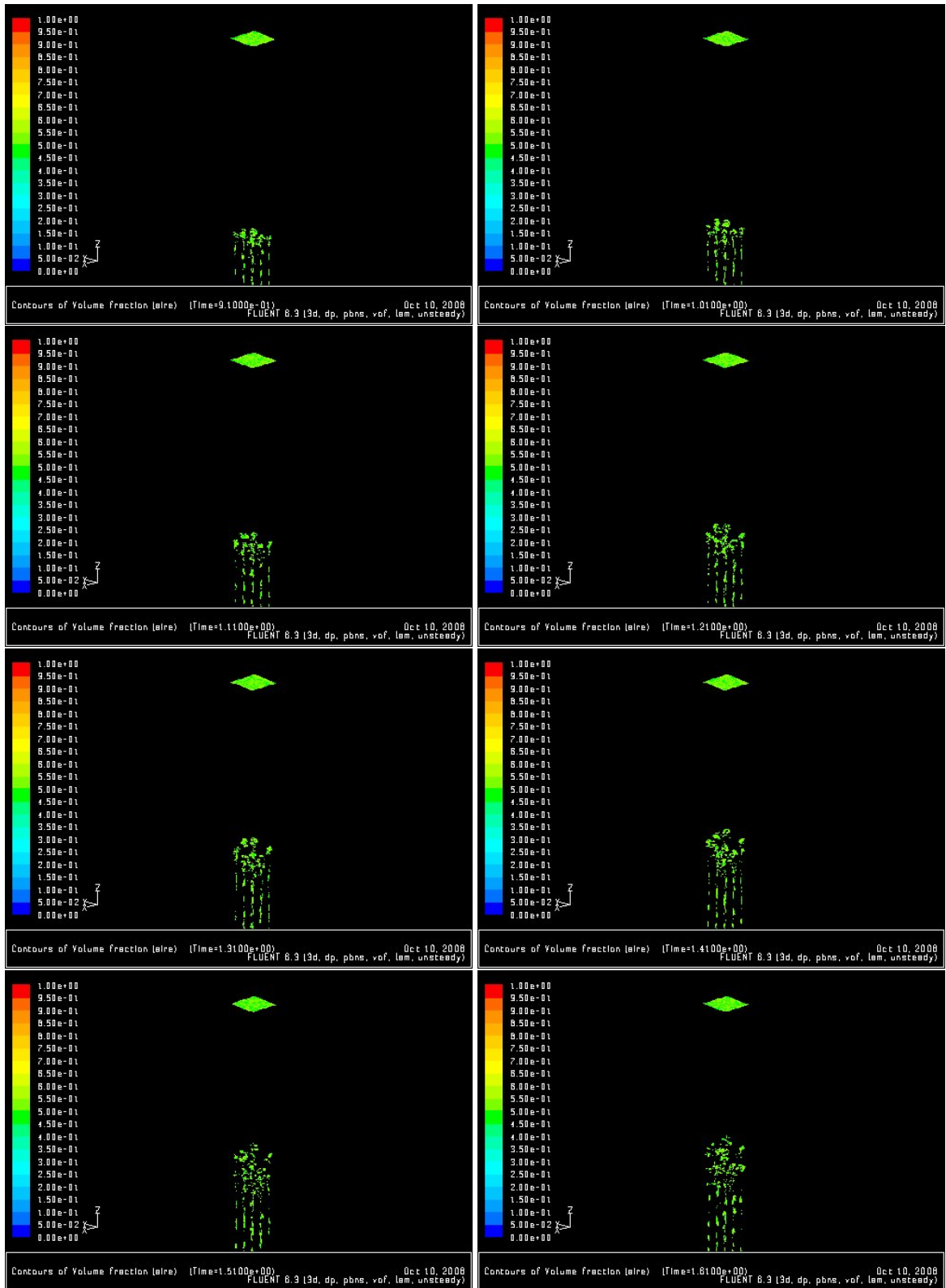


Figura 6.2: Evolución de las burbujas en el tiempo para tiempos de $t = 0,9$ [s], $t = 1$ [s], $t = 1,1$ [s], $t = 1,2$ [s], $t = 1,3$ [s], $t = 1,4$ [s], $t = 1,5$ [s], $t = 1,6$ [s]

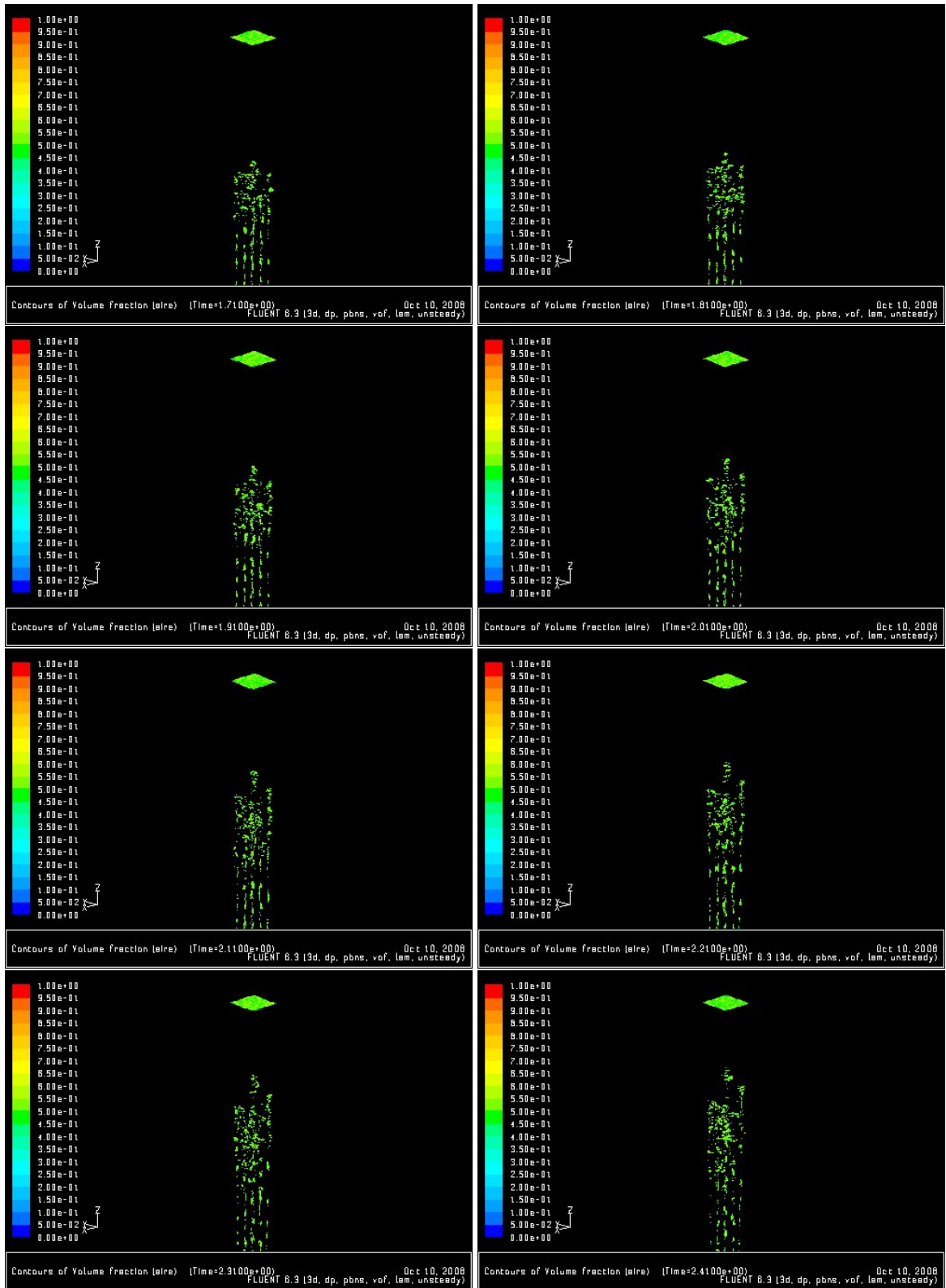


Figura 6.3: Evolución de las burbujas en el tiempo para tiempos de $t = 1,7 \text{ [s]}$, $t = 1,8 \text{ [s]}$, $t = 1,9 \text{ [s]}$, $t = 2 \text{ [s]}$, $t = 2,1 \text{ [s]}$, $t = 2,2 \text{ [s]}$, $t = 2,3 \text{ [s]}$, $t = 2,4 \text{ [s]}$

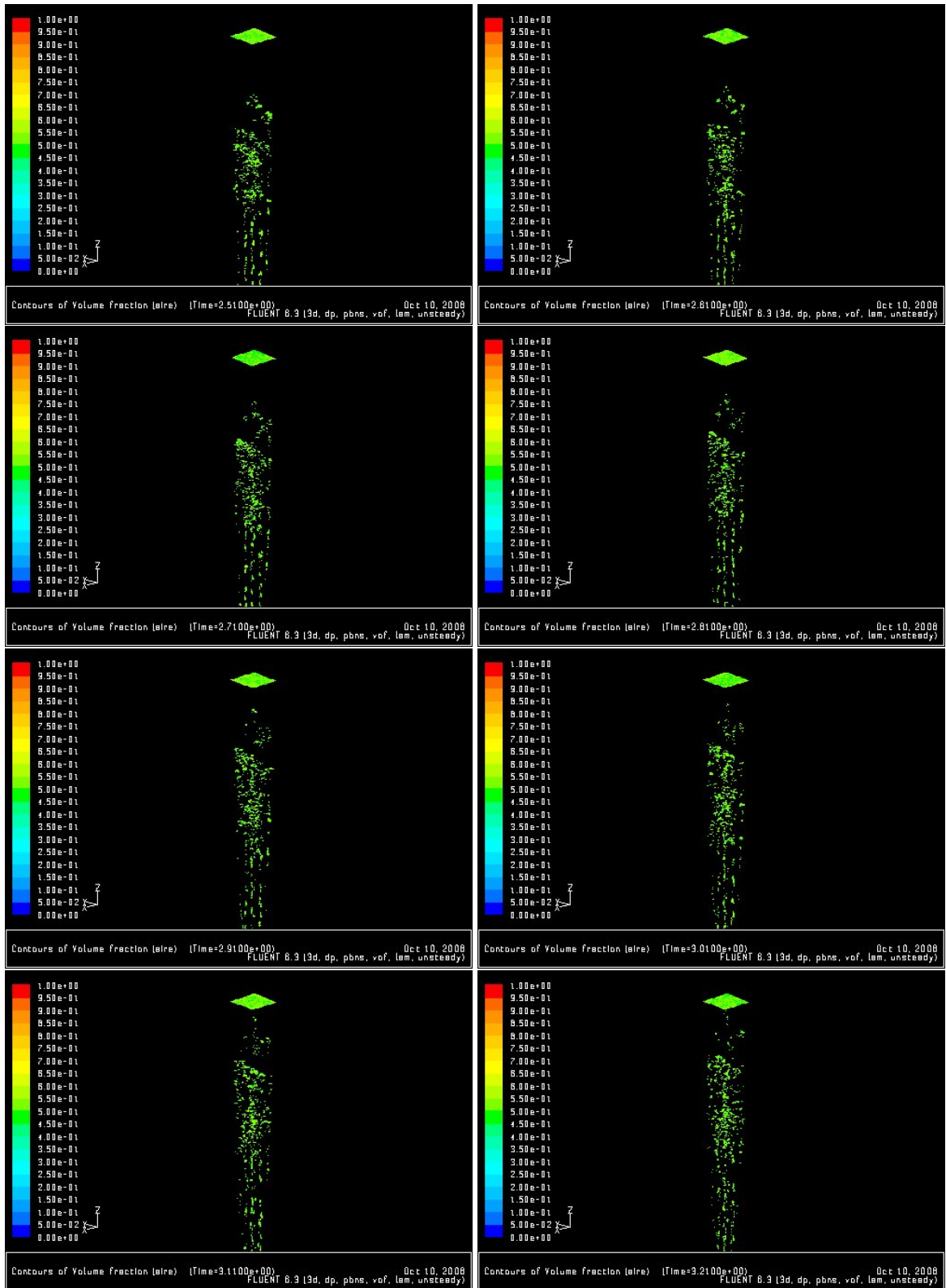


Figura 6.4: Evolución de las burbujas en el tiempo para tiempos de, $t = 2,5$ [s], $t = 2,6$ [s], $t = 2,7$ [s], $t = 2,8$ [s], $t = 2,9$ [s], $t = 3$ [s], $t = 3,1$ [s], $t = 3,2$ [s]

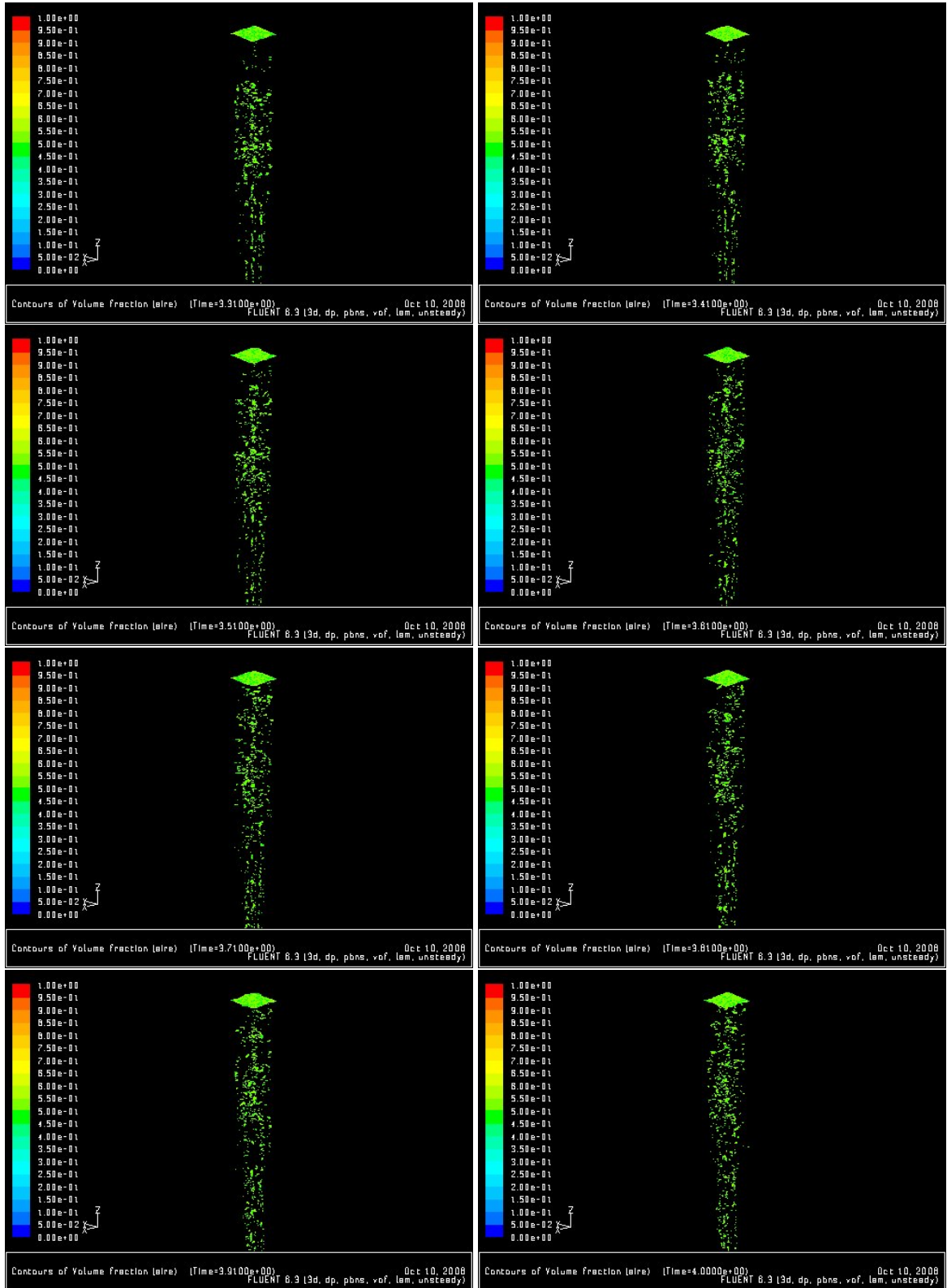


Figura 6.5: Evolución de las burbujas en el tiempo para tiempos de, $t = 3,3$ [s], $t = 3,4$ [s], $t = 3,5$ [s], $t = 3,6$ [s], $t = 3,7$ [s], $t = 3,8$ [s], $t = 3,9$ [s], $t = 4$ [s]

Se aprecia que en un comienzo, la formación de la primera burbuja es un proceso lento ya que ésta tarda más en desprenderse, alrededor de 0,3 [s], por lo mismo, el tamaño de ésta es grande en comparación al resto debido a que ha sido formada con una mayor cantidad de aire. Luego de terminar la formación de esta primera burbuja, comienza a ascender a una velocidad menor a las burbujas que se desprenden después, lo que provoca que las burbujas que vienen más abajo colisionen con ella, desarmándola en varias burbujas pequeñas. Este comportamiento se termina aproximadamente a los $t=1$ [s], cuando se estabiliza el régimen y comienzan a salir las burbujas de un mismo tamaño y a una misma frecuencia.

