



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO
PROGRAMA DE MAESTRÍA Y DOCTORADO EN INGENIERÍA
MECÁNICA TERMOFLUIDOS

***VELOCIMETRÍA POR SEGUIMIENTO DE SOMBRAS DE
PARTÍCULAS EN FLUJOS COMPRESIBLES GAS-SÓLIDO
EN TUBOS VERTICALES***

TESIS

QUE PARA OPTAR POR EL GRADO DE
DOCTOR EN INGENIERIA

PRESENTA:

CARLOS ECHEVERRÍA ARJONILLA

TUTORES PRINCIPALES

DRA. CATALINA E. STERN FORGACH, FACULTAD DE CIENCIAS UNAM

DR. JOSÉ ENRIQUE GUZMÁN VÁZQUEZ, IINGEN UNAM

COMITÉ TUTOR

DR. FRANCISCO JAVIER SOLORIO ORDAZ, FACULTAD DE INGENIERÍA UNAM

DR ROBERTO ZENIT CAMACHO, IIM-UNAM

CIUDAD DE MÉXICO, SEPTIEMBRE 2020



Universidad Nacional
Autónoma de México

Dirección General de Bibliotecas de la UNAM

Biblioteca Central



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

JURADO ASIGNADO:

Presidente: Dr. Francisco Javier Solorio Ordaz

Secretario: Dr. Gabriel Ascanio Gasca

1^{er}. Vocal: Dra. Catalina Elizabeth Stern Forgach

2^{do}. Vocal: Dr. Sergio Cuevas García


3^{er}. Vocal: Dr. José Enrique Guzmán Vázquez

Lugar o lugares donde se realizó la tesis: Ciudad de México.

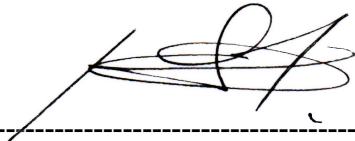
TUTORES DE TESIS:

Dra. Catalina Elizabeth Stern Forgach

Dr. José Enrique Guzmán Vázquez



FIRMA



FIRMA

Agradecimientos

A mis padres Yolanda y Carlos y a mi hermano Leonardo por su apoyo para poder continuar mis estudios, por darme fuerza para seguir adelante y por su cariño incondicional.

A David Porta, mi compañero de equipo y amigo, por continuar con el proyecto de investigación y soportar las largas horas de trabajo en el laboratorio, por sus ideas, por sus aportes al proyecto, por sus ganas por saber más, por las preguntas incómodas y por la célebre frase “¿qué, no puedes?”.

A mi tutora Caty por darme la oportunidad de continuar trabajando bajo su tutela y seguir creciendo, por creer en mí, por su paciencia, por su apoyo para generar conocimiento aunque este sea algunas veces en forma de dudas, por impulsarme a seguir aprendiendo, por darme la oportunidad de explotar mi curiosidad y creatividad.

A mi tutor Enrique por su apoyo para construir este proyecto desde cero y por creer en las ideas en papel y ayudarme a materializarlas. Y por sus aportes a mi crecimiento profesional.

A Gerardo Juárez y Alan Olvera por ayudarme a empezar la construcción del experimento.

A Alan Lobato por su apoyo en la realización de los experimentos y por las pláticas teóricas.

A Jonathan Hernández por su ayuda en la adquisición de señales.

Al Dr. Roberto Zenit por sus aportes a este trabajo, por sus críticas, observaciones y discusiones.

Al Dr. Francisco Solorio por sus preguntas y aportes.

Al jurado de mi trabajo quienes invirtieron tiempo en leer este trabajo, por sus comentarios y observaciones.

Al Dr. Marcos Ley por las largas discusiones sobre el análisis de los resultados y la física de este trabajo en particular y de cualquier otro problema físico.

Al Ing. David Santoyo por su apoyo en la construcción de la cámara de partículas.

A mis compañeros del Taller de Hidrodinámica y Turbulencia, a mis alumnos y a todos aquellos que participaron directa o indirectamente en la elaboración de este trabajo.

Al Instituto de Ingeniería por el espacio y apoyo para la elaboración de este proyecto.

Al Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología, CONACyT, por la beca que me otorgó para poder realizar mi doctorado.

A Emilio Martínez y al CEMIE Océano por su apoyo para concluir este proyecto y empezar el siguiente.

A la UNAM por todas las oportunidades que me ha proporcionado.

“An experiment is a question which science poses to Nature, and a measurement is the recording of Nature's answer.”

Max Planck

“See now the power of truth; the same experiment which at first glance seemed to show one thing, when more carefully examined, assures us of the contrary.”

Galileo Galilei

“There is no such thing as a failed experiment, only experiments with unexpected outcomes.”

Richard Buckminster Fuller

“The true worth of an experimenter consists in his pursuing not only what he seeks in his experiment, but also what he did not seek.”

Claude Bernard

“We who work in fluid mechanics are fortunate, as are our colleagues in a few other fields such as optics, that our subjects are easily visualized”.

Milton Van Dyke

Índice

Índice	I
Lista de figuras	III
Lista de gráficas.....	VI
Lista de tablas.....	VIII
Nomenclatura	IX
Resumen	XI
1. Introducción.....	1
1.1. Flujo de Fanno	8
1.1.1. Flujo de Fanno en una tubería cilíndrica (flujo adiabático con fricción)	8
1.1.2. Ecuaciones finales de trabajo y primera estimación	11
2. Diseño óptico y caracterización de las partículas.....	14
2.1. Pruebas de visualización dentro del tubo.....	14
2.2. Montaje óptico	17
2.2.1. Iluminación y alineación	18
2.3. Partículas	19
3. Montaje Experimental.....	22
3.1. Estructura.....	22
3.2. Tubería.....	23
3.3. Diseño y construcción del sembrador de partículas.....	25
3.3.1. Motor a pasos (Micro pasos).....	27
3.3.2. Caracterización del flujo másico de partículas.....	27
3.3.3. Instalación en el experimento	29
3.4. Separador ciclónico.....	29
4. Velocimetría por Seguimiento de Sombras de Partículas (PSTV)	31
5. Instrumentación del experimento	35
5.2. Caracterización del flujo de aire y análisis	37

5.3. Sincronización de Cámara-Led, Cámara de Partículas y Sistema de Adquisición de Datos.....	42
6. Experimentos.....	44
6.1. Resultados y análisis.....	46
6.2. Resultados a partir de los transductores.....	48
6.3. Resultados cualitativos del sembrado del Flujo	52
6.4. Resultados de PSTV	54
6.5. Comparación de velocidades de las partículas y el gas	58
6.6. Interacción gas-partículas	61
7. Conclusiones	65
8. Trabajo a futuro	67
9. Referencias	68
10. Apéndices	i
10.1. Apéndice 1.....	i
10.2. Apéndice 2.....	xxiv
10.3. Apéndice 3.....	xxviii
10.4. Apéndice 4.....	xxix
10.5. Apéndice 5.....	xxxiii
10.6. Apéndice 6.....	xlviii

Lista de figuras

Figura 1.1.- Tapón de cristales de hidrato en tubería de Petrobras, imagen tomada de Sloan et al. (2011).....	1
Figura 1.2.- Esquemas del problema de la formación de hidratos, imagen tomada de Sloan et al. (2011).....	2
Figura 1.3.- Estudio de la formación de taponamiento por hidratos en laboratorio, imagen tomada de Rogers 2015.	2
Figura 1.4.- Esquema de la formación de hidratos en un sistema trifásico de agua, aceite y gas. Muestra cómo las gotas de agua con aceite son puntos de nucleación que promueven la formación de hidratos. Se cree que las partículas sólidas también podrían ser puntos, imagen tomada de Sloan et al. (2011).	3
Figura 1.5.- Volumen de control para un flujo de área constante con fricción.	8
Figura 1.6.- Esquema del tubo, y variables principales del problema.	12
Figura 1.7.- Línea de Fanno, imagen modificada a partir de Saad (1985).	13
Figura 2.1.- Trazado de rayos que atraviesan un tubo transparente, imagen modificada a partir de Lowe y Kutt (1992).	14
Figura 2.2.- Superior, ejemplo de desviación de rayos cuando se utiliza una camisa de visualización para ver dentro del tubo, el efecto es como de lente cilíndrica. Central, consideración de rayos únicamente a partir del objeto de estudio. Inferior, se muestra que el tamaño del área de estudio es pequeña, ocasionando que los rayos no se desvíen lo suficiente por la curvatura de la pared.	15
Figura 2.3.- Resultados de visualización de patrón dentro del tubo acrílico.	16
Figura 2.4.- Base de alineación de la Cámara-LED. La base se construyó con dos tableros de MDF de alta densidad de 25 mm de espesor.	17
Figura 2.5.- Vista lateral de la base para Cámara-LED.	17
Figura 2.6.- Prueba de alineación del plano óptico de la cámara respecto al centro del LED.	18
Figura 2.7.- Homogeneidad de la iluminación 1280 x 800 píxeles.	18
Figura 2.8.- Izquierda. Fotograma de partículas de vidrio montadas sobre un porta objetos, utilizando la base Cámara-Led Figura 14. Derecha. Fotograma con alto contraste.	19
Figura 2.9.- Conteo de partículas.	19
Figura 3.1.- Izquierda, estructura antes de la alineación. Centro, instalación de la tubería, Derecha, estructura fija al suelo y la pared, la distancia de separación entre las patas es de 92 cm. La estructura amarilla es un andamio para facilitar el acceso al experimento.	22

Figura 3.2.- Izquierda, puerto de medición desarmado y cople de tubo, centro puerto de medición armado en el tubo de acrílico y derecha, montaje de cople con tubo fijo a soporte de pared.	23
Figura 3.3.- Soporte de codo y soporte de tubo instalados. La alineación de estas dos piezas se hizo respecto a la ubicación de la base de la cámara y de su plataforma.	24
Figura 3.4.- Tornillo sinfín, maquinado en bronce.	25
Figura 3.5.- Esquemático del sembrador de partículas, los planos técnicos se incluyen en el Apéndice 1.	26
Figura 3.6.-Izquierda, cámara de partículas original, centro y derecha, cámara de partículas modificada.	26
Figura 3.7.- Instalación de la cámara de partículas.	29
Figura 3.8.- Izquierda, se muestra el último puerto de medición con la malla metálica y con el forro para cojines, centro, instalación de separador ciclónico y derecha, se muestra el tubo de salida.	30
Figura 4.1.- Arreglo típico de PSV y simultáneamente arreglo shadowgraph simple, se muestran distancias reales del arreglo utilizado para este trabajo. Este arreglo coincide también con el arreglo para PSTV.	31
Figura 5.1.- Esquema del experimento completo, ubicación de puertos de medición en configuración presión-temperatura en cada uno.	35
Figura 5.2.- Esquema de funcionamiento del disparador.	42
Figura 5.3.- Diagrama de tiempos de las señales del disparador, la válvula está conectada a un interruptor normalmente cerrado, cuando la válvula llega a la posición deseada, se cierra el circuito y se activa el adquisidor de datos.	43
Figura 5.4.- Circuito de sincronización y control.	43
Figura 6.1.- Puntos de medición con la cámara rápida.	44
Figura 6.2.- Superior flujo correspondiente a la apertura 1. Inferior flujo correspondiente a la apertura 2. A corresponde al primer cuadro y B a al siguiente cuadro 400×10^{-9} s después. Se puede observar que para el flujo obtenido con la apertura 1 se tiene en general más partículas por cuadro. También se observa que en este tiempo el desplazamiento es del orden de 6 pixeles para la apertura 2 y de 2 pixeles para la apertura 1.	52
Figura 6.3.- Separación entre cuadros derechos e izquierdos 0.278 ms. Arriba, se puede ver una partícula rotando. Centro y Abajo, dos partículas con diferentes velocidades.	53
Figura 6.4.- Vista aérea de la zona de medición, ejemplo de desplazamientos de partículas fuera del DOD. Se muestran los dos casos posibles en donde la partícula puede	

estar desenfocada en el t_1 y enfocada en t_2 y viceversa, recordando que $t_2 - t_1 = 400$ ns.	54
Figura 6.5.- Distribución del granular dentro de la tubería.	60
Figura 6.6.- Número de Mach contra número de Reynolds relativos a la partícula. Se muestran las regiones para los regímenes incompresibles, compresibles, condición de deslizamiento y transición. Figura modificada a partir de Michaelides et al. (2017).	62