Sin embargo, las burbujas que nacieron dentro de este primer segundo, continúan su viaje a la superficie de manera caótica, chocando unas con otras, lo que implica movimientos que favorecen mezclas, produciéndose el rompimiento de algunas burbujas en burbujas más pequeñas y la coalescencia de otras para formar burbujas más grandes.

Luego de un tiempo de aproximadamente unos 1,7 [s], este “frente de ataque de burbujas iniciales” han acelerado hasta llegar a la mitad del volumen ocupado por el agua, luego disminuyen su velocidad, lo que genera una especie de estancamiento que hace que las burbujas que vienen más abajo, y que viajan a mayor velocidad, choquen con estas burbujas estancadas. Ésto provocan que las burbujas se rompan nuevamente, produciéndose otra situación de movimientos caóticos.

A este paso las burbujas se encuentran estancadas y se les dificulta continuar el ascenso ya que chocan entre ellas en distintas direcciones. Sin embargo, algunas de ellas logran desprenderse de esta situación y siguen su viaje a la superficie, mientras la zona caótica continúa desplazándose en bloque a la superficie. Finalmente, transcurridos los 5 [s] de la simulación, se distinguen 3 zonas: la parte inferior, donde se aprecian burbujas ascendiendo a una frecuencia y velocidad constante; la parte del medio, donde se encuentra la mayor densidad de burbujas y la mayor aleatoriedad en las trayectorias de éstas; y la parte superior, que comprende la zona de las burbujas que se desprenden de la zona caótica.

A continuación se muestran los resultados que se desprenden de la simulación:

Tabla 6.2: Resultados del régimen de burbujas

Velocidad promedio de ascenso	0,18 [m/s]
Frecuencia de desprendimiento	5 [1/s]

6.2. Acerca del material particulado

El material particulado, inyectado por la parte inferior del dominio, sube hacia la superficie a la misma velocidad que lo hacen las burbujas, y lo hace a través de un chorro continuo sin cambiar su dirección ni interactuar con el agua. Este comportamiento continúa hasta un tiempo de 1 [s], en donde, el frente de ataque del material particulado ha llegado aproximadamente a la mitad del volumen ocupado por el agua. En este momento el chorro formado por el polvo inyectado pierde estabilidad y comienza a desarmarse, lo que significa que el polvo se mezcla con el líquido.

A partir de entonces, el material particulado se dispersa hacia distintas direcciones, quedando atrapado en el líquido. El polvo se mezcla con el agua, ayudado por el movimiento caótico de las burbujas en la zona en que se favorece dicha mezcla. Esto genera una especie de barrera en la zona media que impide que el polvo que está siendo inyectado, que viene más abajo, llegue a la superficie, quedando atrapado en medio de la zona líquida ya que, según las imágenes de las figuras 6.12, no se observan indicios de material particulado alcanzando la superficie del líquido.

Según estos resultados, el movimiento disperso de las burbujas, de esa zona media en particular, ayudan a la mezcla, lo que significa que el líquido es capaz de atrapar el material particulado inyectado por completo, resultado que implica que el mecanismo de filtrado de partículas en las condiciones mencionadas, tiene una eficiencia de un 100%. Cabe decir que el análisis está hecho dentro de los primeros 5 [s] de la simulación, lo que no significa que luego de calmarse la situación caótica inicial, el polvo no sea capaz de escapar por la superficie, por lo que cabría discutir este resultado.

A continuación la secuencia de los 5 [s] de inyección de polvo al dominio ocupado por agua:

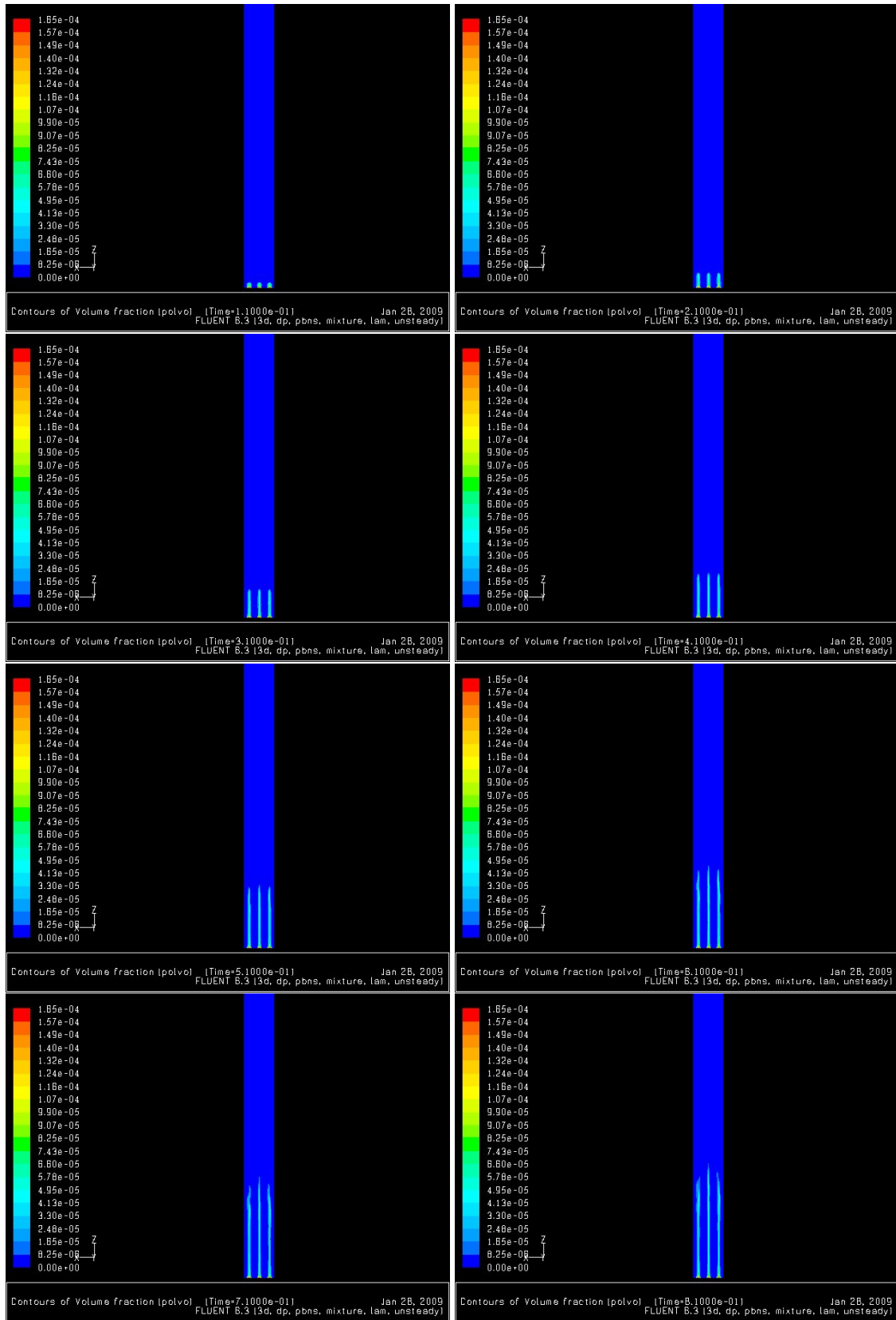


Figura 6.6: Evolución del material particulado inyectado para los tiempos de, $t = 0,1$ [s], $t = 0,2$ [s], $t = 0,3$ [s], $t = 0,4$ [s], $t = 0,5$ [s], $t = 0,6$ [s] $t = 0,7$ [s], $t = 0,8$ [s]

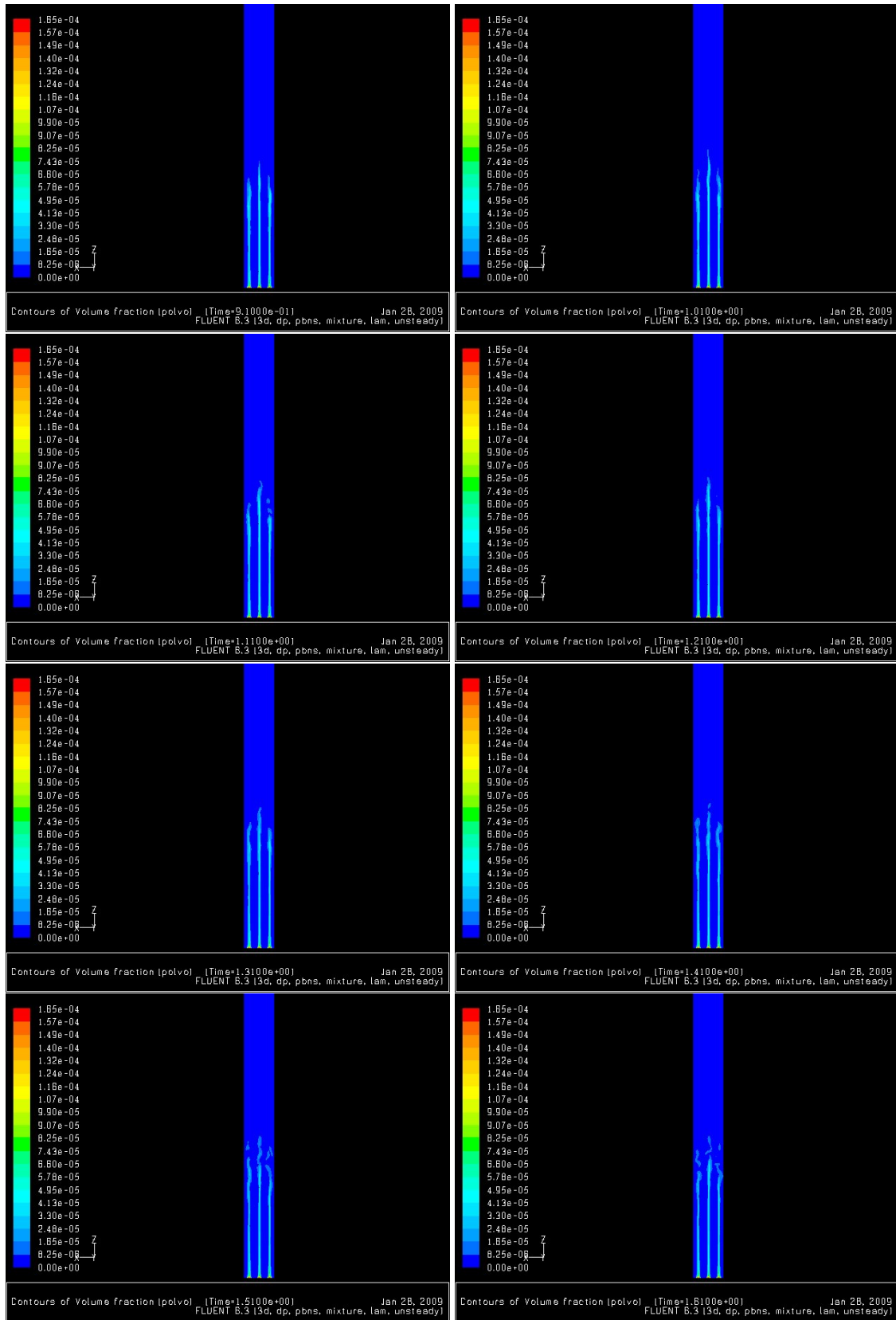


Figura 6.7: Evolución del material particulado inyectado para los tiempos de, $t = 0,9$ [s], $t = 1$ [s], $t = 1,1$ [s], $t = 1,2$ [s], $t = 1,3$ [s], $t = 1,4$ [s], $t = 1,5$ [s], $t = 1,6$ [s],