Lista de gráficas

Gráfica 2.1.- Histograma de tamaños de partículas medidos.....	20
Gráfica 2.2.- Circularidad de las partículas.....	21
Gráfica 3.1.- Resultados de masas promedio contra tiempo para diferentes revoluciones por minuto. Se muestran los ajustes lineales obtenidos. Las desviaciones estándar para cada punto no son mayores a 0.2 g, por lo que no se pueden ver en la gráfica.....	28
Gráfica 3.2.- Gastos másico en función de la velocidad de rotación del tornillo. La pendiente del ajuste lineal representa la cantidad de material que sale en una revolución.....	28
Gráfica 4.1- Profundidad de correlación obtenida a partir de la Ecuación (26).....	33
Gráfica 4.2.- Tiempos de relajación para las partículas utilizando el intervalo de la distribución medida de tamaños (Gráfica 2.1), calculadas a partir de la Ec. (27) y considerando a las partículas como esféricas.	34
Gráfica 5.1.- Ejemplo de señales de presión adquiridas, se observa el comportamiento de la presión en el tiempo de la apertura 7. El subíndice indica el puerto de medición.	37
Gráfica 5.2.- Ejemplo de señales de temperaturas adquiridas, se observa el comportamiento de la temperatura en el tiempo de la apertura 7. El subíndice indica el puerto de medición.	37
Gráfica 5.3 Ejemplo de señal de flujo másico, se observa el comportamiento del flujo másico en el tiempo de la apertura 7.....	38
Gráfica 5.4.- Superior: Velocidad del aire contra apertura. Inferior: Número de Mach contra apertura.	40
Gráfica 5.5.- Comparación entre los resultados experimentales y la teoría de Fanno para la presión, temperatura y número de Mach.	41
Gráfica 6.1.- Señal de flujo másico completa. Se observan los intervalos de tiempo t_1 , t_2 y t_3	46
Gráfica 6.2.- Señales de presión completas de los 5 puertos de medición. El subíndice indica el puerto de medición.	47
Gráfica 6.3.- Señales de temperatura completas de los 5 puertos de medición. El subíndice indica el puerto de medición.....	47
Gráfica 6.4.- Flujos másicos de todos los experimentos.	48
Gráfica 6.5.- Se muestran los valores promedios de velocidad y número de Mach por puerto de medición para el gas, las barras de error corresponden a las desviaciones estándar.....	49
Gráfica 6.6.- Señales de presión y temperatura. El subíndice indica el puerto de medición.	50

Gráfica 6.7.- Velocidades para los diferentes puertos de medición. La línea segmentada indica el inicio de funcionamiento de la cámara de partículas. El subíndice indica el puerto de medición.	50
Gráfica 6.8.- Flujo másico y velocidades. La línea segmentada indica el inicio de funcionamiento de la cámara de partículas. El subíndice indica el puerto de medición.	51
Gráfica 6.9.- Histograma de velocidades de partícula en la dirección x	55
Gráfica 6.10.- Se muestran los valores promedios de velocidad y número de Mach por puerto de medición para las partículas, las barras de error corresponden a las desviaciones estándar.	56
Gráfica 6.11.- Histograma de velocidades de las partículas para cada altura.	57
Gráfica 6.12.- Velocidades de las partículas en las diferentes alturas.	57
Gráfica 6.13.- Velocidades promedio de las partículas y el gas.	58
Gráfica 6.14.- Velocidades del gas y de las partículas en el tiempo para cada altura.	59
Gráfica 6.15.- Ejemplo de Velocidades de partículas y del gas en H ₂ . No se observa la existencia de una correlación entre las dos velocidades.	59
Gráfica 6.16.- Coeficiente de arrastre en las diferentes alturas.	64

Lista de tablas

Tabla 1.1.- Trabajos experimentales y los valores de las variables de interés. Imagen tomada de Naren y Ranade (2011).	5
Tabla 1.2.- Lista de trabajos experimentales, muestra la técnica utilizada y características del sistema utilizado así como el gasto y material sólido utilizado. Imagen tomada de Bhusarapu et al. (2006).	6
Tabla 1.3.- Parámetros conocidos y calculados con la ayuda de la teoría de Fanno, estimando $Re \sim 18000$.	12
Tabla 5.1.- Se presentan los resultados teóricos obtenidos con la teoría de Fanno así como sus errores porcentuales respecto a las mediciones promedio realizadas, se presentan los resultados para las 7 aperturas, se utilizaron los valores de medición del puerto 4 y se muestran los resultados para el puerto 1 de medición.	39
Tabla 5.2.- Valores del número de Reynolds y factor de fricción, para cada apertura.	41
Tabla 6.1.- Cuadros analizados, partículas detectadas, correlacionadas y eliminadas.	54
Tabla 6.2.- Resultados de los números de Mach, Knudsen y Reynolds relativos a la partícula por alturas.	62
Tabla 6.3.- Coeficientes y exponentes para diferentes números de Mach y flujo no rarificado, los valores resaltados en azul son los valores que se utilizan en este trabajo.	63
Tabla 6.4.- Coeficientes de arrastre por altura.	63

Nomenclatura

A	Área de sección transversal de la tubería [m ²].
A	Área proyectada de la partícula [m ²].
c	Velocidad del sonido [m/s].
C_D	Coefficiente de arrastre.
c_p	Calor específico a presión constante [J/mol K].
c_v	Calor específico a volumen constante [J/mol K].
D	Diámetro del tubo [m].
d_p	Diámetro de la partícula [m].
$\frac{D}{Dt}$	Derivada material.
f	Factor de fricción de Darcy.
\bar{f}	Factor de fricción promedio.
$f^\#$	Número adimensional f .
g	Aceleración de gravedad [m/s ²].
G	Flujo volumétrico [kg/m s].
h	Entalpía [kgm ² /s ²].
Kn_p	Número de Knudsen relativo a la partícula.
M	Número de Mach
M_p	Número de Mach relativo a la partícula.
m	Magnificación.
\dot{m}	Flujo másico [kg/s].
n	Índice de refracción.
p	Presión [Pa].
P	Perímetro de mojado [m]
P	Perímetro de la partícula [m]
R	Constante específica del aire seco [J /kg K]
Re	Número de Reynolds.
Re_p	Número de Reynolds relativo a la partícula.
T	Temperatura [K].
U_g	Velocidad del gas [m/s].
U_p	Velocidad de partícula [m/s].
\vec{V}	Vector de velocidad [m/s].
u	Componente de velocidad en la dirección x .

v	Componente de velocidad en la dirección y.
w	Componente de velocidad en la dirección z.
Z	Factor de compresibilidad.
$2z$	Profundidad de correlación.

Letras Griegas

γ	Cociente de calores específicos
δ_{ij}	Delta de Kronecker
ε	Parámetro umbral, relación de la intensidad de la partícula en el eje para alguna profundidad de correlación a la intensidad en el foco ($2z = 0$).
κ	Conductividad térmica [W/(m·K)].
λ	Longitud de onda predominante [m].
λ	Constante de Lamé [Pa s].
μ	Viscosidad dinámica [Pa s].
ρ	Densidad del gas [kg/m ³].
ρ_p	Densidad de la partícula [kg/m ³].
τ_w	Esfuerzo de corte en la pared de la tubería [Pa].
τ_s	Tiempo de relajación de la partícula [s].
ϕ	Disipación viscosa.

Resumen

En este trabajo se estudia experimentalmente un flujo compresible de aire sembrado con partículas de vidrio polidispersas dentro de una tubería vertical.

Se construyó la infraestructura necesaria para poder realizar el experimento que incluye: estructura de la tubería, puertos de medición, cámara de inyección de partículas, soporte para Cámara-LED y se diseñó e implementó un sistema de sincronización entre transductores, cámara rápida y cámara de inyección de partículas.

Se caracterizaron 7 flujos de aire con transductores de presión, temperatura y flujo másico y se compraron los resultados con la teoría de Fano. Se obtuvo que para los primeros cuatro el error relativo es menos al 3%. El experimento tuvo una repetibilidad del 91%.

Se determinó la distribución de tamaños y circularidad de las partículas utilizando un método óptico empleado en microscopía.

Se estudió el flujo de partículas en cuatro alturas diferentes con la técnica de Velocimetría por Sombras de Partículas (PSTV por sus siglas en inglés), se determinó el volumen efectivo de medición ($6.688 \times 96.336 \times 3.55\text{mm}^3$) para la técnica a partir de definir la profundidad de detección (DOD) lo que permite una medición precisa.

Se encontró que la velocidad de las partículas en la sección vertical es un orden de magnitud superior a la velocidad del gas. Se determinó que este efecto se debe a un codo de 90° que produce una condición de estrangulamiento del gas produciendo una onda de choque normal. Además, el codo produce una aceleración sobre las partículas debido a la curvatura y debido a la su inercia continúan acelerándose en el trayecto vertical.

No se encontró correlación entre la presencia de las partículas y las señales de los transductores de presión, temperatura y flujo másico.

Se determinaron los coeficientes de arrastre promedio para las partículas a partir de los números de Mach, Knudsen y Reynolds relativos a la partícula. Se encontró que en la tercera altura los efectos de compresibilidad son significativos, lo que implica que se puedan formar ondas de choque enfrente de las partículas.

El trabajo está estructurado de la siguiente manera: en el Capítulo 1 se plantea la teoría de Fano, en el Capítulo 2 se aborda el diseño óptico y la caracterización de las partículas de vidrio, en el Capítulo 3 se presenta el montaje experimental, en el Capítulo 4 se desarrolla la técnica de PSTV, en el Capítulo 5 se caracterizan 7 flujos correspondientes a 7 aperturas de válvula y se presenta el sistema de sincronización entre los equipos y en el Capítulo 6 se presentan los experimentos realizados, los resultados y el análisis.

1. Introducción

El transporte de masa, en particular de partículas sólidas, por fluidos en movimiento se observa en muchos fenómenos naturales y tiene múltiples aplicaciones industriales. La eficiencia del transporte de masa en tuberías, depende de la interacción entre partículas, entre partículas y el fluido y entre ambos medios con las paredes.

En las aplicaciones industriales en donde se requiere mover granulares de un punto a otro, una forma de hacerlo es utilizando un gas de transporte como en la industria alimenticia que se mueven granos utilizando como medio de transporte aire, en la industria química y farmacéutica se mueven sustancias que se secan con aire o algún otro gas. En estos casos, las partículas son introducidas en el gas. Existen otros ejemplos en los que las partículas están naturalmente en el flujo. Por ejemplo, en la industria de generación de energía geotérmica, donde el vapor suele venir acompañado de sedimentos, que son mezclas complejas de partículas.

Un ejemplo muy importante es en la extracción de gas natural, donde la producción de arenas congénitas y la formación de hidratos de metano presenta una problemática específica de la extracción en aguas profundas Mexicanas. En general se estudian la formación de hidratos pero sin considerar el efecto de los granulares, esto se ve reflejado en la literatura especializada como por ejemplo Rogers (2015), los estudios se enfocan en la formación de hidratos en las tuberías o reservorios de gas, debidos a irregularidades. En el caso particular de la extracción en aguas profundas Mexicanas, el gas que transporta las partículas está en un régimen compresible al momento de la extracción a diferencia de los otros ejemplos donde la velocidad del gas no supera las decenas de metros por segundo. Esta condición lo hace particularmente complicado de estudiar ya que se trata además, de un gas inflamable. La secrecía industrial evita que se tengan más datos acerca de este tipo de extracción. Sin embargo, se sabe que la formación de hidratos de metano se favorece en presencia de centros de nucleación (gotas y partículas) en ciertas condiciones de temperatura y presión.

Estas condiciones fomentan el crecimiento cristalino de los caltratos de metano, cuya eventual aglomeración puede dar lugar a la formación de tapones. Dichos tapones pueden causar obstrucciones en los sistemas de transporte de gas. La Figura 1.1 muestra un tapón en una “trampa de envío” que logró ser removido del punto en el que se había formado.

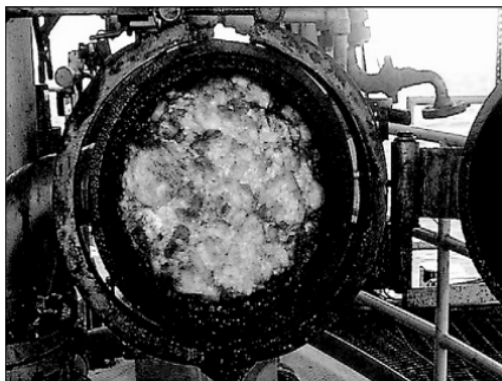


Figura 1.1.- Tapón de cristales de hidrato en tubería de Petrobras, imagen tomada de Sloan et al. (2011).

Es importante señalar que la operación de desbloqueo de los tapones suele ser riesgosa. Esto se debe a que el desprendimiento es súbito y causa un efecto de disparo. La energía cinética alcanzada por un tapón puede llegar a romper los conductos y estropear los sistemas de control de flujo (Figura 1.2).

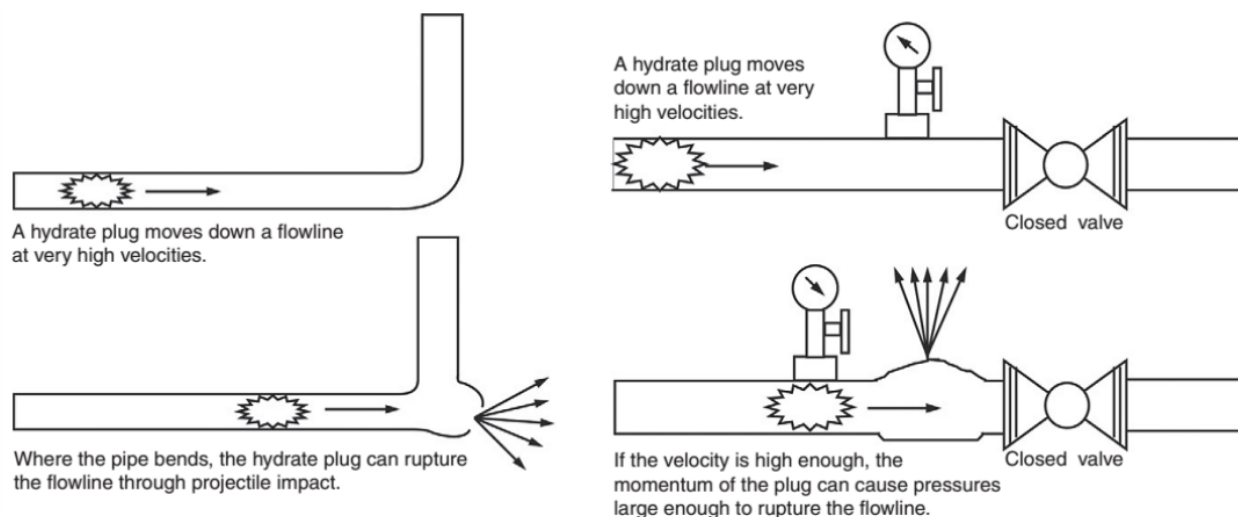


Figura 1.2.- Esquemas del problema de la formación de hidratos, imagen tomada de Sloan et al. (2011).

La presencia de granos de arena en la corriente de gas tiene tres efectos importantes:

1. Sirven como centros de nucleación para el crecimiento de los caltratos (hidratos de metano).
2. Su aglomeración con cristales formados alrededor suyo, conducen a la formación de tapones.
3. Su movimiento en el ducto a gran velocidad, produce una erosión exacerbada del ducto.

La nucleación que ocurre por la rugosidad de la pared (Figura 1.3) puede ser análoga a la “rugosidad” de los granos de arena, favoreciendo el crecimiento de hidratos.

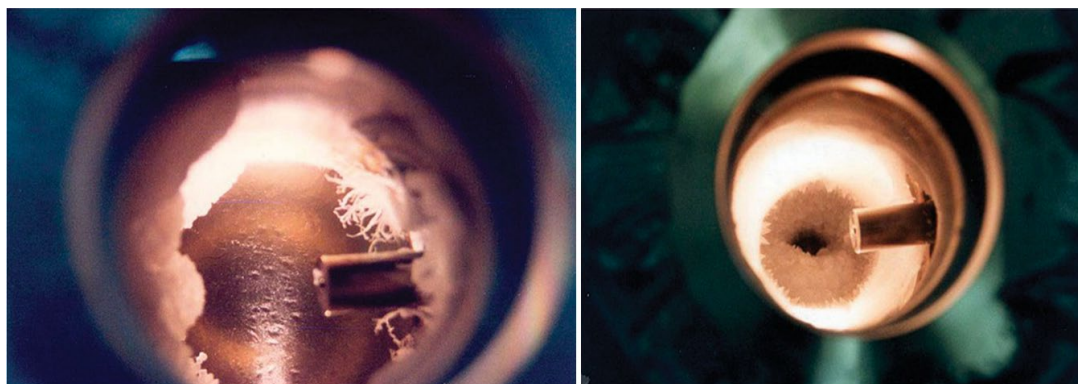


Figura 1.3.- Estudio de la formación de taponamiento por hidratos en laboratorio, imagen tomada de Rogers 2015.

El proceso de crecimiento colectivo de los cristales y la subsecuente aglomeración debido a la cercanía entre ellos, da lugar a una obstrucción como se ve en la Figuras 1.1 y 1.3

En la Figura 1.4 se ilustra de manera esquemática, el proceso de la formación de hidratos en un flujo trifásico de gas con aceite y agua. Aquí se puede ver cómo las gotas, de una emulsión de aceite en agua, sirven como centros de nucleación para la formación de hidratos de metano. Cabe señalar que este proceso particular solamente es estudiado en laboratorios altamente especializados, debido a los altos costos de los sistemas experimentales, a su complejidad y al riesgo por el manejo de sustancias volátiles y tóxicas.

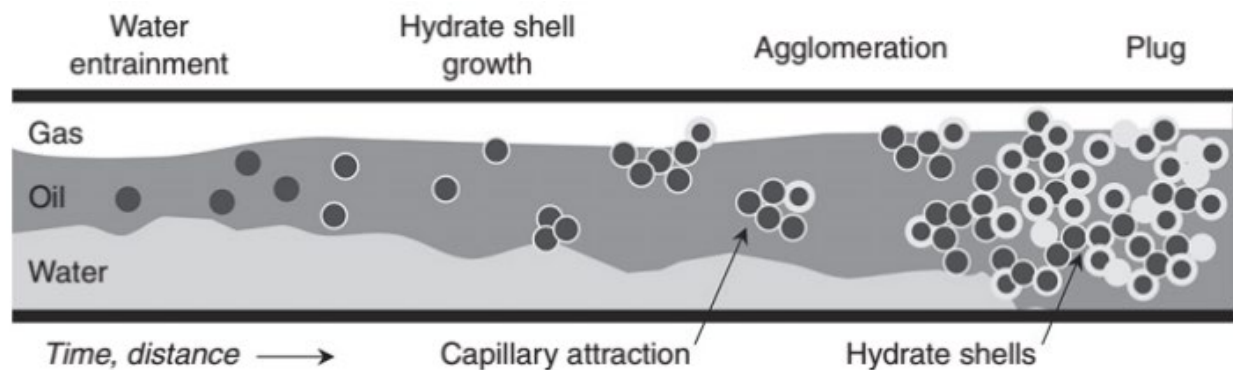


Figura 1.4.- Esquema de la formación de hidratos en un sistema trifásico de agua, aceite y gas. Muestra cómo las gotas de agua con aceite son puntos de nucleación que promueven la formación de hidratos. Se cree que las partículas sólidas también podrían ser puntos, imagen tomada de Sloan et al. (2011).

También los granos transportados causan una erosión excesiva de las paredes de las tuberías. Por otra parte los granos en un flujo tienden a aglomerarse y a favorecer los procesos de formación de taponamientos, con consecuencias como el desgaste del sistema de transporte, las caídas excesivas de presión, la acumulación de presión, los paros no programados, la reducción de la vida útil de los equipos, fallos catastróficos, etc.

Como Barsky (2015), en la mayor parte de los estudios de flujos bifásicos se ha tratado principalmente con sólidos mono dispersos. Las generalidades obtenidas a partir de estos estudios no pueden utilizarse para la obtención de relaciones tanto cualitativas como cuantitativas debido a que la fase sólida es usualmente polidispersa. Esta composición de la fase sólida altera las condiciones hidrodinámicas del proceso debido a la interacción de estelas de diferentes tamaños, lo que produce un fenómeno que no ocurre en las fases sólidas monodispersas. En general estos flujos de gas-partículas son turbulentos y se han encontrado diversos efectos en la turbulencia debido al tamaño y la cantidad de partículas transportadas como lo expone Vreman (2007).

Las partículas se mueven más rápido hacia la estela hidrodinámica debido a una caída de presión local. Esto conduce a la formación de aglomerados de dos o más partículas. La formación de aglomerados también es promovida por la no uniformidad de la presión local, que es típica de un flujo turbulento. El movimiento combinado del conjunto de partículas es una manifestación de su

interacción y es función de la distancia entre ellas. Las partículas que chocan pueden aglomerarse o divergir después de haber intercambiado momento. Si antes de la colisión, las partículas se encuentran aglomeradas, después de la colisión estos cúmulos pueden ser total o parcialmente destruidos o, por el contrario, crecer. Se produce una colisión debido principalmente a las diferentes velocidades del movimiento de partículas sólidas. La velocidad relativa de dichas partículas (y sus agrupaciones) se debe a diversas razones como el diámetro, la configuración geométrica de los aglomerados, los vórtices turbulentos locales, etc.

Barsky (2015) además afirma que debido a estas razones es complicado estudiar experimentalmente este fenómeno ya que cualquier instrumento que afecte o interactúe con el flujo que se desea estudiar afecta de manera significativa el comportamiento del mismo.

Los fenómenos mencionados por Barsky (2015) son en regímenes incompresibles, mostrando que para flujos compresibles se sabe aún menos al respecto.

Se realizó una amplia revisión bibliográfica focalizada en temas de flujos bifásicos polidispersos, compresibles y turbulentos. Se analizaron 96 artículos seleccionados de un grueso de 200; la selección se hizo con base en los siguientes criterios: a) trabajos experimentales, b) flujos de alta velocidad, y c) simulaciones para flujos compresibles. A la fecha no se han encontrado referencias que hablen de un problema similar (flujos bifásicos polidispersos, compresibles y turbulentos) o de condiciones de operación similares (extracción de gas natural) que aquí se plantean. Como se mencionó antes, esto se puede deber a la secrecía industrial ya que los flujos verticales típicos que son estudiados están enfocados a lechos fluidizados, tubos verticales ascendentes (o "riser" como se le denomina en inglés) recirculantes, reactores químicos, etc. Es posible también que, dada su complejidad, no se hayan hecho experimentos representativos. En todos los casos revisados, las velocidades se encuentran dentro del intervalo de 1 a 40 m/s, y para flujos desarrollados incompresibles, donde las concentraciones de la fase sólida son altas (consideradas como fases monodispersas).

En el trabajo de Naren y Ranade (2011) se propone una ley para escalar flujos bifásicos gas-partícula, que es de gran interés en la industria. Dicha ley se determinó mediante un método computacional basado en relaciones empíricas y variando parámetros hidrodinámicos obtenidos a partir de experimentos realizados por otros autores. Llegaron a la conclusión de que su propuesta no funciona adecuadamente en todos los casos. Esto habla del reto que existe para estudiar flujos bifásicos, así como para mostrar la falta de información acerca de la dinámica que ocurre en estos sistemas. En su artículo se hace una recopilación extensa de trabajos experimentales que muestran los parámetros principales de interés para lechos fluidizados y "risers" (Tabla 1.1).

Tabla 1.1.- Trabajos experimentales y los valores de las variables de interés. Imagen tomada de Naren y Ranade (2011).