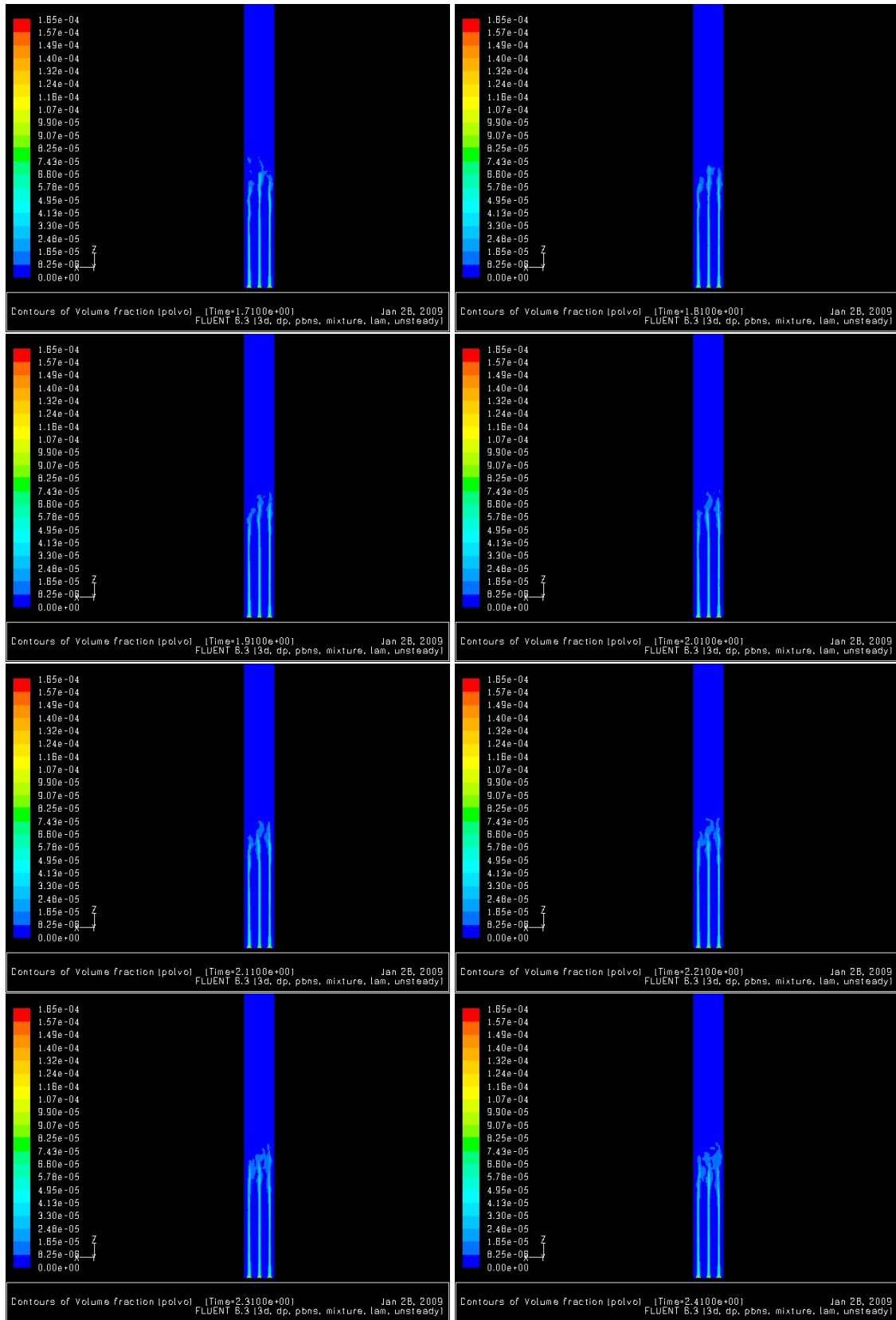


Figura 6.8: Evolución del material particulado inyectado para los tiempos de, $t = 1,7$ [s], $t = 1,8$ [s], $t = 1,9$ [s], $t = 2$ [s], $t = 2,1$ [s], $t = 2,2$ [s], $t = 2,3$ [s], $t = 2,4$ [s]

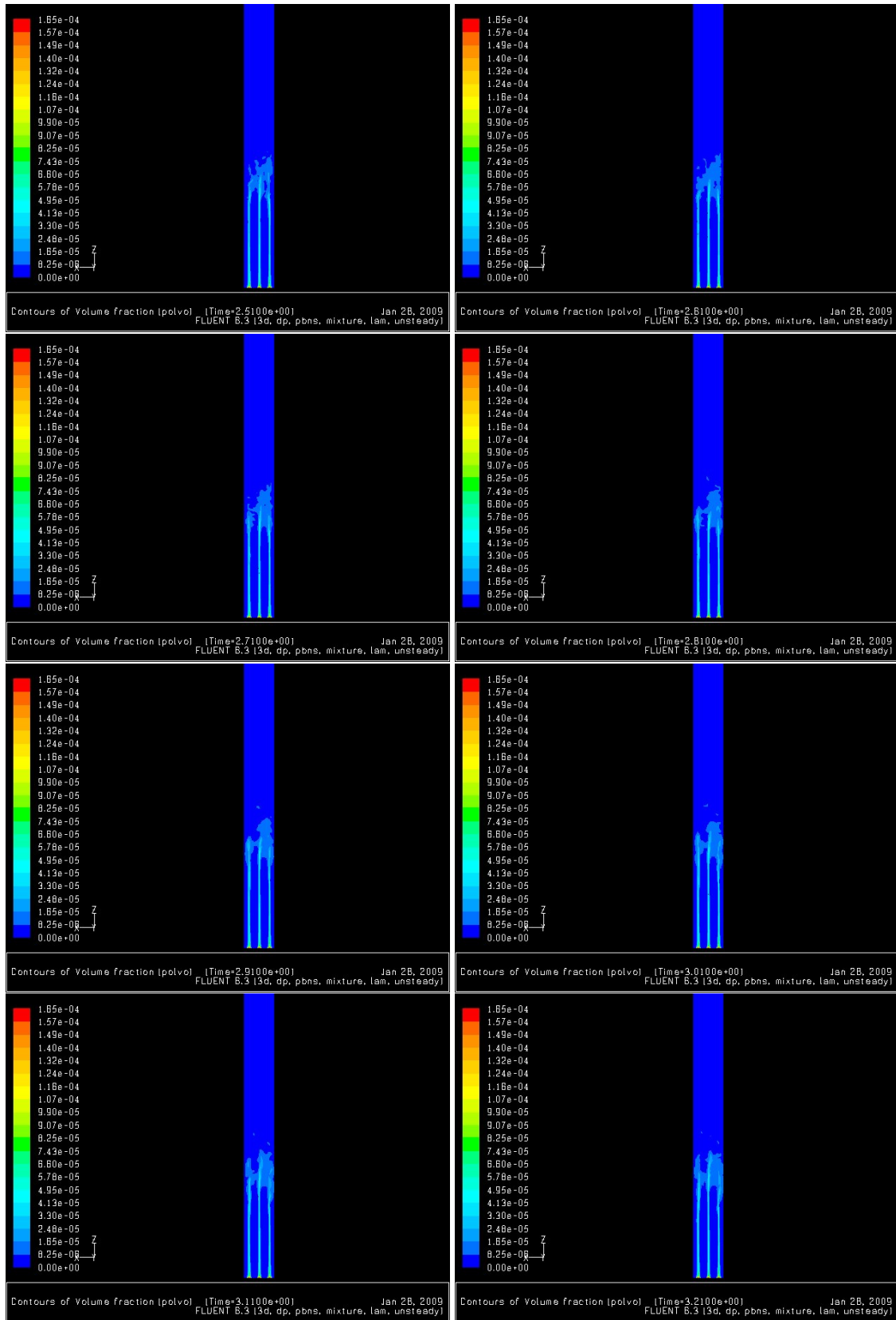


Figura 6.9: Evolución del material particulado inyectado para los tiempos de, $t = 2,5$ [s], $t = 2,6$ [s], $t = 2,7$ [s], $t = 2,8$ [s], $t = 2,9$ [s], $t = 3$ [s], $t = 3,1$ [s], $t = 3,2$ [s]

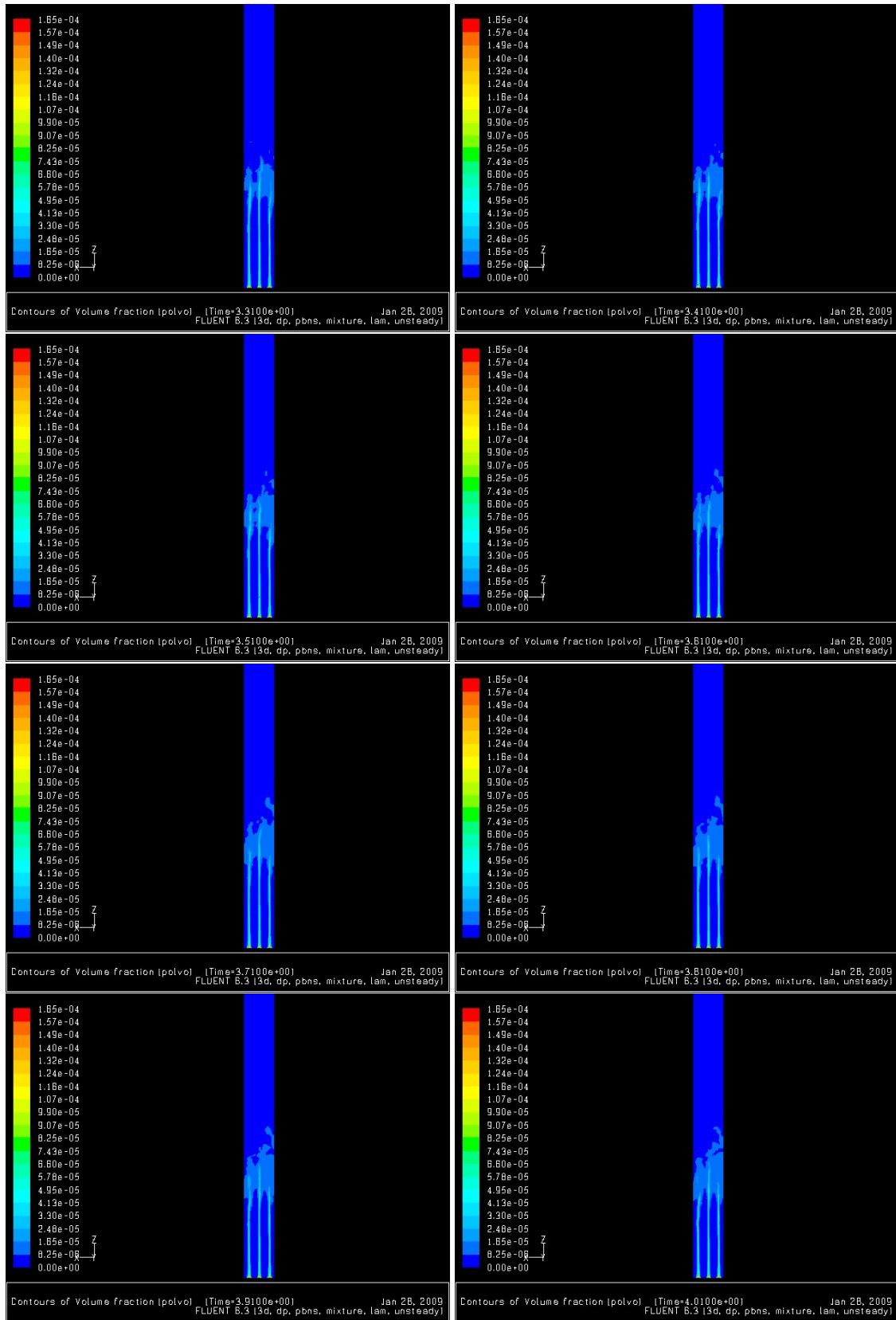


Figura 6.10: Evolución del material particulado inyectado para los tiempos de, $t = 3,3$ [s], $t = 3,4$ [s], $t = 3,5$ [s], $t = 3,6$ [s], $t = 3,7$ [s], $t = 3,8$ [s], $t = 3,9$ [s], $t = 4$ [s]

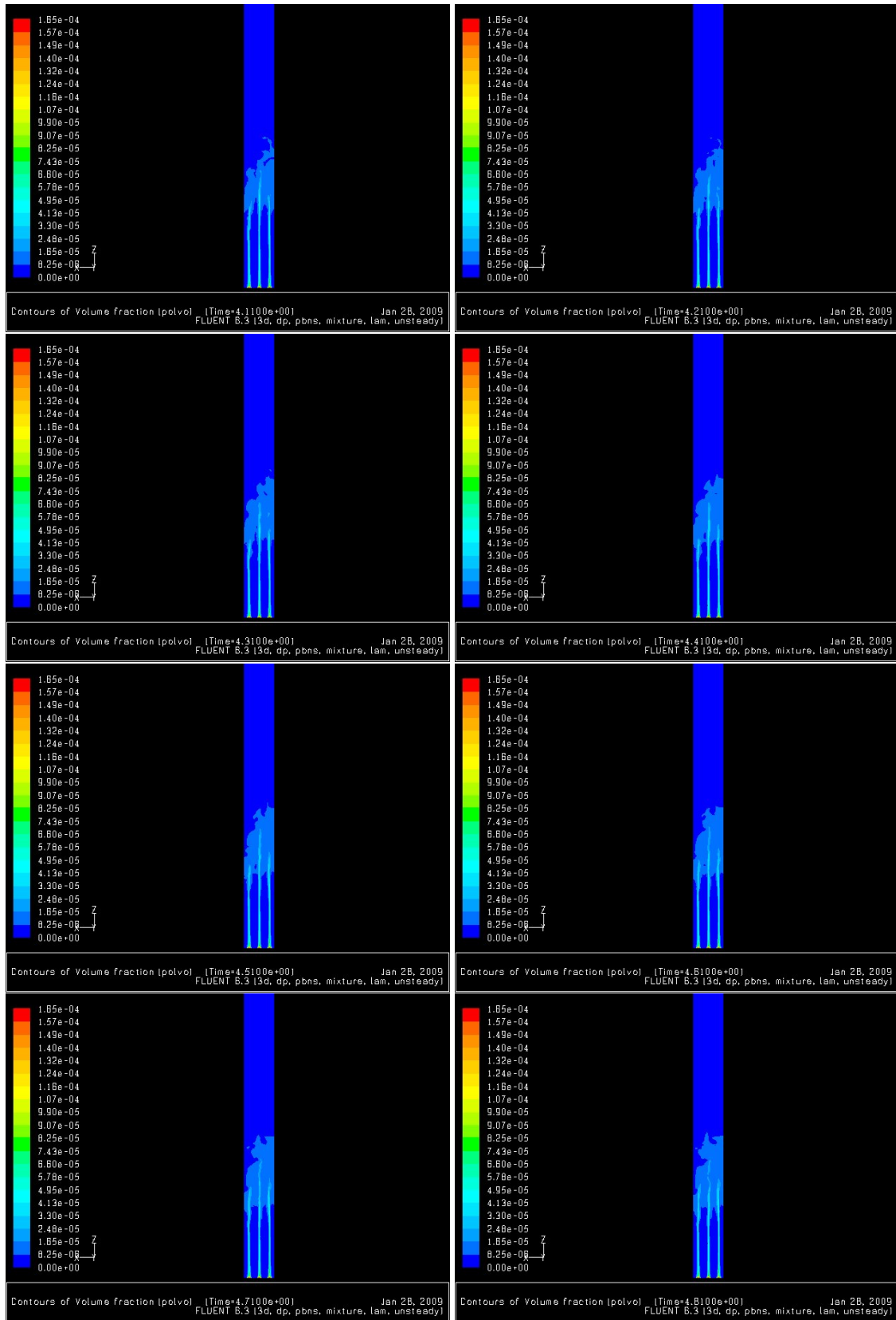


Figura 6.11: Evolución del material particulado inyectado para los tiempos de, $t = 4,1$ [s], $t = 4,2$ [s], $t = 4,3$ [s], $t = 4,4$ [s], $t = 4,5$ [s], $t = 4,6$ [s], $t = 4,7$ [s], $t = 4,8$ [s]

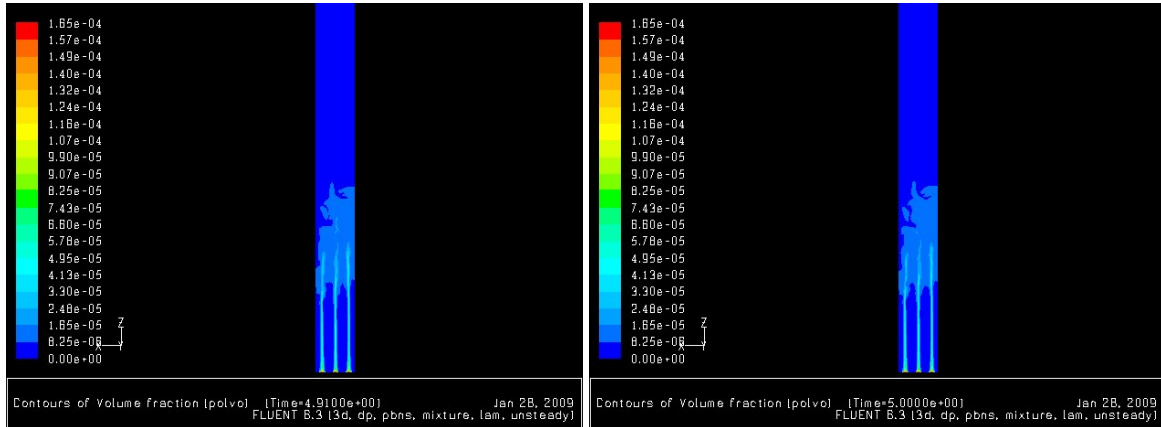


Figura 6.12: Evolución del material particulado inyectado para los tiempos de, $t = 4,9$ [s], $t = 5$ [s]

6.3. Campo de velocidades

Las figuras 6.13 a la 6.19 muestran los vectores de velocidad en el dominio de la simulación. Las figuras a la izquierda corresponden al dominio completo en que ocurre la simulación, mientras que a la derecha, se observan acercamientos a las zonas de interés, para un mismo instante del tiempo.