Reference	H (m)	D (m)	ρ_p (kg/cm ³)	d_p (μ m)	u_g (m/s)	G_s (kg/(m ² s))
Qi et al. (2008) ^{a,b,c}	15.1	0.1	1500	67	3–12	24–202
Huang, Yan, and Zhu (2007) ^b	15.1	0.1	1500	67	2.5–10	38–220
Zhang, Huang, and Zhu (2001) ^a	15.1	0.1	1500	67	5.5–8.2	23–201
Xu, Nomura, Nakagawa, and Kato (2000) ^f	3	0.097	2222	166	1.6–2.5	12.3–14.6
Issangya et al. (1999) ^b	6.1	0.0762	1600	70	4, 8	45–240
Mastellone and Arena (1999) ^{f,-b}	5.75	0.12	2540	89	3–6	15–117
Mastellone and Arena (1999) ^{f,-b}	5.75	0.12	1700	70	3	35–55
Mastellone and Arena (1999) ^{f,-b}	5.75	0.12	2600	310	5, 6	16–117
Nieuwland (1994)	3	0.03	2900	655	12.3–40 (1 bar) 5.4–12.4 (4 bar) 5.1–8.24 (6 bar)	98–312
Nieuwland (1994) ^a	8	0.054	2540	129	10	100–400
Nieuwland (1994)	3	0.03	2900	275	5.1–8.24 (6 bar)	86–300
Ouyang, Lin, and Potter (1993) (as reported ^b in Ouyang and Potter (1993))	10	0.254	1380	65	2–7.5	10–207
Arena, Malandrino, Manocchella, and Massimilla (1991) [#] (as reported in Ouyang and Potter (1993))	5.75	0.12	2543	90	5	92, 115
Arena et al. (1991) ^b (as reported in Ouyang and Potter (1993))	10.5	0.4	2543	90	5	114, 251
Louge and Chang (1990) ^f	7	0.203	2600	88	2	40
Bader et al. (1988) ^b (as reported in O'Brien and Syamial (1993))	12.2	0.305	1714	76	3.7–10 (1.5 atm)	98, 147
Li, Tung, and Kwauk (1988) ^b (as reported in Ouyang and Potter (1993))	10	0.09	930	54	1.5–2.6	14–193
Hartge, Li, and Werther (1986) (as reported in Ouyang and Potter (1993))	3.3	0.05	2600	56	3.4–4	72–90
Hartge et al. (1986) ^b (as reported in Ouyang and Potter (1993))	7.8	0.4	2600	56	4.2–5	64–118
Monceaux, Aziz, Molodtsov, and Large (1986) Monceaux, Aziz, Molodtsov, and Large, (1986) (as reported in Dasgupta, Jackson, and Sundaresan (1998))	N/A	0.144	1385	59	4.6	50–210
Rhodes (1986) ^b (as reported in Ouyang and Potter (1993))	6	0.152	1800	64	2.5–4.5	8.5–107
Rhodes (1986) (as reported in Ouyang and Potter (1993))	6	0.152	2600	270	6, 8	70–160
Yerushalmi (1986) (as reported in Dasgupta et al. (1998))	N/A	0.152	1070	49	2.2, 4	50–190
Arena, Cammarota, and Pistone (1986) ^f (as reported in Louge and Chang (1990))	6.4	0.041	2600	88	7	199–600
Yerushalmi and Avidan (1985) ^b (as reported in Ouyang and Potter (1993))	8.5	0.152	1070	49	1.2–5.1	63–173
Weinstein, Graff, Meller, and Shao (1984) (as reported ^b in Ouyang and Potter (1993))	8.5	0.152	930	54	2.9–3.4	70–130
Yang, Huang, and Zhao (1984) ^b (as reported in Ouyang and Potter (1993))	8	0.115	794	220	5.3	43.5–160
Yerushalmi et al. (1976)	7.2	0.0762	881	60	1.8–4.5	20–220

Otro ejemplo se puede encontrar en el trabajo de Bhusarapu et al. (2006), donde estudian la dinámica de un flujo bifásico en un “riser” de lecho fluidizado y muestra la importancia de utilizar técnicas de medición no intrusivas. Utilizó la tomografía computarizada de rayos gamma, y mostró su capacidad para reconstruir imágenes de zonas del experimento donde se tienen densidades altas de la fase sólida. Además, hace una comparación de diferentes trabajos experimentales que utilizan diferentes técnicas recopilando datos como parámetros de operación, tamaños de partícula, velocidades y características importantes de los experimentos (dimensiones, etc.). Esta tabla se puede ver en la Tabla 1.2. En ambas tablas (Tablas 1.1 y 1.2) se aprecia que los flujos másicos utilizados son altos y las velocidades bajas.

Es importante destacar que las técnicas ópticas no intrusivas típicamente empleadas para estudiar este tipo de flujos son la Anemometría Láser Doppler (LDV por sus siglas en inglés), visualizaciones directas con cámaras rápidas y análisis de imágenes. Las intrusivas usan fibras ópticas en el interior de los experimentos.

Tabla 1.2.- Lista de trabajos experimentales, muestra la técnica utilizada y características del sistema utilizado así como el gasto y material sólido utilizado. Imagen tomada de Bhusarapu et al. (2006).

Reference	Measurement technique	Riser geometry (Dia × height, cm × m)	Solids material/ diameter	Operating conditions		Measurement region
				U_g ($m\ s^{-1}$)	G_s ($kg\ m^{-2}\ s^{-1}$)	
<i>Invasive techniques</i>						
Bader et al. [7]	Pitot tube	30.5 × 12.2, abrupt exit	FCC, 76 μm	3.7; 98		$H=4$, 9.1 m
Fiedler et al. [33]	CCD based spatial filter	40 × 15.6, abrupt	Sand, 120 μm	4–6; 28		$H=1.7$, 10.7 m
Harris et al. [68]	Pitot tube/isokinetic probe	14 × 5.1, abrupt exit	FCC, 60 μm	2.6, 3; 26–52		$H=4.4$ m
Hartge et al. [69]	Optical fiber probe	40 × 8.4, abrupt exit	FCC, CFBC ash; 85, 120 μm	3.8–5.4; 27–70		$H=0.9$ –4.7 m
Herbert et al. [70]	Optical fiber probe	41 × 8.5, abrupt exit	FCC, glass beads; 42–300 μm	≤ 13; ≤ 250		$H=4$, 4.2 m
Horio et al. [71]	Optical fiber probe	5 × 2.79, smooth exit	FCC, 60 μm	1.17, 1.29; 11.7, 11.25		$H=0.36$, 1.06, 1.63 m
Ishii et al. [16]	Optical fiber probe	5 × 2.79, smooth exit	FCC, 60 μm	1.29; 10.7		$H=0.36$, 1.06, 1.63 m
Qian and Li [72]	Optical fiber probe/ dynamic pressure	7.5 × 10, –	FCC, 54 μm	2.5; 62		$H=6.5$ m
Miller and Gidaspow [30]	Extraction probe	7.5 × 6.58, smooth exit	FCC, 75 μm	2.61–3.84; 12–32.8		$H=1.86$ –5.52 m
Parssinen and Zhu [73]	Optical fiber probe	7.6 × 10, smooth exit	FCC, 67 μm	5.5, 8, 10; 100, 300, 400, 550		$H=1.53$ –9.42 m
Wang et al. [74]	Particle dynamic analyser (phase/Doppler)	22.2 × 22.2 × 300 cm ³ , elbow exit	Sand, 530 μm	5.85; 25.4		$H=1.19$ –2.24 m
Zhou et al. [75]	Optical fiber probe	14.6 × 14.6 × 914 cm ³ , abrupt exit	Sand, 213 μm	5.5, 7; 20, 40		$H=5.13$, 6.2, 8.98 m
<i>Non-invasive techniques</i>						
Cody et al. [76]	Acoustic shot noise (ASN) excitation	61–274 × –	FCC, 60 μm	$Q=233$ –1333 kg s ⁻¹ $G_s=152$ – 1247 kg m ⁻² s ⁻¹		$H=5$ –40 ft. (from feed injection)
Donsi and Osseo [77]	Laser Doppler anemometer	4 × 10 × 460 cm ³ , smooth exit	Glass, 94 μm	10–25; 50–350		$H=270$ cm
Godfroy et al. [11]	Radioactive particle tracking	8.2 × 7, elbow exit	Sand, 150 μm	4; 23–75		$H=4$ –5 m (above distributor)
Li and Tomita [78]	Photographic imaging technique	8 × 12, elbow exit	Polyethylene, 3.2 mm, 946 kg m ⁻³	9–25; O (0.01)		20 cm regions at 0.7, 5.7, 11.7 m from feed
Rhodes et al. [79]	High speed video camera	30.5 × 6.6	Alumina, 75 μm	3–5; 2–80		0.1 × 0.1 m ² at 3.5 m from the distributor
Stellema [10]	Positron Emission Particle Tracking (PEPT)	10 × 10 × 10 cm ³ (interconnected fluidized beds)	Glass, 700 μm	$U_g=0.972\ m\ s^{-1}$ $Q=0.121\ kg\ s^{-1}$		0.1 × 0.1 × 0.1 m ³
Wang et al. [80]	LDV	14 × 10.4, abrupt exit	FCC, 36 μm	3.49–4.78; 2.6–78.3		$H=4$ –6 m
Wei et al. [81]	LDV	18.6 × 8, abrupt exit	FCC, 54 μm	2.3–6.2; 18–200		2.5 × 10 ⁻⁴ mm ³ volume at $H=1.5$ –6.2 m
Zhang et al. [82]	LDV	41.8 × 18, abrupt	FCC, 77 μm	2.7–3.7; 29.7–44		$H=6$, 14 m

En la mayor parte de los trabajos que realizan esfuerzos importantes para comprender la dinámica de los flujos bifásicos se habla de la falta de relaciones que permitan predecirlos, así como un esfuerzo para modelarlos de manera computacional (Vreman (2007)), por lo que los datos experimentales siempre son necesarios. De esta revisión del estado del arte se comprueba

lo que dice Barsky (2015), es decir, los estudios de flujos bifásicos son en general para fases sólidas monodispersas.

Lo antes expuesto permite justificar el estudio de un flujo compresible y turbulento, sembrado con partículas polidispersas, utilizando una técnica como Seguimiento de Sombras de Partículas o PSTV (por sus siglas en inglés).

Es importante mencionar que la motivación de este trabajo es la dinámica y distribución de partículas en un flujo rápido en un tubo, es decir, la formación de patrones complejos que varían en la posición y en el tiempo, y su efecto en la velocidad del flujo. Estos aspectos podrán aplicarse en estudios sobre la erosión y la producción de hidratos.

Por lo que el objetivo del presente trabajo es estudiar la dinámica de la interacción:

- gas-partículas
- partícula-partícula
- partículas-tubo

en un flujo de aire sembrado con partículas polidispersas, compresible y turbulento, en un ducto vertical.

Los objetivos particulares para poder cumplir con el objetivo global del proyecto son:

- Revisión del estado del arte en el tema de los flujos compresibles turbulentos cerrados.
- Análisis de la viabilidad de obtener un flujo compresible (teoría de flujo de Fanno).
- Implementación de la técnica PSTV en un flujo interno y su adaptación para estudiar, además del flujo, la dinámica de las partículas.
- Caracterización de la distribución de tamaños y circularidad de las partículas.
- Diseño y construcción de un experimento de varios metros de longitud que permita el estudio controlado de un flujo bifásico, compresible y turbulento.
- Construcción de una plataforma con una cámara rápida con su respectiva fuente de iluminación capaz de ser deslizada a lo largo de la tubería.
- Construcción de puertos de medición de presión y temperatura.
- Diseño y construcción de sistema de inyección de partículas para condiciones extremas, determinación del flujo másico sólido.
- Caracterización de flujo base para diferentes condiciones de salida.

1.1. Flujo de Fanno

La teoría de Fanno ofrece una primera aproximación para realizar análisis sobre los parámetros promedio involucrados en un flujo de gas, como lo son la presión, temperatura, densidad y velocidad (Figura 1.5). Esta teoría considera que el flujo es adiabático y que existe fricción con las paredes. En este trabajo se utilizará primero para hacer estimaciones utilizando valores de operación del equipo (compresor) de acuerdo al fabricante, y más adelante para comparar con resultados experimentales.

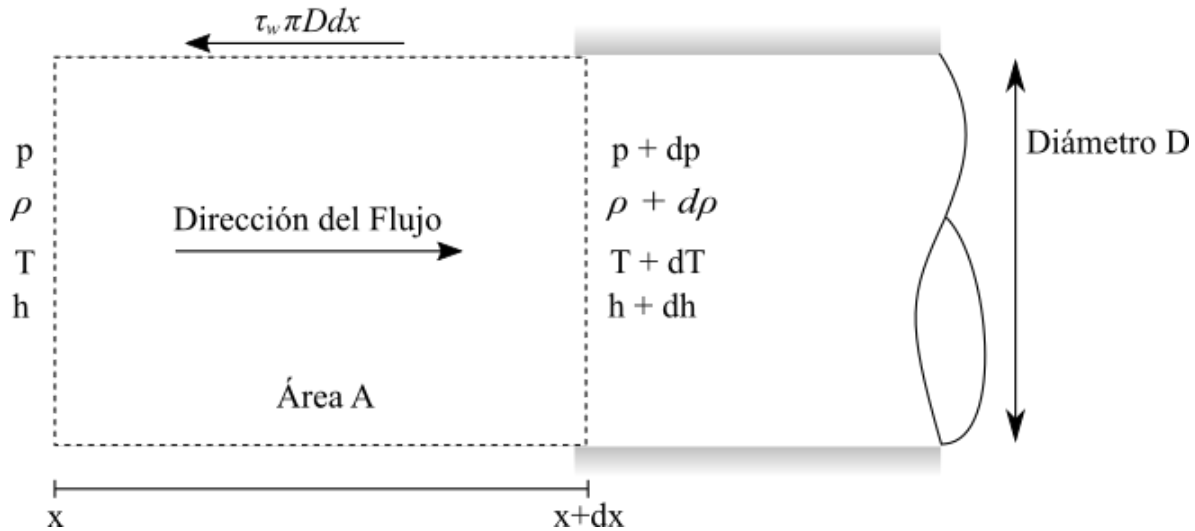


Figura 1.5.- Volumen de control para un flujo de área constante con fricción.

1.1.1. Flujo de Fanno en una tubería cilíndrica (flujo adiabático con fricción)

Se considera el movimiento de un gas en una tubería. Las ecuaciones que describen por completo a un flujo compresible y viscoso dentro de una tubería son las de conservación de masa, de momento (o de Navier-Stokes) y energía (p. ej. White (2006)):

Conservación de masa:

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \nabla \cdot \rho \vec{V} = 0 \quad \text{Ec. (1)}$$

Conservación de momento:

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p + \frac{\partial}{\partial x_j} \left[\mu \left(\frac{\partial v_i}{\partial x_j} + \frac{\partial v_j}{\partial x_i} \right) + \delta_{ij} \lambda \nabla \cdot \vec{V} \right] \quad \text{Ec. (2)}$$

Ecuación de energía

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot (\kappa \nabla T) + \phi \quad \text{Ec. (3)}$$

donde h es la entalpía, ρ es la densidad, \vec{V} es el vector de velocidad, \vec{g} la aceleración de gravedad, p la presión, μ la viscosidad dinámica, δ_{ij} es la delta de Kronecker, λ es la constante de Lamé, κ es la conductividad térmica, T es la temperatura y ϕ es la función de disipación viscosa.

Si se considera que las fuerzas de presión, responsables de mover al gas, son mucho mayores que las fuerzas viscosas, es decir, que los esfuerzos viscosos son despreciables (Shapiro (1953)), las ecuaciones de conservación de momento y energía se reescriben de la siguiente forma:

Conservación de momento (ecuaciones de Euler):

$$\rho \frac{D\vec{V}}{Dt} = \rho \vec{g} - \nabla p \quad \text{Ec. (4)}$$

Conservación de la energía:

$$\rho \frac{Dh}{Dt} = \frac{Dp}{Dt} + \nabla \cdot (\kappa \nabla T) \quad \text{Ec. (5)}$$

A pesar de considerar que el flujo es invíscido, la fricción con las paredes del ducto es importante, por lo que hay que sumar el esfuerzo de corte en la pared a la ecuación de momento (Ec. 7). En una primera aproximación, para poder resolver este problema se propone estudiar un flujo de gas ideal que se mueve dentro de un ducto vertical de sección transversal constante. Se considera lo siguiente:

- Flujo unidimensional: se puede hacer esta aproximación si todas las propiedades en promedio del fluido son uniformes en cualquier sección transversal del ducto. O de manera más precisa, que los cambios normales a lo largo de la dirección de movimiento son pequeños respecto a los cambios en la dirección del flujo. Los errores esperados para esta suposición son pequeños si se cumple lo siguiente:
 - a) La tasa de cambio de la sección transversal es pequeña ($dA/A dx \ll 1$)
 - b) El radio de curvatura del tubo es mucho mayor que su diámetro.
 - c) Los perfiles de velocidad y temperatura no presentan cambios aparentes entre sección y sección a lo largo del ducto.
- Flujo adiabático. Se puede considerar flujo adiabático si el tubo está aislado de los alrededores o si el ducto es corto y el flujo es rápido tal que la transferencia de calor dentro del tubo es despreciable. Evidentemente, aunque el flujo se pueda considerar adiabático la entropía del sistema siempre aumenta debido a la fricción, la cual está relacionada con la turbulencia y con el esfuerzo viscoso cerca a la pared.
- Gas Ideal con cociente de calores específicos constante.
- Despreciables el trabajo en el eje y cambios de energía potencial.
- Esfuerzos cortantes en la pared correlacionados por un factor de fricción promedio de Darcy.
- Flujo medio en estado estacionario.
- El ducto es lo suficientemente corto como para despreciar efectos gravitatorios en comparación con los efectos debidos a los cambios de presión.

Este es un problema de Moody, pero con cambios en energía cinética, entalpía y presión.

Aunque el área es constante, la densidad, la presión, la entalpía, la velocidad y la temperatura (ρ , p , h , V y T respectivamente) pueden cambiar a lo largo de la dirección x .

Las ecuaciones que describen este problema son:

Ecuación de continuidad:

$$\dot{m} = \rho VA = cte \quad \text{Ec. (6)}$$

Ecuación de momento en dirección x :

$$pA - (p + dp)A - \tau_w P dx = \dot{m}(u + du - u) \quad \text{Ec. (7)}$$

donde \dot{m} es el flujo másico, A es la sección transversal de la tubería, τ_w es el esfuerzo de corte en la pared, P es el perímetro de mojado y u es la componente de la velocidad en la dirección x .

Ecuación de energía:

$$h_0 = h + \frac{1}{2}u^2 \quad \text{Ec. (8)}$$

donde el subíndice 0 representa las propiedades de estancamiento.

Con esto se tienen 3 ecuaciones con 5 incógnitas y es necesario tener dos relaciones más.

La primera es si se considera que el gas se comporta como gas ideal:

$$p = \rho RT \quad \text{Ec. (9)}$$

donde R es la constante específica del aire seco con un valor de $R = 287.058 \text{ J/kgK}$, considerando la masa molar del aire seco como 28.9645 gr/mol .

La segunda para eliminar el esfuerzo de corte se utiliza el factor de fricción de Darcy f , que lo relaciona con el esfuerzo de corte o pared:

$$\tau_w = \frac{1}{8} f \rho V^2 = \frac{1}{8} f \gamma p M^2 \quad \text{Ec. (10)}$$

El factor de fricción depende de la rugosidad relativa, el número de Reynolds, y se utiliza la expresión para la velocidad del sonido $c = \frac{\gamma p}{\rho}$ donde γ es el cociente de calores específicos

$\gamma = \frac{C_p}{C_v}$, para el aire seco con un valor de $\gamma = 1.407$ y M es el número de Mach.

Se puede mostrar Saad (1985) que si el flujo de entrada es subsónico o supersónico, el número de Mach aguas abajo siempre tiende hacia $M = 1$ porque este es el camino a lo largo del cual la entropía aumenta.

Puesto que la fricción hace que las propiedades de cualquier flujo, ya sea subsónico o supersónico, se aproximen a las características de $M = 1$, este estado se elige como el estado de referencia y en particular en el flujo de Fanno se analiza calculando la longitud adimensional requerida para estrangular el flujo (este punto es donde el número de Mach se vuelve 1), denotado por el superíndice "**".

1.1.2. Ecuaciones finales de trabajo y primera estimación

Gasto volumétrico:

$$G = \frac{\dot{m}}{\rho} \quad \text{Ec. (11)}$$

Esta relación se debe de utilizar con cuidado ya que al utilizar el flujo volumétrico, este sí puede cambiar a lo largo de la trayectoria debido principalmente a cambios en la temperatura y presión y por lo tanto en cambios en la densidad. En una primera aproximación se utiliza esta relación usando el máximo gasto volumétrico del compresor, aunque más adelante se utiliza el gasto másico medido en la salida del compresor. Se utiliza directamente la conservación de masa en combinación con la ley de gases ideales:

$$\dot{m} = \frac{PAV}{RT} \quad \text{Ec. (12)}$$

Número de Mach:

$$M = \frac{V}{\sqrt{\gamma RT}} \quad \text{Ec. (13)}$$

Parámetro de Fanno:

$$\frac{\bar{f}L^*}{D} = \frac{1-M^2}{\gamma M^2} + \frac{\gamma+1}{2\gamma} \ln \left[\frac{(\gamma+1)M^2}{2+(\gamma-1)M^2} \right] \quad \text{Ec. (14)}$$

$$\frac{\bar{f}\Delta L}{D} = \left(\frac{\bar{f}L^*}{D} \right)_1 - \left(\frac{\bar{f}L^*}{D} \right)_2 \quad \text{Ec. (15)}$$

Presión:

$$\frac{p}{p^*} = \frac{1}{M} \left[\frac{(\gamma+1)}{2+(\gamma-1)M^2} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. (16)}$$

Densidad:

$$\frac{\rho}{\rho^*} = \frac{V^*}{V} = \frac{1}{M} \left[\frac{2+(\gamma-1)M^2}{(\gamma+1)} \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. (17)}$$

Temperatura:

$$\frac{T}{T^*} = \frac{c^2}{c^{*2}} = \frac{(\gamma+1)}{2+(\gamma-1)M^2} \quad \text{Ec. (18)}$$

En la Figura 1.6 se muestra el esquema del problema a resolver.

Las capacidades del equipo con el que se cuenta y los parámetros conocidos se muestran en la Tabla 1.3.

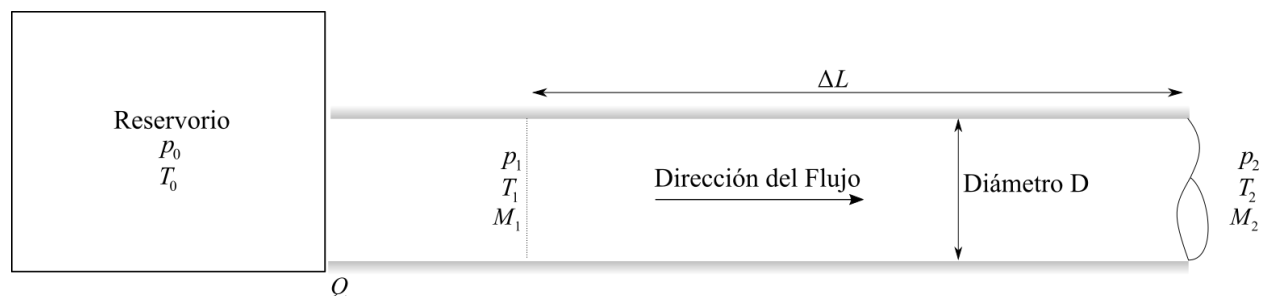


Figura 1.6.- Esquema del tubo, y variables principales del problema.

Se utiliza el gasto máximo del compresor, se calcula el número de Mach a la entrada M_1 y se obtiene M_2 a la salida. Por la línea de Fanno (Figura 1.7) se sabe que para ductos cortos, el número de Mach aumentará hasta llegar a $M = 1$, por lo que el resultado esperado es que el número de Mach de salida sea mayor que el de entrada y menor a 1, $M_1 < M_2 < 1$.

El resultado final se puede observar en la Tabla 1.3. En este cálculo no se considera un reservorio de aire ni el diámetro de salida del flujo ya que no son proporcionados por el fabricante. Esto es importante ya que la máxima presión que puede entregar es de 2068420 Pa (20 bar); por lo que se estima que el valor obtenido se encuentra por debajo de las capacidades reales del compresor acoplado a un tanque de almacenamiento.

Tabla 1.3.- Parámetros conocidos y calculados con la ayuda de la teoría de Fanno, estimando $Re \sim 18000$.