Los vectores aparecen de distintos colores mostrando las distintas magnitudes en distintas zonas. De esta manera, aparecen flechas de color rojo, que corresponden a las velocidades más altas en ese instante, para luego pasar una gama de colores y terminar en los azules, correspondientes a las velocidades más bajas de ese instante.

Al observar las primeras figuras, se aprecia en la entrada de la mezcla aire-partículas, que hay una aceleración, produciéndose velocidades más altas en el centro y más bajas hacia afuera. Se puede notar también que las direcciones de los vectores son verticales, es decir, en todo momento la mezcla sube sin desviarse a la zona ocupada por el agua, existiendo movimiento únicamente dentro del chorro. Dentro del agua no existe mayor movimiento, salvo en zonas muy cercanas al chorro, donde se observa cierto movimiento, especialmente en la figura 6.13.

A partir de los 0,8 [s], este régimen cambia. Comienzan a aparecer variaciones en la velocidad en partes que antes se encontraban en reposo. Se puede notar desde la figura 6.14 como los vectores dentro del chorro cambian sus direcciones, que antes eran exclusivamente vertical y ascendente, para adentrarse en el agua. Se puede ver también que las velocidades comienzan a disminuir.

De este momento en adelante, después del primer segundo aproximadamente, las figuras muestran a los vectores en distintas direcciones y tendiendo a disminuir su velocidad, lo que significa que el polvo se está mezclando con el agua. Se aprecia, por la figuras de la izquierda, que los chorros en el momento de

la mezcla se comienzan a desarmar y no avanzan más allá de cierto punto. Se puede notar además que el movimiento es mayor en la zona de los chorros y mucho menor en la zona del líquido. Esta nueva situación continúa evolucionando de esta manera durante el resto de la simulación.

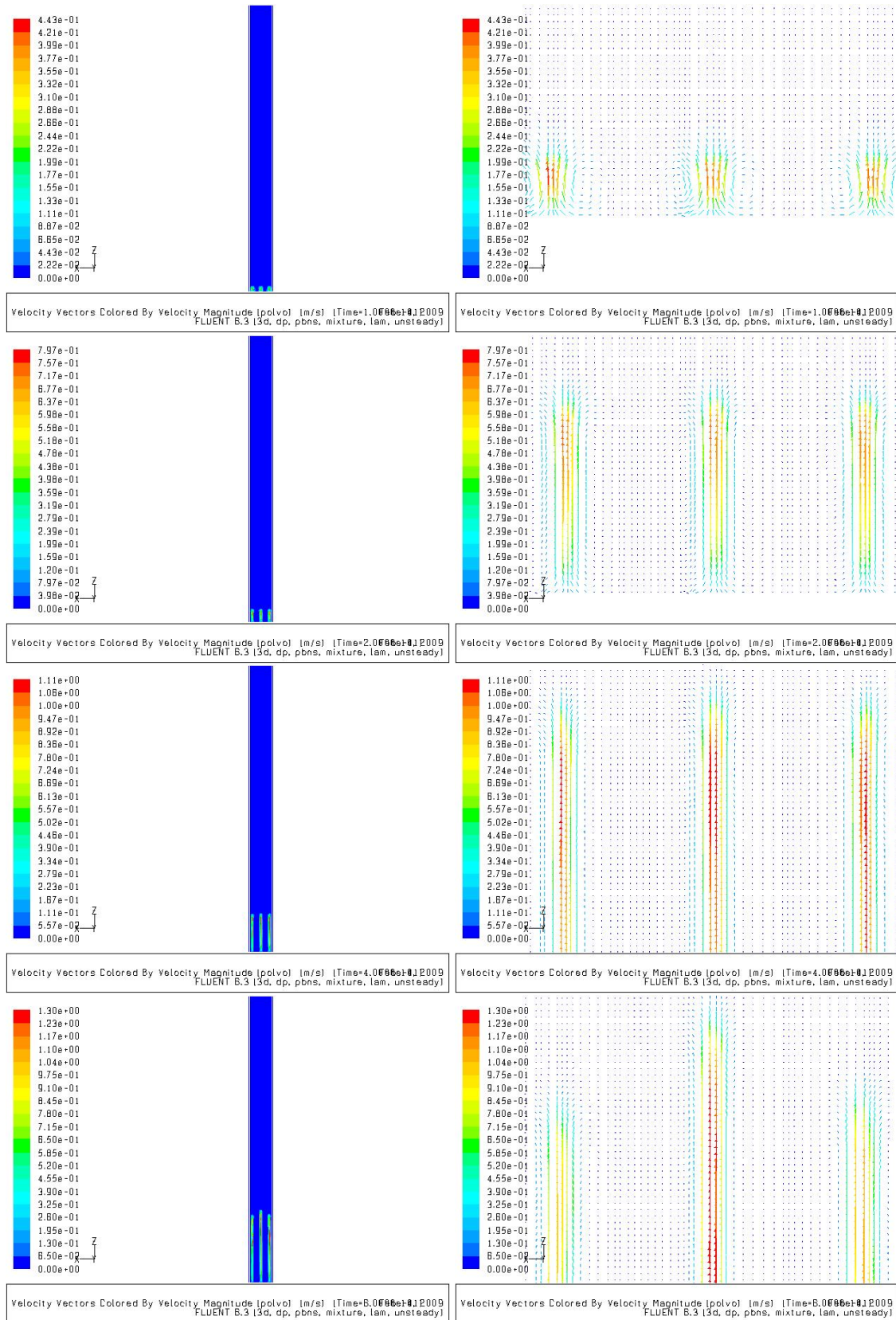


Figura 6.13: Vectores del campo de velocidades en la inyección para tiempos de, $t = 0,1$ [s], $t = 0,2$ [s], $t = 0,4$ [s], $t = 0,6$ [s]

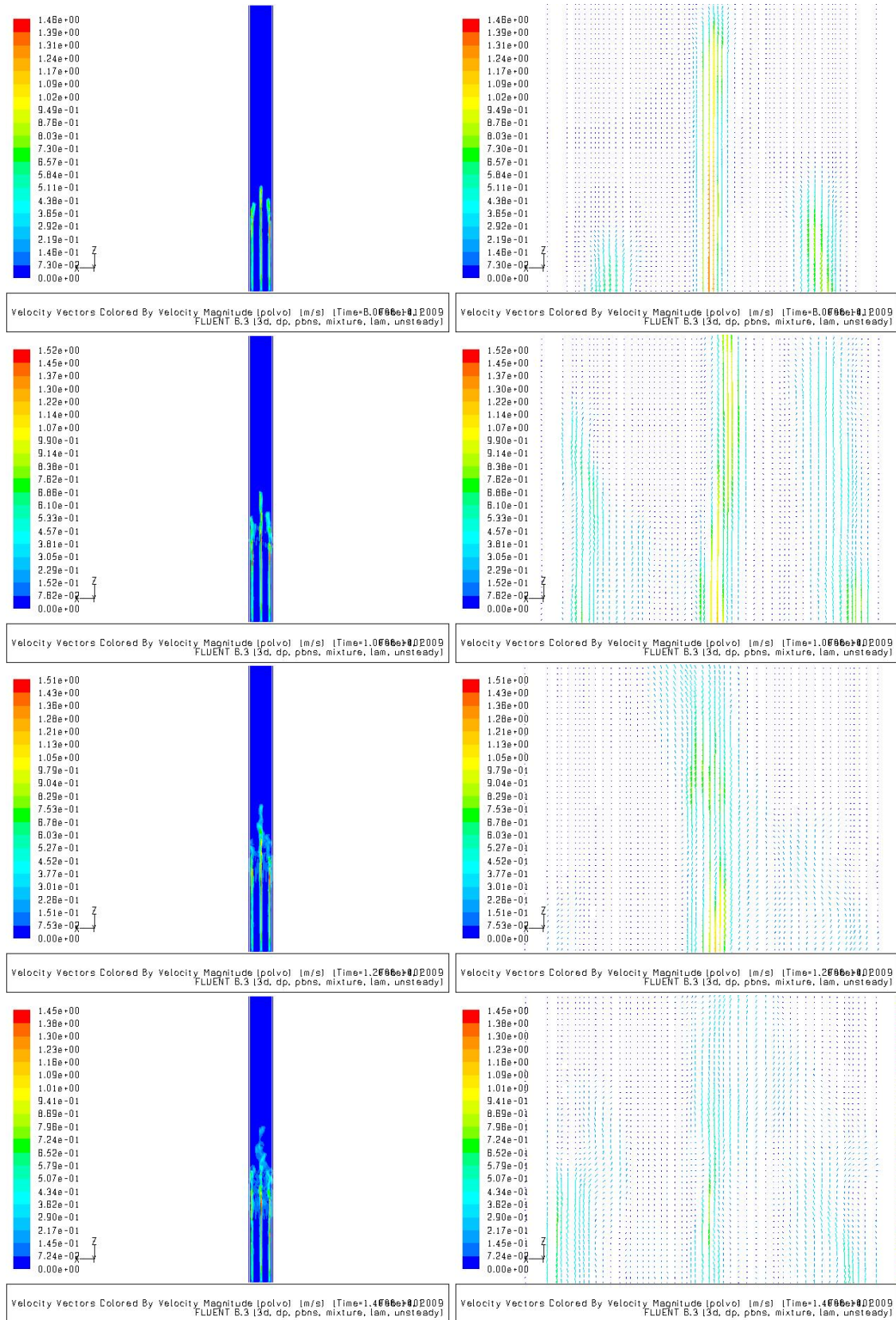


Figura 6.14: Vectores del campo de velocidades en la inyección para tiempos de, $t = 0,8$ [s], $t = 1$ [s], $t = 1,2$ [s], $t = 1,4$ [s]

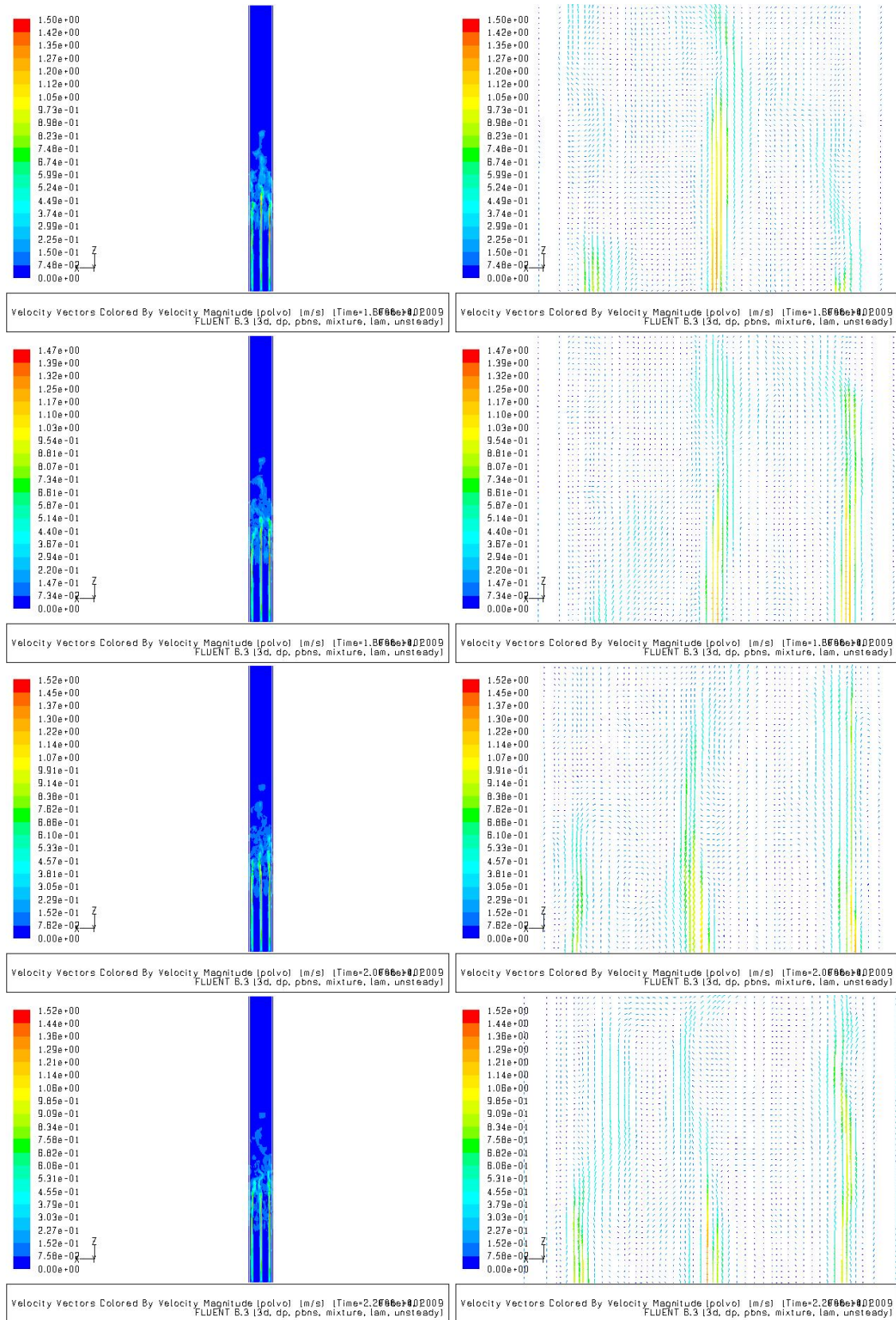


Figura 6.15: Vectores del campo de velocidades en la inyección para tiempos de, $t = 1,6$ [s], $t = 1,8$ [s], $t = 2$ [s], $t = 2,2$ [s]