Gasto volumétrico máximo del compresor [m ³ /s]	Longitud del tubo [m]	Diámetro [m]	Factor de Fricción de Darcy f
0.05	5.7	0.0251	0.016
Número de Mach máximo de entrada. M_1	Mach de salida M_2	Longitud de Fanno para alcanzar el punto de estancamiento $M=1$ [m]	
0.28	0.33	13.8	

El resultado indica (sin olvidar las consideraciones físicas para poder aplicar esta teoría) que el equipo con el que se cuenta es suficiente para realizar un experimento con las características mencionadas para el objetivo de este trabajo.

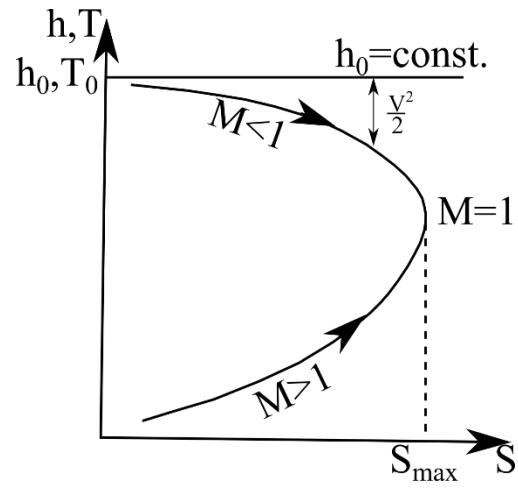


Figura 1.7.- Línea de Fanno, imagen modificada a partir de Saad (1985).

2. Diseño óptico y caracterización de las partículas

Para poder estudiar el flujo propuesto, es necesario diseñar y construir todo el experimento, para lo cual se considera desde un inicio las necesidades de la técnica PSTV, que es con la que se desea estudiar el flujo.

La óptica con la que se cuenta (Microscopio de larga distancia CentriMax™ K1 con aumentos MX-1 y MX-2) tiene una distancia focal de 13 cm por lo que está es la distancia a la cual se debe de colocar de la zona de estudio, el LED (Luminus Green Big Chip LED CBT-120) se debe colocar a una distancia de 10 cm para tener la suficiente intensidad de luz. La técnica debe de cumplir que el plano óptico de la cámara coincida con el centro del LED, este plano debe de ser perpendicular al tubo. El tubo que se utiliza es de acrílico.

2.1. Pruebas de visualización dentro del tubo.

Debido a que el fenómeno que se desea estudiar ocurre dentro de un tubo de acrílico, es necesario considerar la desviación de los rayos debido a dicha curvatura. Por otro lado se sabe que los rayos provenientes del LED deben de viajar por 3 medios con índices de refracción diferentes (Figura 2.1), lo que ocasiona que la desviación de los rayos sea aún mayor, como lo menciona Lowe y Kutt (1992), en su trabajo se hace una corrección a dicha desviación.

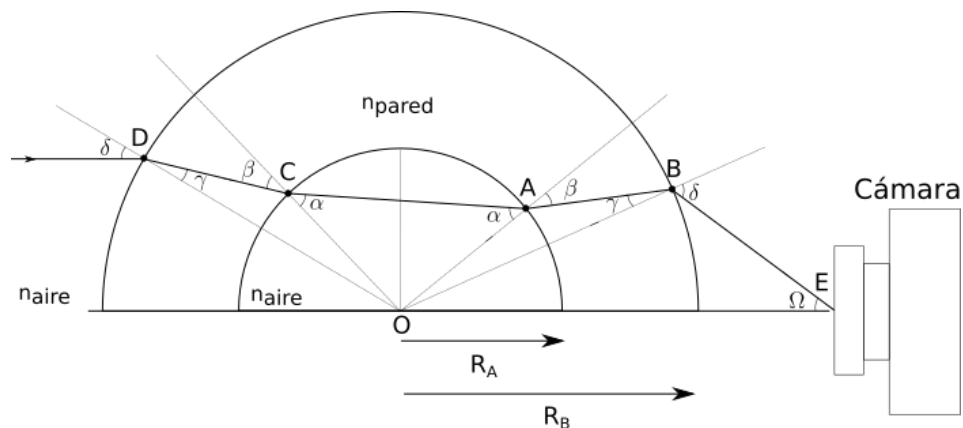


Figura 2.1.- Trazado de rayos que atraviesan un tubo transparente, imagen modificada a partir de Lowe y Kutt (1992).

Usualmente se utiliza una técnica de visualización que consiste en colocar un medio líquido con índice de refracción similar al medio de la superficie curva, contenerlo entre paredes cuadradas (camisa de visualización), y así evitar de manera significativa desviaciones de la luz debidos a la curvatura.

Se utilizó una camisa de visualización cuadrada llena de un líquido con índice de refracción similar al del tubo de acrílico (aceite de silicón $n \approx 1.4$), sin embargo, la desviación de los rayos debidos al cambio de índice de refracción entre la pared del tubo y del aire es lo suficientemente grande como para hacer que el sistema tubo - camisa se comporte como una lente cilíndrica, provocando que en el sensor de la cámara se proyecte una franja intensa de luz. Esto se puede

observar en la Figura 2.2 imagen superior. Por esta razón se descartó el uso de una camisa de visualización.

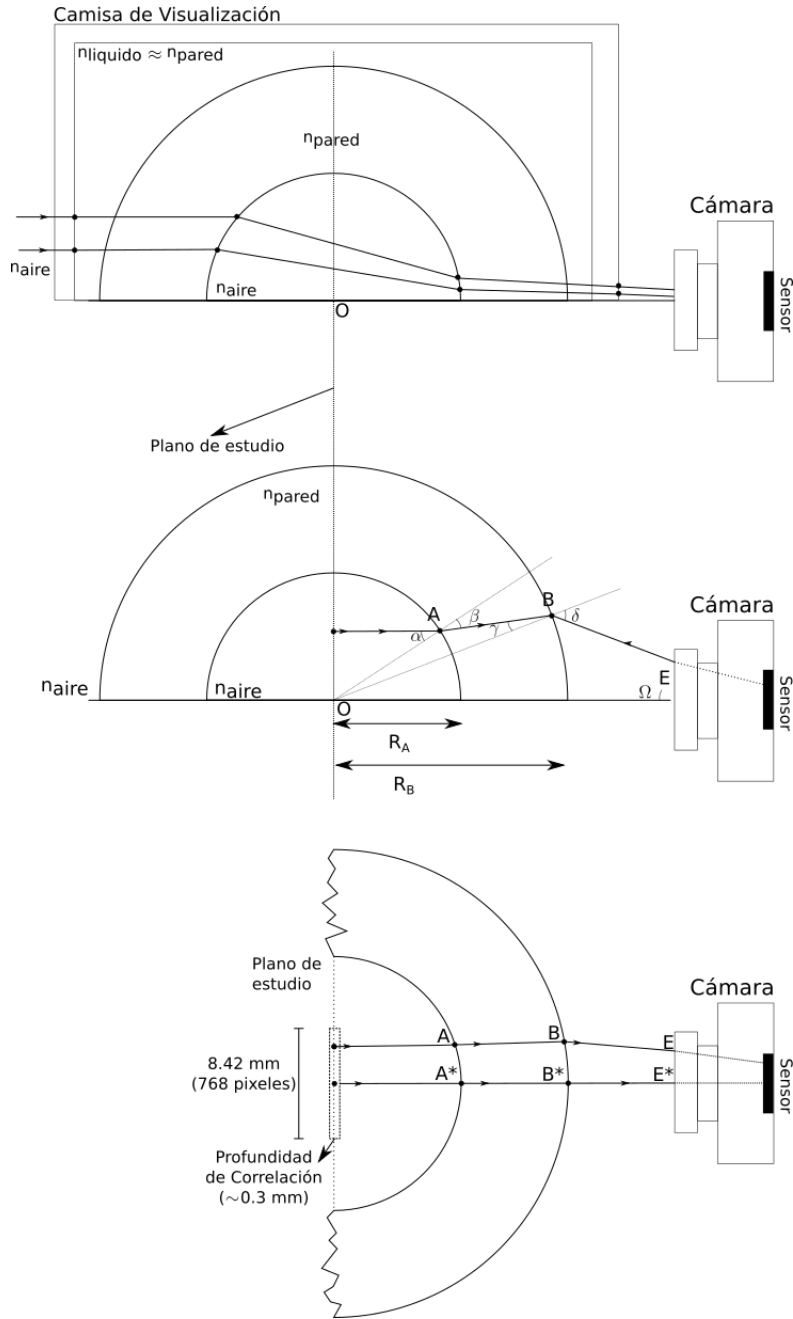


Figura 2.2.-Superior, ejemplo de desviación de rayos cuando se utiliza una camisa de visualización para ver dentro del tubo, el efecto es como de lente cilíndrica. Central, consideración de rayos únicamente a partir del objeto de estudio. Inferior, se muestra que el tamaño del área de estudio es pequeña, ocasionando que los rayos no se desvíen lo suficiente por la curvatura de la pared.

Se colocó un patrón de referencia impreso en acetato en el interior del tubo. Los resultados se muestran en la Figura 2.3; existe un desplazamiento horizontal de los puntos y lo que se observa es puntos desenfocados. Esto se debe a que el espesor de la pared provoca que el objeto

parezca estar en una posición fuera del foco de la cámara y a la profundidad de campo de la óptica de la cámara.

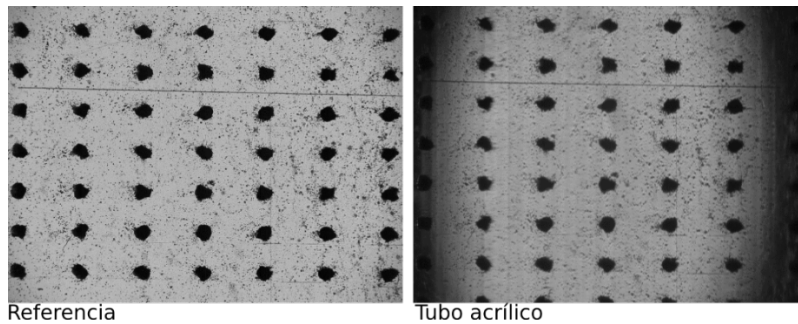


Figura 2.3.- Resultados de visualización de patrón dentro del tubo acrílico.

Al contar con una iluminación homogénea (como se observa en la Figura 2.7); la única desviación de rayos que importan son los rayos provenientes del objeto de estudio como se ejemplifica en la Figura 2.2 imagen central e inferior, donde se ve que la desviación de rayos considerando únicamente los rayos provenientes o que son emitidos por el objeto de estudio que se encuentra en el interior del tubo.

Si el eje óptico de la cámara coincide con el centro del tubo, y lo que se está observando es únicamente una zona que corresponde al centro del tubo (Figura 2.2 imagen inferior), los rayos deben de atravesar dos superficies que por el tamaño de la magnificación se pueden aproximar a dos paredes paralelas lo que explica que deba de verse un cambio en la distancia donde se forma la imagen, ocasionando el desenfoque de los puntos.

2.2. Montaje óptico

El diseño del montaje óptico consiste de una base que permite alinear correctamente la cámara y el LED, antes de su montaje en el experimento, esta configuración es deseable por las necesidades de la técnica de velocimetría, la cual se describe más adelante. La base cuenta con tres tornillos para realizar ajustes finos, y asegurar que el plano óptico sea perpendicular al tubo (Figura 2.4 y 2.5). En ambas imágenes se puede observar una camisa de visualización, la cual como se explicó antes fue eliminada.



Figura 2.4.- Base de alineación de la Cámara-LED. La base se construyó con dos tableros de MDF de alta densidad de 25 mm de espesor.



Figura 2.5.- Vista lateral de la base para Cámara-LED.

Con este arreglo óptico y utilizando una velocidad de grabación de 7200 cps se obtiene un área en el sensor de la cámara de 768 x 576 píxeles, lo que equivale a un área efectiva de 8.42 x 6.31 mm².

2.2.1. Iluminación y alineación

Se realizaron pruebas de alineación del plano óptico de la cámara con respecto al centro del LED (Figura 2.6), y se comprobó la homogeneidad de la iluminación (Figura 2.7). Se puede ver que la alineación respecto del centro del LED presenta un ligero corrimiento a la derecha, se estima que es menor a 0.005 mm, dado el aumento. Se observa que, aunque la iluminación no llena por completo el área del sensor, es suficiente debido a que al aumentar la resolución temporal de la cámara se reduce la resolución espacial.