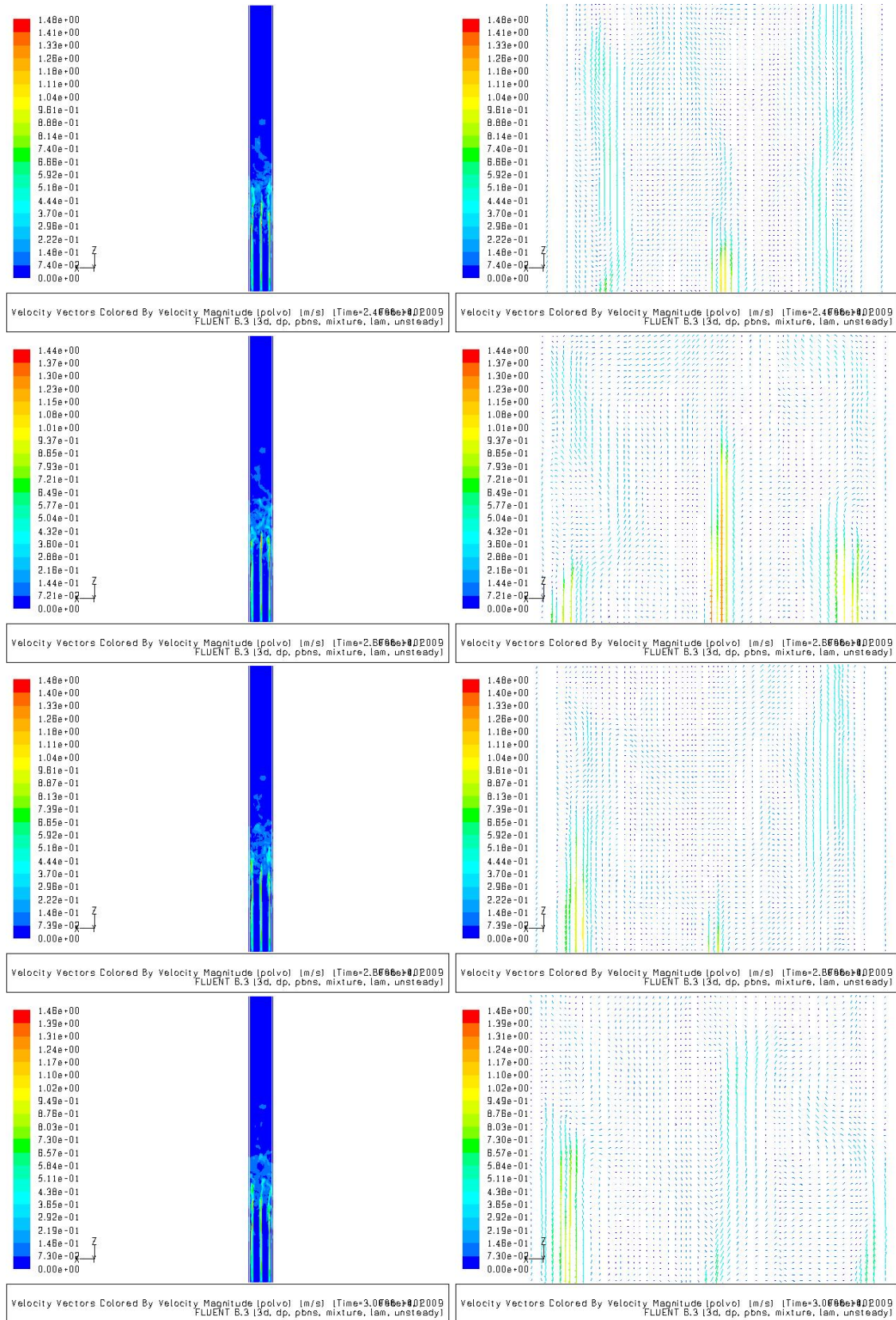


Figura 6.16: Vectores del campo de velocidades en la inyección para tiempos de, $t = 2,4$ [s], $t = 2,6$ [s], $t = 2,8$ [s], $t = 3$ [s]

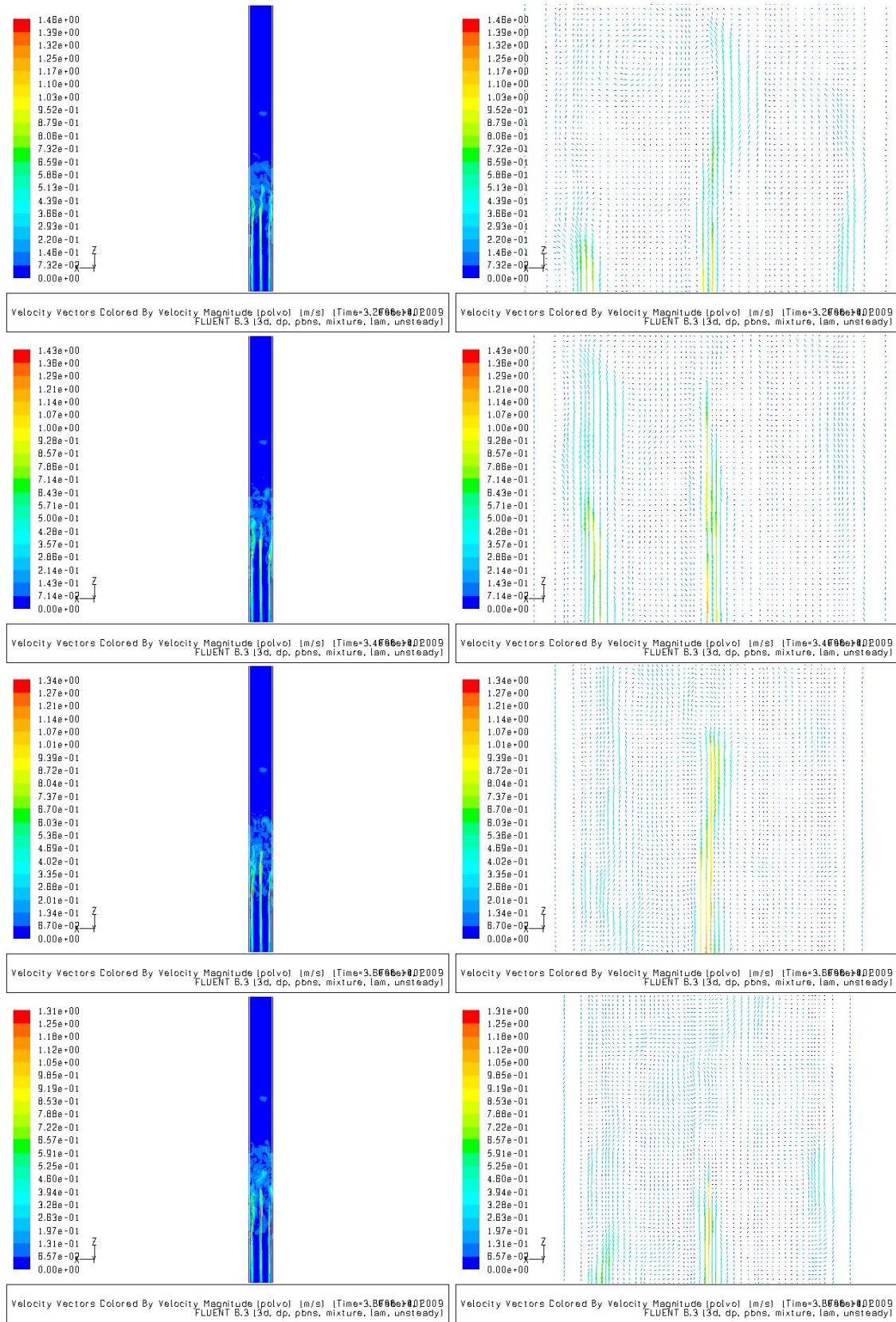


Figura 6.17: Vectores del campo de velocidades en la inyección para tiempos de, $t = 3,2$ [s], $t = 3,4$ [s], $t = 3,6$ [s], $t = 3,8$ [s]

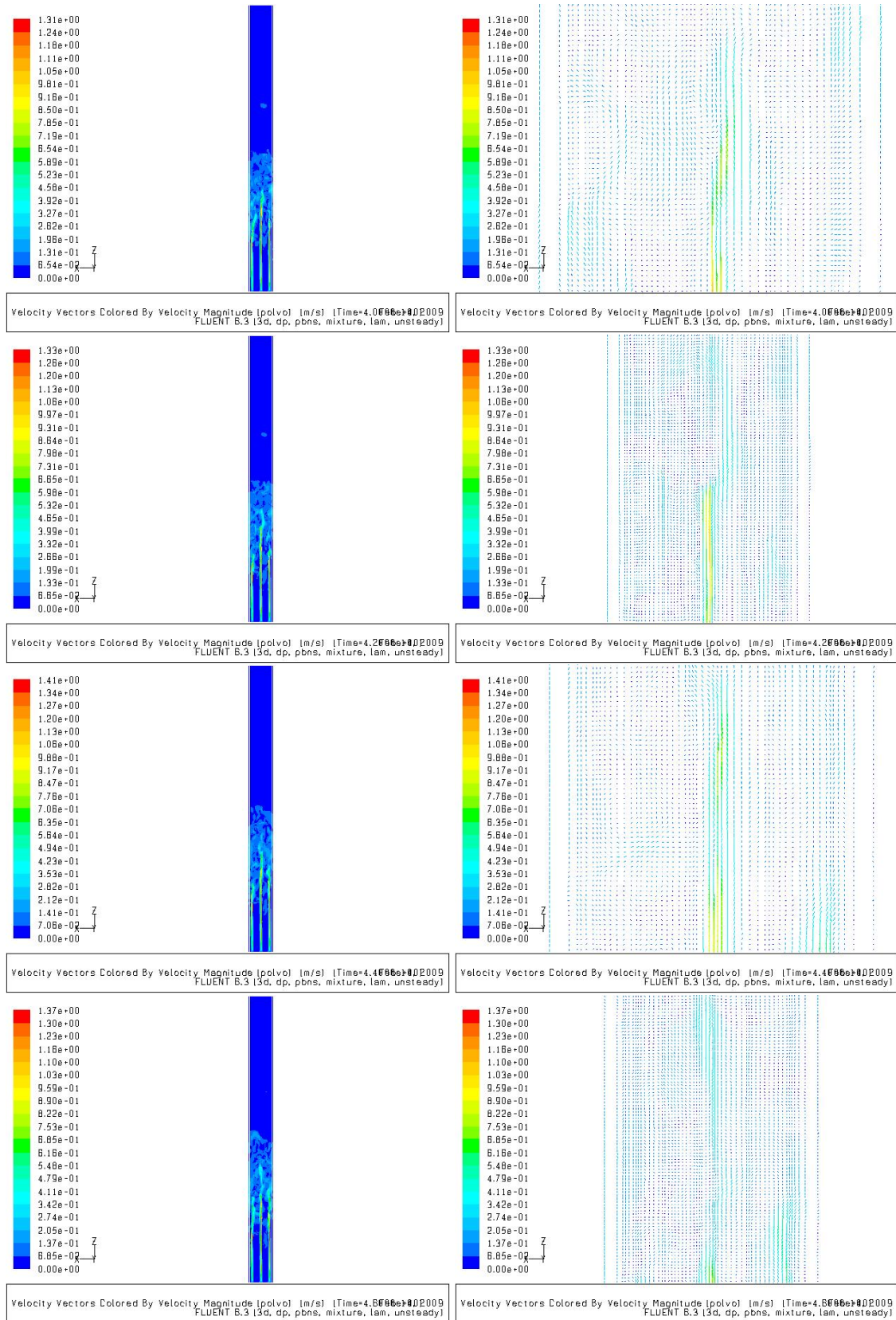


Figura 6.18: Vectores del campo de velocidades en la inyección para tiempos de, $t = 4$ [s], $t = 4,2$ [s], $t = 4,4$ [s], $t = 4,6$ [s]

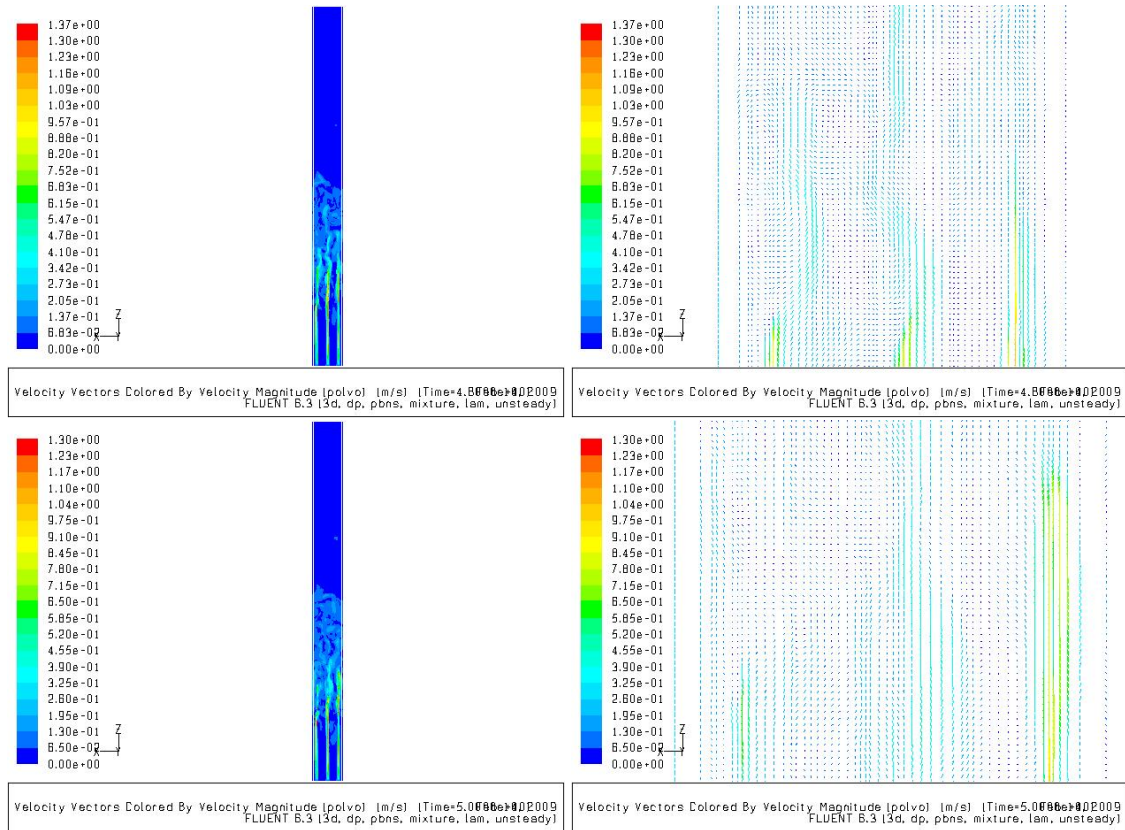


Figura 6.19: Vectores del campo de velocidades en la inyección para tiempos de, $t = 4,8$ [s], $t = 5$ [s]

De acuerdo a los resultados, se tiene que las distintas velocidades existentes en el dominio de la simulación alcanzan un valor máximo en distintos instantes. Este valor máximo va cambiando a medida que el fenómeno evoluciona. De esta manera se han tomado las velocidades máximas registradas en distintos momentos, para confeccionar el gráfico de la figura 6.20 que muestra la variación de la velocidad máxima obtenida del campo de velocidades, en el tiempo.

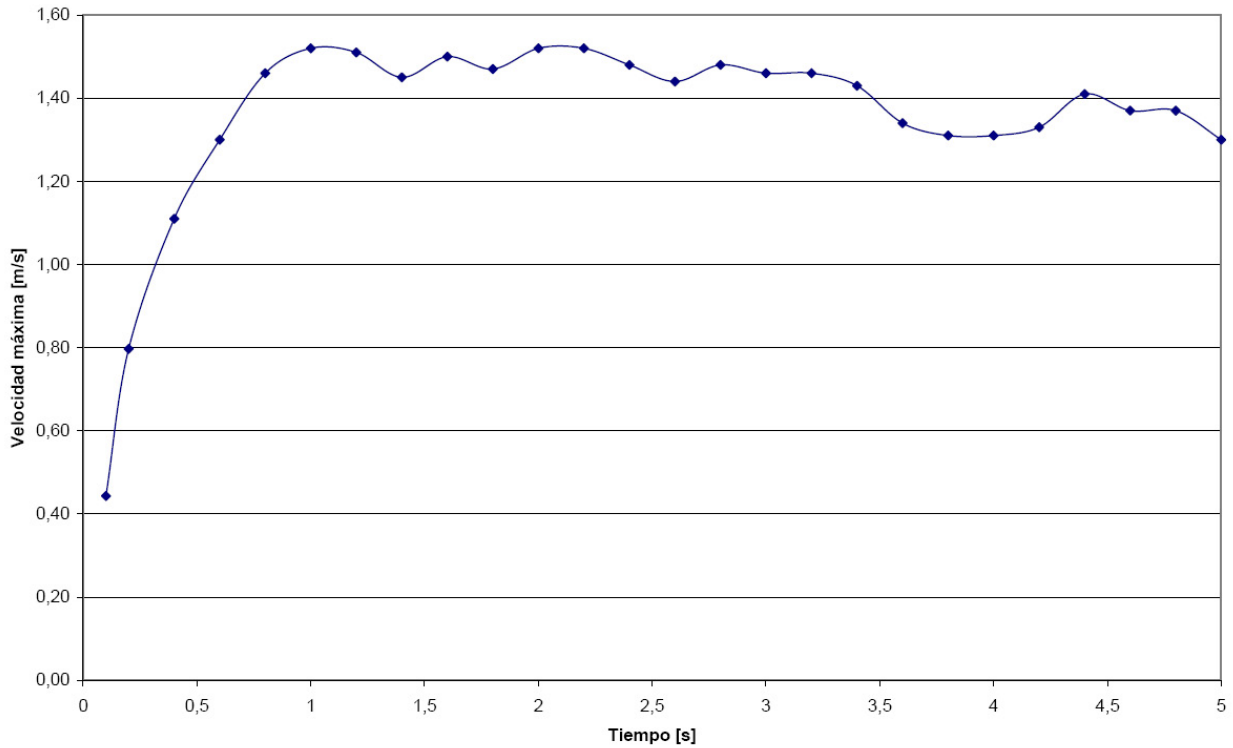


Figura 6.20: Variación de la velocidad máxima en el tiempo

La figura 6.20 muestra la variación de la velocidad máxima en el campo de velocidades. Esta zona de velocidades máximas se ubica por el centro del chorro hacia la punta de éste. Según la imagen, se observa que existe una aceleración importante desde el momento de la inyección, desde el reposo hasta que alcanza un valor máximo, lo que ocurre durante el primer segundo. A partir de entonces la velocidad máxima se mantiene constante, pero, con perturbaciones, observándose pequeñas alzas y bajas de la velocidad en torno a 1,4 [m/s].

En la siguiente tabla, se resumen los resultados arrojados del análisis del campo de velocidades:

Tabla 6.3: Resultados del campo de velocidades

Velocidad máxima	1,52 [m/s]
Tiempo	1 [s]
Velocidad máxima final	1,3 [m/s]
Tiempo	5 [s]

6.4. Campo de presiones

En general, el campo de presiones, tiene la misma forma de un chorro continuo que va adentrándose en el líquido, donde la presión es máxima en el centro y va disminuyendo hacia los extremos. Además se observa en las imágenes, que la presión es mayor en la parte de arriba del chorro, es decir, en el frente de ataque del chorro de aire, y disminuye hacia abajo, es decir, hacia la zona de inyección.

Según las figuras de la imagen 6.21, en el momento inicial de la inyección de la mezcla aire-partículas, se produce un alza de presión, necesaria para vencer la inercia, que en este caso se trata de la presión hidrostática. Este frente de máxima presión se desplaza hacia arriba a medida que el frente de ataque del aire inyectado asciende. Además, al comienzo, esta zona de presión máxima, aparece como una forma circular, la que luego se deforma, alargándose con el transcurso del tiempo. En las imágenes se aprecia esta zona de presión con el color rojo.

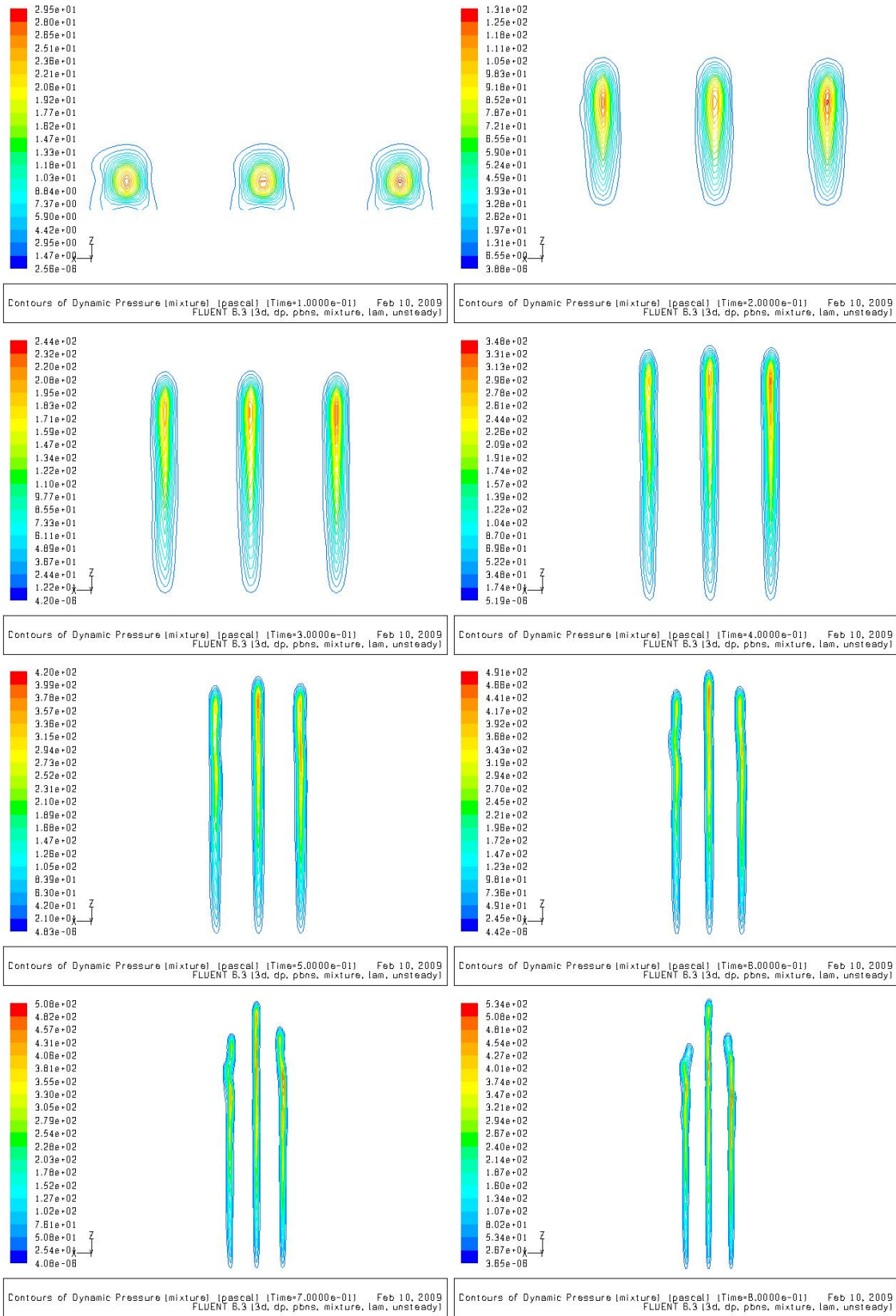


Figura 6.21: Isobaras del campo de presión en la inyección para tiempos de, $t = 0,1$ [s], $t = 0,2$ [s], $t = 0,3$ [s], $t = 0,4$ [s], $t = 0,5$ [s], $t = 0,6$ [s], $t = 0,7$ [s], $t = 0,8$ [s]

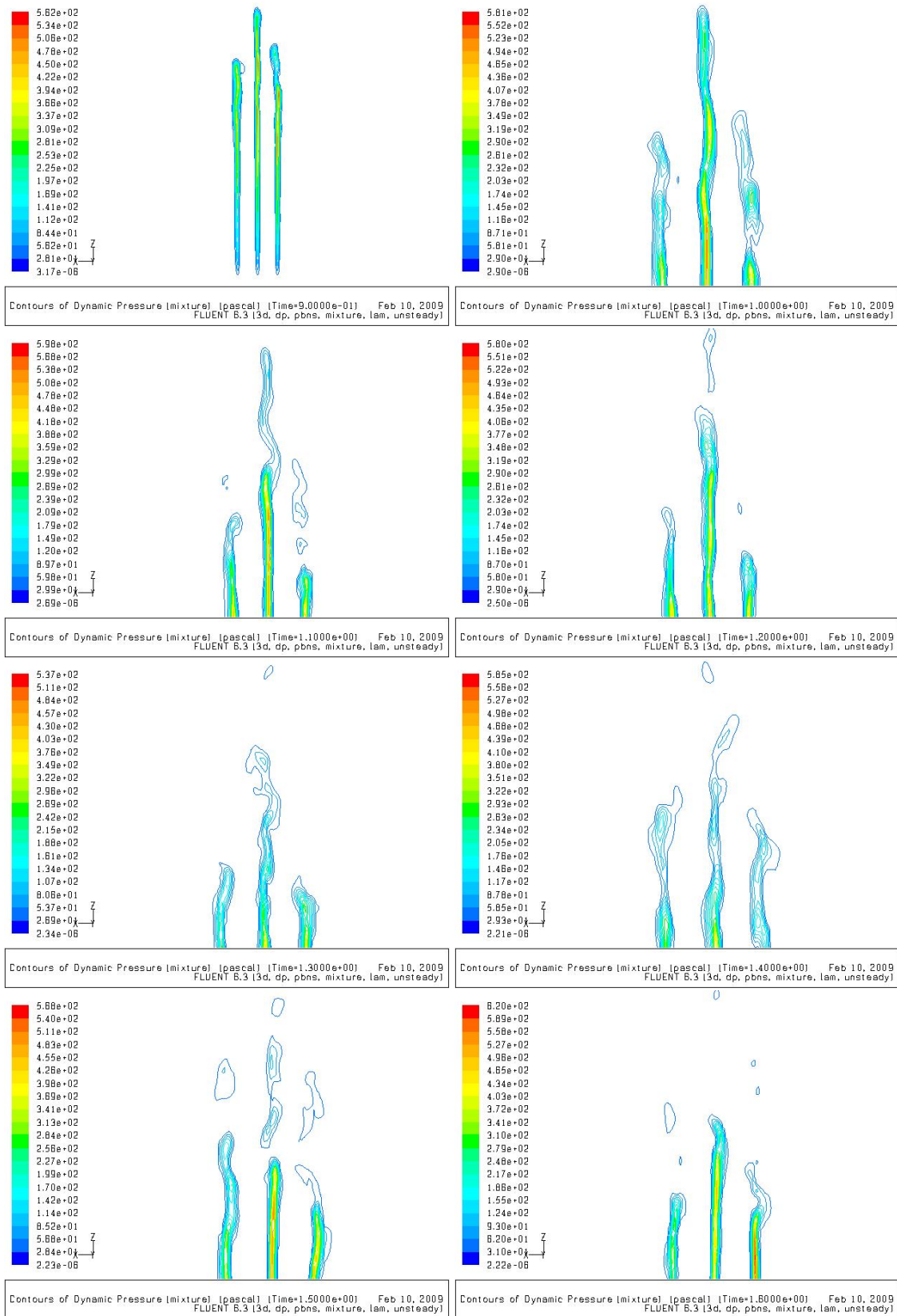


Figura 6.22: Isobaras del campo de presión en la inyección para tiempos de, $t = 0,9$ [s], $t = 1$ [s], $t = 1,1$ [s], $t = 1,2$ [s], $t = 1,3$ [s], $t = 1,4$ [s], $t = 1,5$ [s], $t = 1,6$ [s]

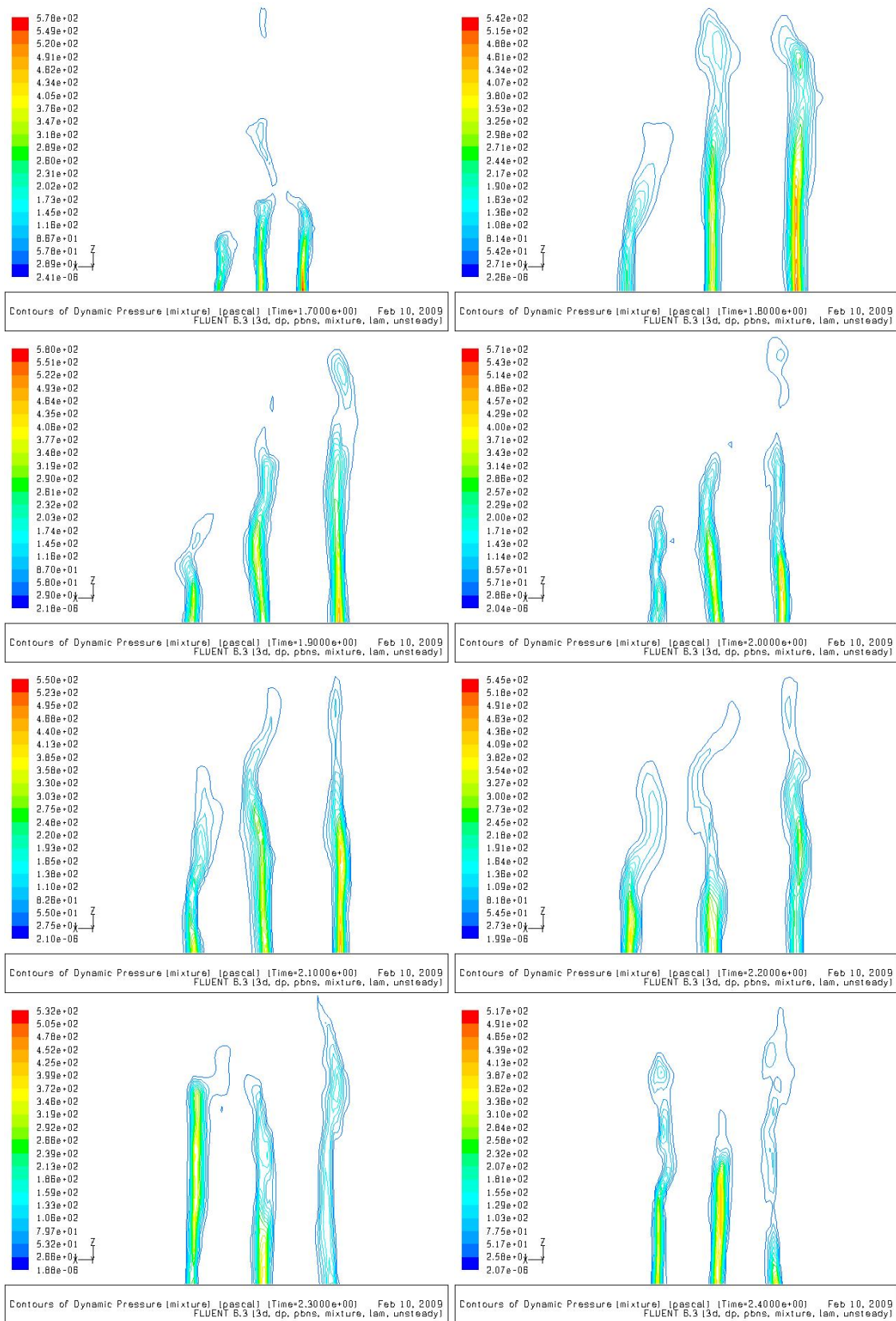


Figura 6.23: Isobaras del campo de presión en la inyección para tiempos de, $t = 1,7$ [s], $t = 1,8$ [s], $t = 1,9$ [s], $t = 2$ [s], $t = 2,1$ [s], $t = 2,2$ [s], $t = 2,3$ [s], $t = 2,4$ [s]