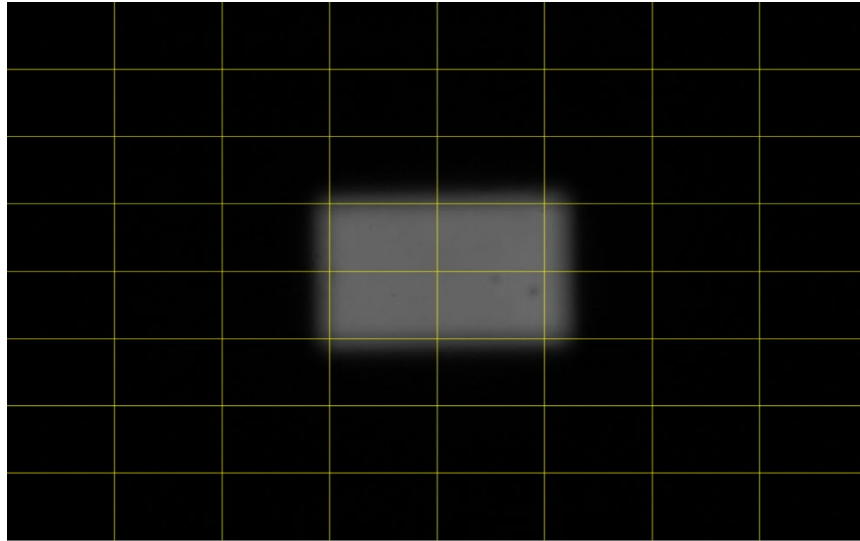


Figura 2.6.- Prueba de alineación del plano óptico de la cámara respecto al centro del LED.

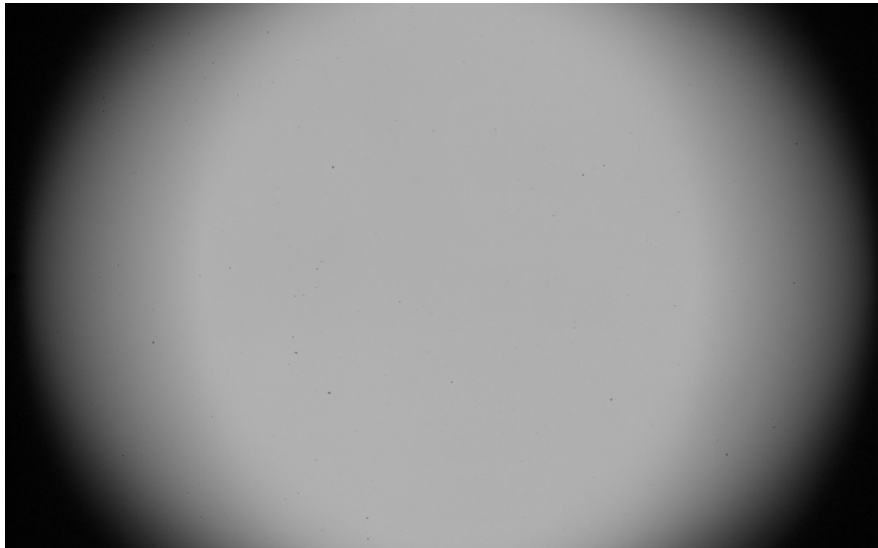


Figura 2.7.- Homogeneidad de la iluminación 1280 x 800 píxeles.

2.3. Partículas

Se utilizaron partículas de vidrio marca Jaygo Incorporated tipo Dragonite® 4501 vendidas por el fabricante como de 0.25 a 0.50 mm de diámetro con una densidad de bulto de 1509.25 kg/m³. Las partículas utilizadas se pueden observar en la Figura 2.8, para obtener la distribución de tamaños, se dejaron caer partículas en un plano inclinado 20° y se grabaron las proyecciones perpendiculares a este plano con una frecuencia de grabación de 100 cps, para asegurar que una misma partícula no estuviese en dos o más cuadros consecutivos y así evitar que una misma partícula fuera contada más de una vez. Las imágenes resultantes se analizaron empleando una técnica similar usada en microscopía para contar y medir células. La herramienta se llama *Analyze Particles* y es nativa del programa ImageJ (Abràmoff et al. (2004)).

En la Figura 2.9 se muestra un ejemplo de la contabilización de las partículas de la Figura 2.8. En total se analizaron 16620 cuadros y se detectaron y midieron 147900 partículas diferentes. La distribución de tamaños se muestra en la Gráfica 2.1.

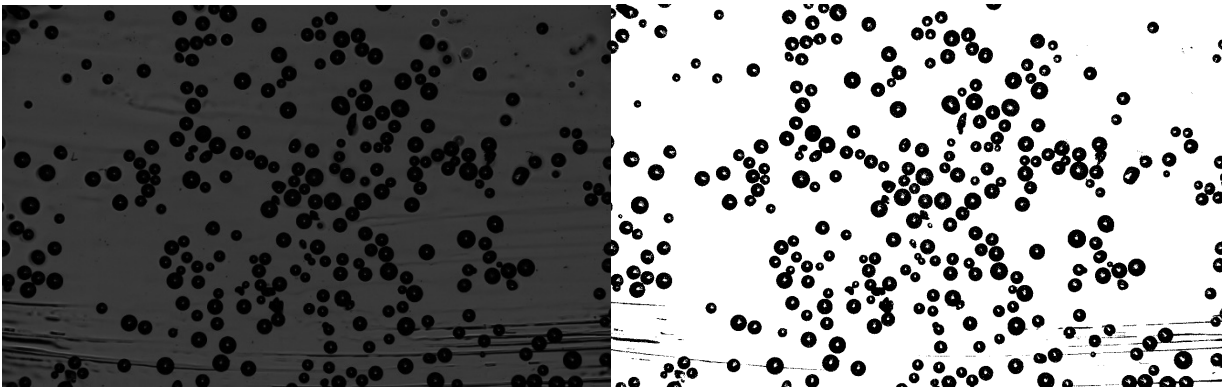


Figura 2.8.-Izquierda. Fotografía de partículas de vidrio montadas sobre un porta objetos, utilizando la base Cámara-Led Figura 14. Derecha. Fotografía con alto contraste.

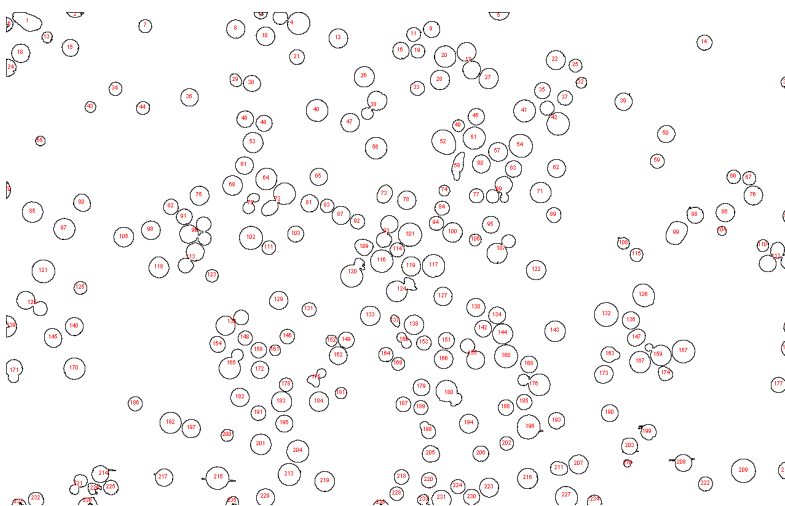
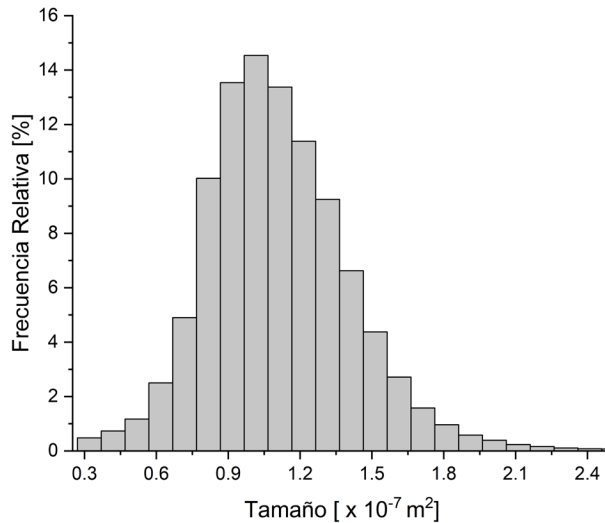


Figura 2.9.- Conteo de partículas.



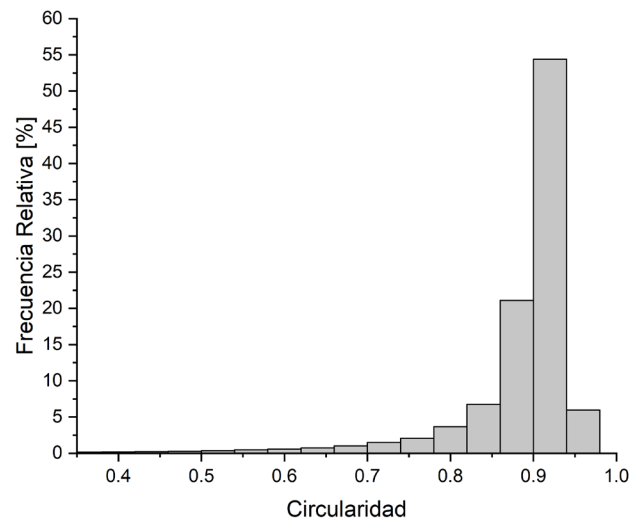
Gráfica 2.1.- Histograma de tamaños de partículas medidos.

El promedio de los tamaños es $1.11 \times 10^{-7} \text{ m}^2$ (diámetro equivalente 0.094 mm). El intervalo de diámetros equivalentes considerando partículas circulares es de 0.048 a 0.25 mm. Este resultado muestra que la distribución se encuentra en un intervalo que no corresponde al proporcionado por el fabricante. Un resultado importante es que al tener buena resolución espacial se puede obtener más información acerca de las partículas además de sus tamaños, como su circularidad, definida como:

$$Circularidad = 4\pi \frac{A}{P^2} \quad \text{Ec. (19)}$$

donde A es el área y P el perímetro de la partícula.

El histograma resultante se puede ver en la Gráfica 2.2, en donde se observa que el 55% de las proyecciones de partículas son casi circulares y por lo tanto casi esféricas, esto es importante porque, esta geometría es crítica en la dinámica del flujo a su alrededor.



Gráfica 2.2.- Circularidad de las partículas.

3. Montaje Experimental

La óptica, las técnicas de adquisición y procesamiento se desarrollaron en la Facultad de Ciencias y el experimento se montó en el Instituto de Ingeniería UNAM, donde se tuvieron que tomar en cuenta las dimensiones del espacio asignado para el proyecto y las necesidades de la técnica para estudiar a las partículas en movimiento dentro del flujo. Se diseñó y construyó una estructura rígida para soportar la base de la Cámara-LED y desplazarla verticalmente. La estructura consta de cuatro ángulos de acero de 5 mm de espesor y 6 m de largo, y 2 bases hechas de dos ángulos de 5mm de espesor y 2.10 m de largo.

En la parte inferior se instaló un cabrestante y en la superior una polea, para así poder desplazar la base de la Cámara-LED en la vertical de manera segura.

3.1. Estructura

En la Figura 3.1 se muestra parte del proceso de instalación de la estructura, está estructura tiene una altura final de 6.10 m en esta distancia la separación entre los soportes de la estructura presenta una desviación máxima de 2 mm. Debido a que el experimento se encuentra en un lugar húmedo, se pintó toda la estructura con primer negro para protegerla.



Figura 3.1.- Izquierda, estructura antes de la alineación. Centro, instalación de la tubería, Derecha, estructura fija al suelo y la pared, la distancia de separación entre las patas es de 92 cm. La estructura amarilla es un andamio para facilitar el acceso al experimento.

3.2. Tubería

El tubo principal es de acrílico y consta de secciones de 1.8 m, el problema principal de utilizar acrílico es que este no tiene medidas estándar, por lo que cualquier codo, cople, reducción, brida, etc. debe de ser construida especial para las medidas del acrílico.