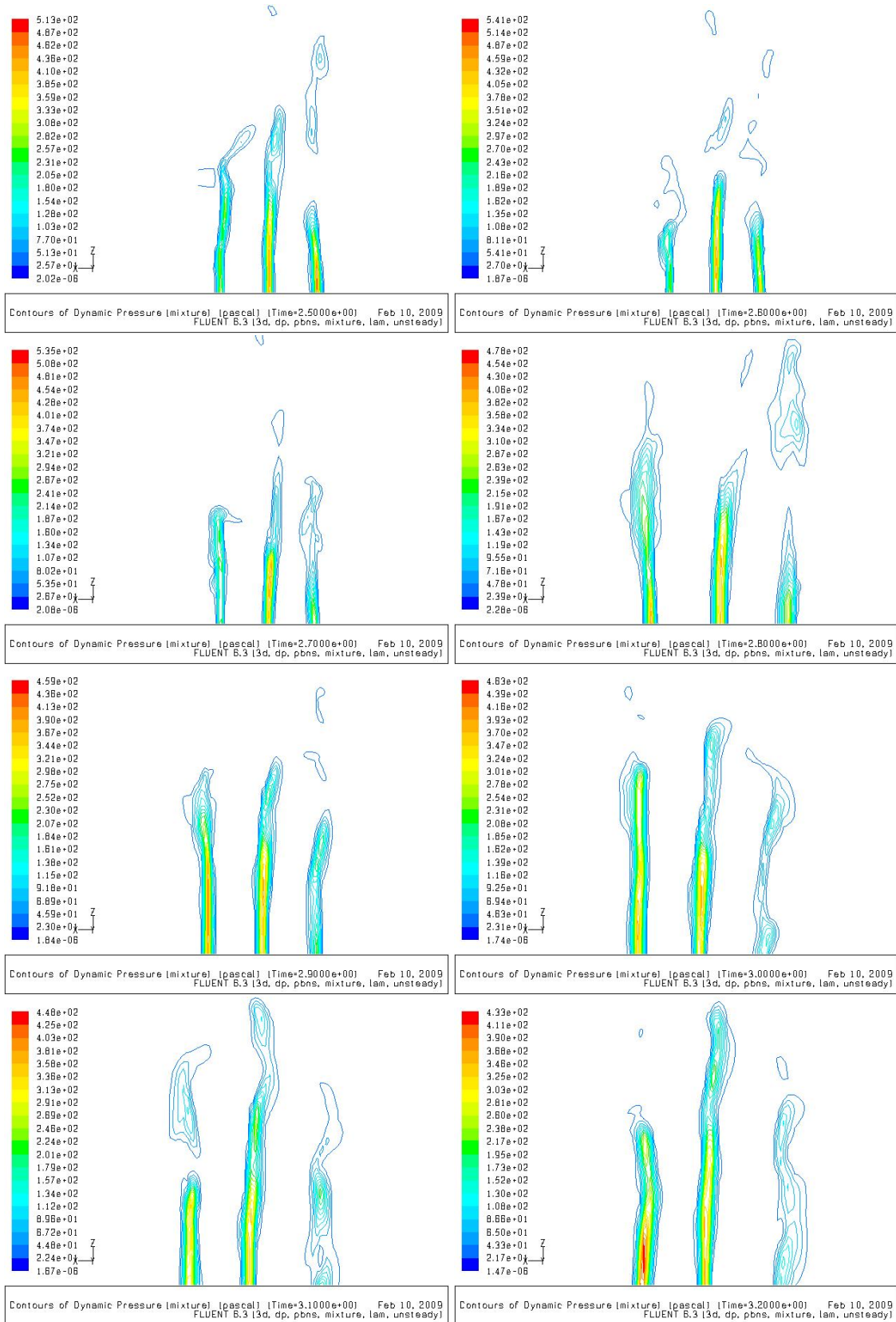


Figura 6.24: Isobaras del campo de presión en la inyección para tiempos de, $t = 2,5$ [s], $t = 2,6$ [s], $t = 2,7$ [s], $t = 2,8$ [s], $t = 2,9$ [s],

$t = 3$ [s], $t = 3,1$ [s], $t = 3,2$ [s]

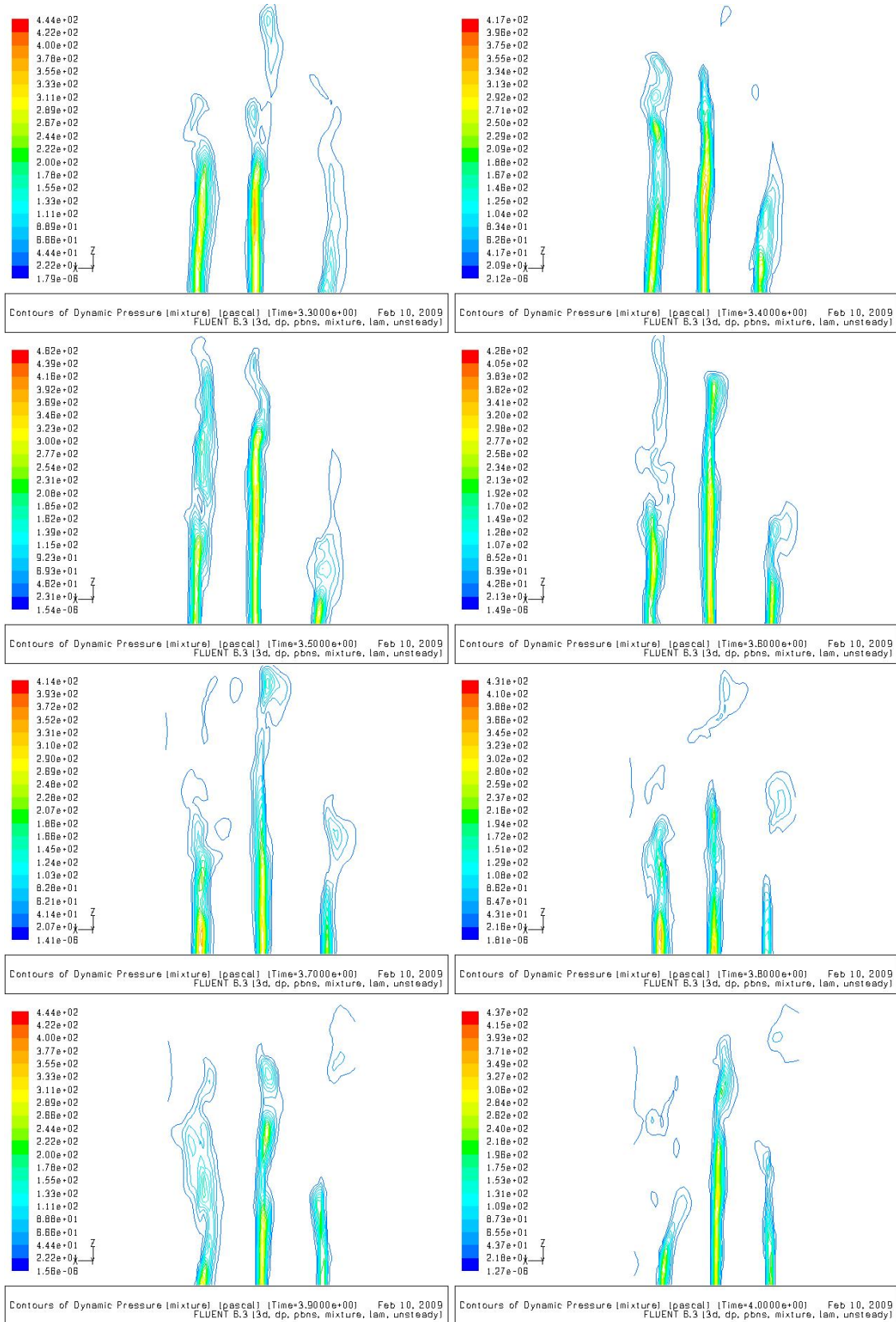


Figura 6.25: Isobaras del campo de presión en la inyección para tiempos de, $t = 3,3$ [s], $t = 3,4$ [s], $t = 3,5$ [s], $t = 3,6$ [s], $t = 3,7$ [s],

$t = 3,8$ [s], $t = 3,9$ [s], $t = 4$ [s]

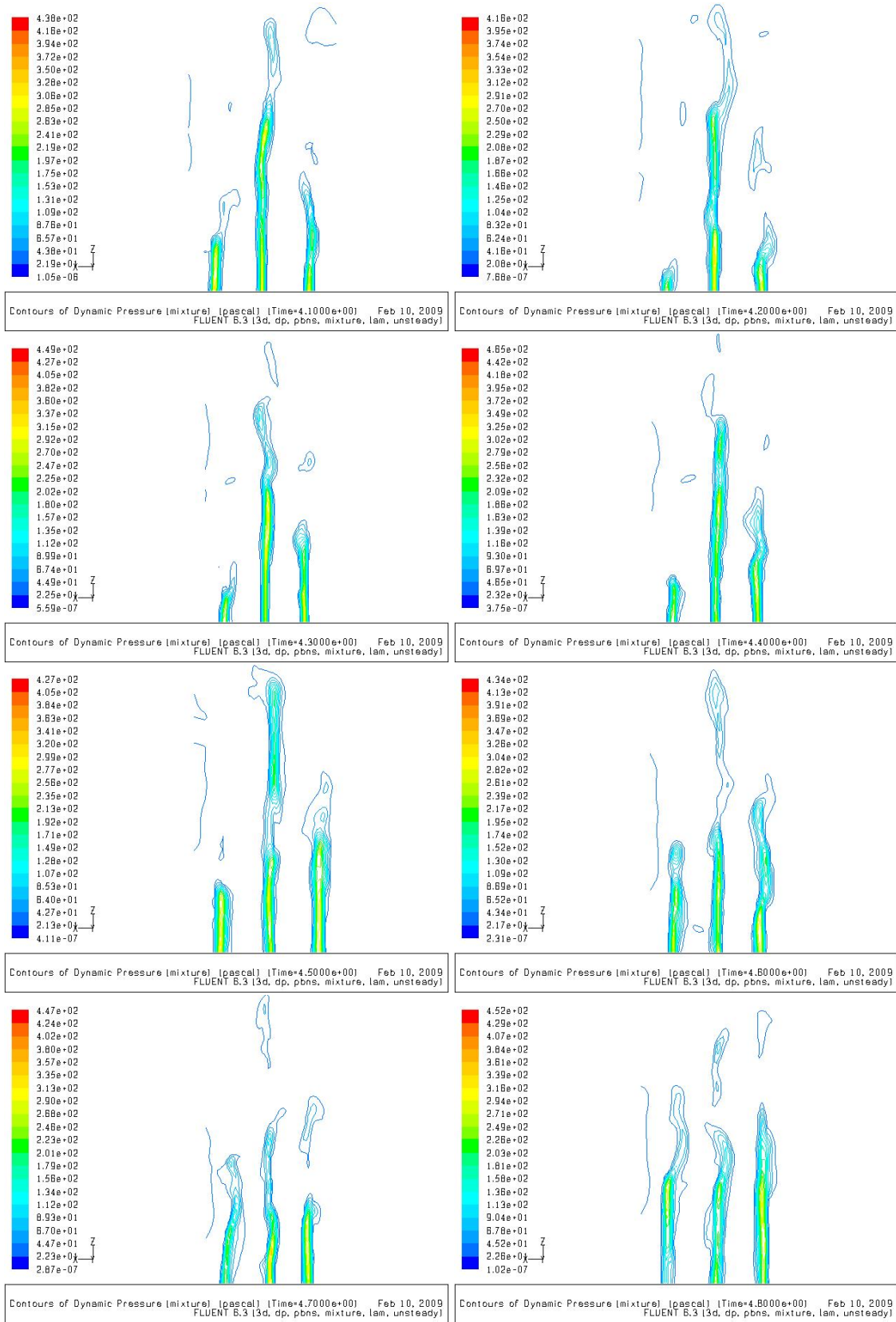


Figura 6.26: Isobaras del campo de presión en la inyección para tiempos de, $t = 4,1$ [s], $t = 4,2$ [s], $t = 4,3$ [s], $t = 4,4$ [s], $t = 4,5$ [s], $t = 4,6$ [s], $t = 4,7$ [s], $t = 4,8$ [s]

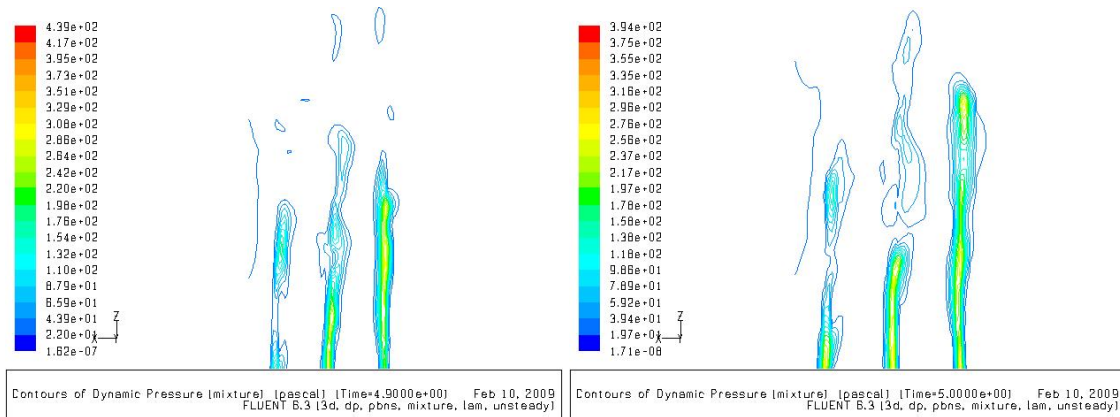


Figura 6.27: Isobaras del campo de presión en la inyección para tiempos de, $t = 4,9$ [s], $t = 5$ [s]

En las imágenes del campo de presiones, se puede notar también la pérdida de estabilidad del chorro a partir 1 [s]. Se puede ver como se desprenden algunas partes de éste para iniciar la mezcla de las fases. A simple vista se observa la separación de cierta vorticidad del chorro principal, las que se aprecian como zonas de baja presión. Naturalmente, estas zonas de baja presión significa un aumento en la velocidad, lo que ayuda a acelerar los movimientos de las especies involucradas en dicha zona, logrando mezclarse el del aire con el agua. Se había mencionado que, a partir de este instante comenzaba una etapa de mezcla, situación que continúa así hasta el final de la simulación.

Si bien, la zona de presión máxima, se ubica en todo momento en la parte de arriba del chorro, el valor de ésta no permanece constante como se puede observar en las figuras del campo de presiones. Lo mismo ocurre con la zona de presión mínima, ya que a pesar de que ésta siempre se encuentra en las partes externas e inferiores del chorro, también cambia su valor en el tiempo. Esta situación se aprecia mejor a través del gráfico de la figura 6.28 que muestra la variación de la presiones máxima y mínima en el tiempo.

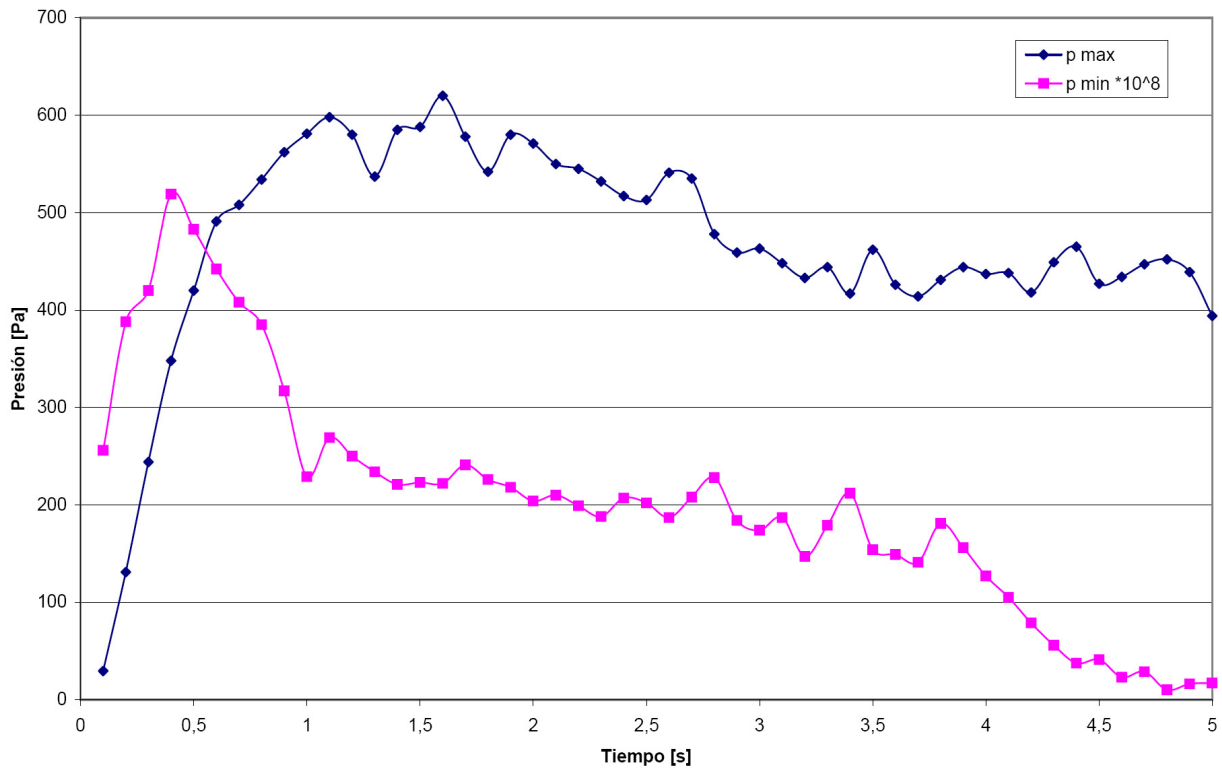


Figura 6.28: Variación de las presiones máxima y mínima en el tiempo

La curva azul, que corresponde a la zona de máxima presión y que se ubica en la punta del chorro, crece linealmente en el primer segundo. Hay que recordar que este intervalo de tiempo corresponde desde la inyección del aire-partículas, hasta el principio de la mezcla. Por lo tanto se esperaría un aumento de la presión en esa parte para vencer la resistencia del agua, junto con una disminución de la velocidad a medida que el chorro avanza a través del líquido. Luego, a partir de este primer segundo, instante en que comienza a mezclarse el polvo con el agua, el movimiento del medio en esa zona se torna caótico. Entonces, la presión máxima comienza a disminuir de forma paulatina hasta los 5 [s]. Sin embargo, esta disminución es a través de perturbaciones que se presentan en pequeñas alzas y bajas de la presión máxima, como se puede ver en la figura 6.28.

Por otra parte, la curva rosa, que corresponde a la variación de la zona de presión mínima y que se ubica en la entrada del chorro aproximadamente, sufre un aumento más rápido de tipo lineal, alcanzando un máximo, para bajar, también de forma rápida y lineal, dentro del primer segundo, para posteriormente comenzar a tener una disminución paulatina, con perturbaciones, de la misma forma como lo hace la variación de presión máxima. A diferencia de ésta, la zona de mínima presión ocupa un lugar fijo en el espacio, siendo que la zona máxima se va desplazando hacia arriba con el ascenso del chorro.

En resumen, los resultados más importantes del estudio del campo de presiones se muestran a continuación:

Tabla 6.4: Resultados del campo de presiones

Zona máxima presión	max	620 [Pa]
	min	30 [Pa]
	presión final	394 [Pa]
Zona máxima presión	max	$5,19 \cdot 10^{-6}$ [Pa]
	min	$1,7 \cdot 10^{-7}$ [Pa]
	presión final	$1,7 \cdot 10^{-7}$ [Pa]

Capítulo 7

Discusión

7.1. Modelos utilizados

Se puede decir que las simulaciones resultaron satisfactorias, sin embargo, se esperaba poder entregar resultados para las dos fenomenologías; la dinámica del material particulado y el régimen de burbujas, a través de un solo modelo y no dos, como ocurrió, los cuales fueron el modelo Mixture y el modelo VOF. Se observa que el modelo VOF es muy bueno caracterizando el fenómeno de las burbujas; ya sea desde su nacimiento hasta la llegada de éstas a la superficie y su interacción con ésta. También grafica muy bien las superficies libres, lo que se aprecia en el oleaje provocado por la llegada de las burbujas arriba.

En el caso de modelar la dinámica del material particulado, el modelo VOF no lo permite, por lo que se ha recurrido al modelo Mixture. Este modelo permite setear el tamaño de las partículas además de su concentración. La inyección de las partículas en el líquido, según este modelo, no es en forma de burbujas como se esperaría, sino como en un chorro continuo que va desarmándose a partir de cierto instante.

Sin embargo, el resultado de interés es la interacción del polvo con el líquido y si este último es capaz de retener a las partículas antes de que lleguen a la superficie. Los resultados de las simulaciones arrojan que esto es posible, pero teniendo en cuenta que se han simulado los 5 [s] iniciales, los que muestran que el régimen de burbujas no ha alcanzado una estabilidad completa, existiendo mucho movimiento por parte de la tres fases involucradas, lo que favorece la mezcla, en particular del polvo con el líquido. Más allá de los 5 [s] iniciales no es posible asegurar que, al alcanzar estabilidad, el movimiento de las burbujas ayude con la mezcla de las especies. Existe una posibilidad de que las burbujas continúen su viaje a la superficie permitiendo que el material particulado escape, sin poder ser capturado.

7.2. Eficiencia

Los resultados han mostrado que a partir del primer segundo, comienzan a producirse movimientos, aproximadamente en la mitad del dominio, que van en distintas direcciones. Esto se traduce en choques entre las burbujas, que provocan rompimientos de éstas y por lo tanto, la captura del polvo por el agua. El polvo inyectado se adentra en el líquido y queda atrapado en éste. Por lo tanto, se observa que el polvo es capturado casi en un 100 %, en medio de la zona ocupada por el líquido.

A pesar de que el régimen de burbujas, muestra que, dentro del tiempo de simulación, las burbujas se las arreglan para llegar a la superficie, el material particulado dentro de ellas, es retenido completamente en el agua y no alcanza a llegar a la superficie. Este resultado indica que el rendimiento alcanzado en la prueba computacional es de un 100 %, es decir, todo el material particulado que ha ingresado hasta los 5 [s] ha sido capturado en el líquido y, el aire que pudo atravesar el agua hasta la superficie, salió completamente purificado.

Este resultado cabe ser discutido, debido a lo tajante de su significado. Es muy probable que el hecho de trabajar con dos modelos fuera la causa de esto. También, es probable que el modelo Mixture, utilizado para el modelamiento de las partículas, no haya sido capaz de caracterizar perfectamente la complejidad del fenómeno.

Otro punto a tener en cuenta es que el hecho de que las figuras 6.6 a 6.11, en las cuales se muestra la fracción de volumen correspondiente a la fase polvo, existen valores de tolerancia, los que se pueden ver a la izquierda de las imágenes, en los colores. Existe un margen que corresponde a la ausencia total de polvo en la simulación y al valor mínimo que el programa es capaz de mostrar, el cual corresponde a $8,25 \cdot 10^{-6}$. Cualquier celda con una fracción de volumen de polvo por debajo de este valor, no es capaz de distinguirse de las demás fases y podría haber escapado por la superficie.

Si suponemos que la fracción de volumen de polvo que escapó corresponde al valor mencionado anteriormente, es posible calcular la eficiencia de captación de partículas obtenida de la simulación. Si la concentración de polvo ingresada es de $330 \text{ } [\mu\text{g}/\text{m}^3]$, el volumen total de polvo que ingresa en los 5 [s] de la simulación es de $1,95 \cdot 10^{-5} \text{ } [\text{m}^3]$. El volumen de polvo que logra escapar en el último segundo de la simulación, que es a partir de cuando las burbujas llegan a la superficie, suponiendo la fracción de volumen dicha, es de $3,22 \cdot 10^{-11}$.

De acuerdo a esto, el rendimiento del aparato, considerando la relación de lo que entra y lo que sale, es de un 99,9 %. De cualquier manera, este rendimiento sería bastante alto para lo que se esperaría. Por lo tanto, para obtener resultados más fidedignos es preferible recolectar datos a través de la construcción de un equipo prototipo, para probar la eficiencia del aparato en una experiencia práctica.

Capítulo 8

Conclusiones

- Respecto a los resultados, lo primero que se arroja es que existen dos regímenes. El primero, que va desde el inicio hasta $t=1$ [s], corresponde al ingreso del chorro al agua hasta que éste pierde estabilidad. El segundo régimen corresponde al momento en que se desestabiliza el chorro y comienza la mezcla de las fases. El polvo que fue inyectado continúa mezclándose con el agua hasta el final de la simulación, es decir, hasta $t=5$ [s].
- Según la prueba de la simulación, el líquido, que en este caso corresponde a agua, es capaz de retener las partículas, siempre y cuando el movimiento del régimen ayude a la mezcla. Por sí solo, las partículas no quedarán retenidas en el líquido. De modo que un equipo de estas características debería contar con una especie de deflectores que produzca choques entre las fases, o contar con algún dispositivo que pueda alborotar el líquido en el estanque.
- Los resultados obtenidos por la simulación caracterizan muy bien el fenómeno de la dinámica de las burbujas, especialmente a través del modelo VOF. Se ha observado que las burbujas no son estables, sino tambaleantes, lo que es esperado si se observa, las características de las burbujas según la figura 2.9.
- De acuerdo a lo recopilado en los antecedentes y los resultados de la simulación, se concluye que un equipo de las características presentadas en esta memoria, funcionando sólo con agua como filtro principal, posee un rendimiento muy alto (99,9 %), la limpieza lograda es prácticamente perfecta. Las fuerzas que actúan en el sistema, producto de los movimientos caóticos de las burbujas, ayudan a la mezcla y hacen que el material particulado pueda ser mojado.
- Con respecto a la factibilidad de atrapar partículas, la simulación predice que si es posible modelando únicamente la naturaleza física del fenómeno. Sin embargo, existen otros aspectos de carácter químico que son necesarios incluir en el modelo, como los compuestos de los aditivos reactivos propuestos, para realizar un análisis más completo a través de una simulación computacional.

- A pesar de lo arrojado por las simulaciones computacionales, es preferible, para tener más información de la efectividad del proceso, la construcción de un prototipo y obtener resultados de manera experimental. Se recomienda realizar pruebas con agua sola y luego con distintos aditivos que reaccionen con el contaminante, ya que se puede decir que la diferencia entre estas dos situaciones sería interesante de probar. Además, se debe comprobar, con y sin agitación del medio, que el movimiento ayuda a la mezcla.
- En cuanto a lo computacional, pese a la sencillez de los modelos utilizados, la realización de las simulaciones necesitaron un cantidad de recursos importantes. El tiempo de simulación para obtener una simulación de 5 [s] fue de 5 días aproximadamente, necesitándose además de gran espacio, tanto de memoria de guardado, como de memoria RAM. Fueron necesarios computadores con procesadores poderosos y memoria RAM de 4 GB aproximadamente.

Bibliografía

- [1] Sandoval H., Prendez M., Ulriksen P. *Contaminación Atmosférica de Santiago, Estado Actual y Soluciones*. Comisión especial de Descontaminación de la Región Metropolitana, 1993, cap. 4, 5, 11.
- [2] Azbel D. *Two-phase Flows in Chemical Engineering*. Cambridge University Press, 1981, cap. 2.
- [3] Shaikh A., Al-Dahhan M.H. *A Review on Flow Regime Transition in Bubble Columns*. International Journal of Chemical Reactor Engineering, Vol. 5, 2007.
- [4] CONAMA R.M. *Evolución de la Calidad del Aire de Santiago 1997/2004*. Santiago de Chile, 2004.
- [5] Fornai et al. *Air Cleaning Apparatus and Method for Cleaning Air*. US Patent N° 6.843.835 B2, Enero, 2005.
- [6] Pellegrin R. *Method and means for filtering an air stream with an aqueous froth*. US Patent N° 6.616.733 B1, Septiembre, 2003.
- [7] Córdova M. *Simulación numérica de la inyección gaseosa en un líquido*. Memoria de Ingeniero Civil Mecánico. Universidad de Chile. 2002
- [8] Coulson J. M., Richardson J. F. *Chemical Engineering*. 4th ed. Vol. 2, Particle technology and separation process, 1991.
- [9] Defay R., Prigogine I. *Surface Tension And Adsorption*. English edition, Longmans, Green & Co Ltd, 1991.
- [10] Donoso F. *Apuntes Laboratorio de Máquinas I*. Departamento de Ingeniería Mecánica, Facultad de Ciencias Físicas y Matemáticas, Universidad de Chile, 1985.
- [11] *FLUENT 6.2 User's Guide*. FLUENT Incorporated. 2005
- [12] http://www.cepis.ops-oms.org/bvsci/e/fulltext/orienta2/lecc8/lecc8_3d.html
- [13] <http://www.cheresources.com/hclpicklezz.shtml>
- [14] http://www.servorecambios.com/ventilacion/c_4helicoidal_ha.shtml