Se diseñaron e imprimieron en 3D coples con filamento de PLA (poliácido láctico) para poder unir las secciones de 1.8 m, tal que se evite en la medida de lo posible un escalón entre las secciones, se acoplaron las tres piezas (cople y dos tubos) con pegamento para acrílico. En total se instalaron tres coples para unir tres secciones de 1.8 m y una sección de 0.7 m de tubo de acrílico, con una longitud total de 5.7 m. Los coples se diseñaron para distribuir el peso de los tubos y evitar que la tubería se rompa por su peso, y se montaron sobre soportes para tubo instalados en la pared.

También se diseñaron e imprimieron puertos de medición con cuerda $\frac{1}{4}$ NPT para conectar transductores de presión y termopares. En la Figura 3.2 se observan a la izquierda dos piezas que hacen un puerto de medición y el cople impreso en PLA y dos ejemplos de su instalación.



Figura 3.2.- Izquierda, puerto de medición desarmado y cople de tubo, centro puerto de medición armado en el tubo de acrílico y derecha, montaje de cople con tubo fijo a soporte de pared.

En la Figura 3.3 se puede ver la montura del codo que alimenta de aire y partículas al sistema. Se construyó una base que permite su alineación respecto a la vertical y ambos están alineados respecto a la ubicación horizontal final de la base Cámara-LED.

La ubicación de los puertos de medición en el tubo de acrílico se puede ver en la Figura 5.1. Los puertos de medición son versátiles ya que en cada altura se pueden colocar dos transductores, en diferentes configuraciones como presión-presión, presión-temperatura, temperatura-temperatura.

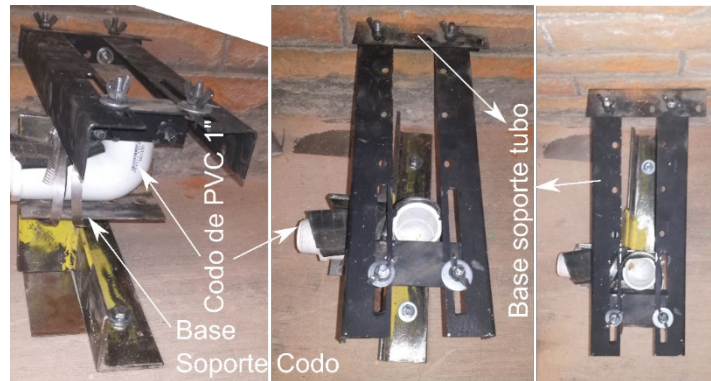


Figura 3.3.- Soporte de codo y soporte de tubo instalados. La alineación de estas dos piezas se hizo respecto a la ubicación de la base de la cámara y de su plataforma.

3.3. *Diseño y construcción del sembrador de partículas*

Una manera eficiente y controlada de introducir partículas en un flujo gaseoso es utilizando un tornillo sinfín, este tornillo debe de poder suministrar un flujo másico constante, el cual queda determinado por las revoluciones del sinfín. En general se encuentra en la literatura información para flujos de baja velocidad (30 m/s) y bajas revoluciones (de 5 a 10 RPM), también se encuentra información para introducir partículas de gran tamaño ($\sim\text{cm}$) o polvos ($\sim\mu\text{m}$), estos sistemas son utilizados en la industria alimenticia, química, farmacéutica, minera, etc. En general no existe una regla o ley que diga cómo debe de ser este tornillo, sin embargo hay estudios experimentales donde se estudian efectos de la geometría del sinfín y tamaño de grano, como Barati Dalenjan et al. (2012) y (2015) que estudia la geometría más conveniente para un transportador de partículas finas (Óxido de Zinc con tamaño de orden $\sim\mu\text{m}$) en el cual se concluye que el tornillo debe de tener una curvatura entre los dientes del tornillo y aspás delgada, así como pasos y área constantes del tornillo Figura 3.4, estos resultados ayudan a evitar la aglomeración de partículas en el sinfín así como evitar cambios súbitos en el flujo másico. Fernandez et al. (2011), habla de la uniformidad del flujo en el contenedor depende del patrón de extracción, que a su vez depende del diseño del tornillo y la tolva, la forma de las partículas y los efectos de fricción de la pared. Como se mencionó antes, las aplicaciones de este tipo de dispositivos es muy amplio y las soluciones son radicalmente diferentes Bates (2000). Para este trabajo se eligió un tornillo con sección transversal constantes, pasos entre hilos constantes y se fabricó en bronce.



Figura 3.4.- Tornillo sinfín, maquinado en bronce.

Otro aspecto importante de estos alimentadores es la forma de alimentar al tornillo sinfín. Por lo general esto se hace con tolvas que, presentan en la mayoría de los casos cambios en el flujo másico debido a la no uniformidad de caída de material. Si el sinfín no está lleno en todas las revoluciones el sembrado no es homogéneo. Se sabe de manera empírica que una tolva asimétrica, al menos en una de sus caras (posterior o frontal), ayuda a evitar este problema.

Con esta información se diseñó un sembrador de partículas con características únicas para el presente estudio. En la Figura 3.5 se muestra un plano con las dimensiones generales, la tolva frontal tiene un ángulo de caída de 30° y el resto de 45° . El diseño incluye una caja para asegurar que el sembrador sea hermético.

El sembrador se maquinó en el Taller del Instituto de Ingeniería UNAM en Naylamid. En la Figura 3.6 se puede ver el sembrador final.

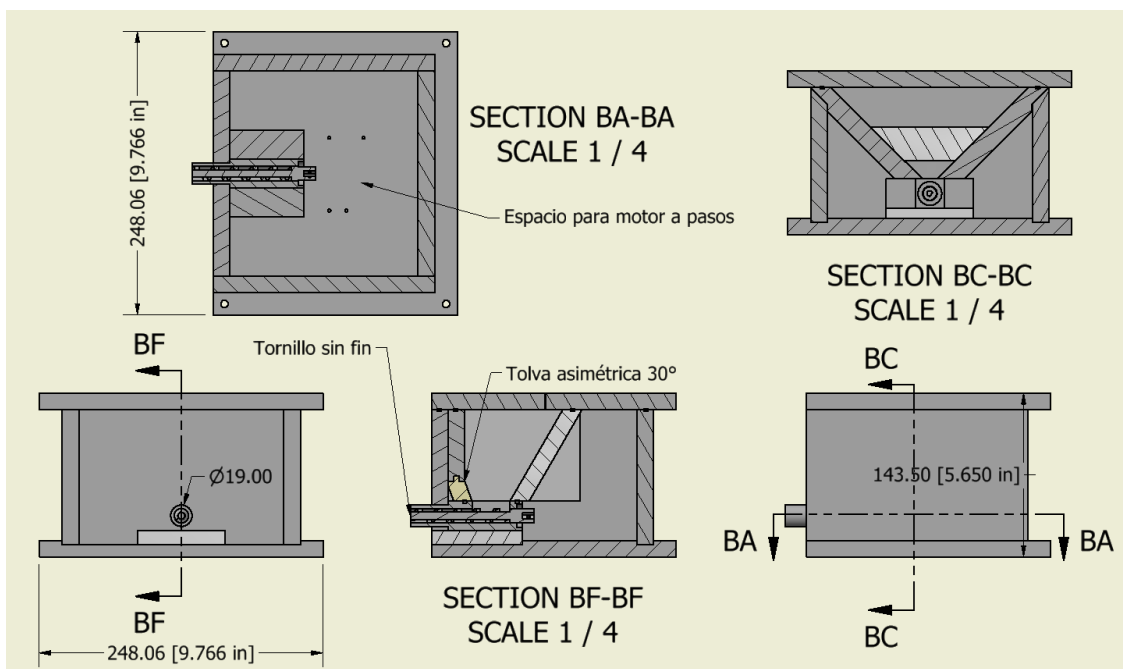


Figura 3.5.- Esquemático del sembrador de partículas, los planos técnicos se incluyen en el Apéndice 1.

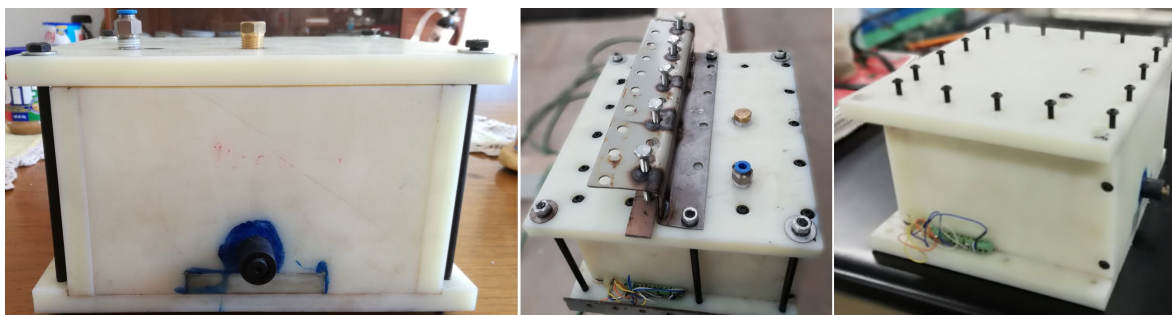


Figura 3.6.-Izquierda, cámara de partículas original, centro y derecha, cámara de partículas modificada.

3.3.1. **Motor a pasos (Micro pasos)**

Un problema que aparece regularmente en la literatura de alimentadores con tornillos sinfín es la falta de control para mover sólidos de manera constante y homogénea. Por lo general se utilizan motores de corriente continua o alterna por su costo y se acoplan a reductores de velocidad para poder variar tanto las revoluciones por minuto como la fuerza requerida para mover masas grandes de material.

Para poder mover el tornillo en este trabajo se utiliza un motor a pasos Minebea de dos fases híbrido Type 17PM-k102-01VSL de 3 V a 1.2 A. Se eliminó la necesidad de un reductor de velocidad, se controló con micro pasos para poder acelerarlo hasta revoluciones altas (300 RPM), usualmente este tipo de motores se utilizan en impresoras y por lo general en bajas rpm (15 RPM).

Se busca un intervalo de revoluciones grande para poder alimentar al flujo compresible y turbulento con diferentes flujos másicos.

Se controló el motor con un MSP430G2553 y se programó en el software *Energia V0101E0013*. El código se puede consultar en el Apéndice 2 y el diagrama de conexión en el Apéndice 3.

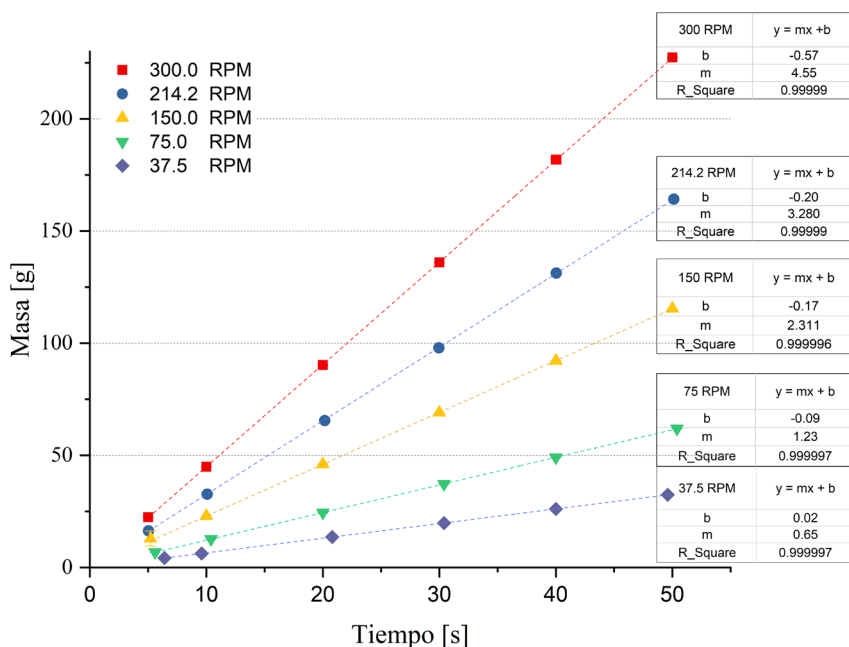
Se considera que el control, y los resultados obtenidos de flujo másico, la velocidad de sembrado y la implementación para un flujo de aire rápido son resultados importantes que pueden ser utilizados en otras áreas de investigación. En el Apéndice 4 se puede consultar la nota técnica que próximamente será enviada a *Journal of Fluids Engineering*.

3.3.2. **Caracterización del flujo másico de partículas.**

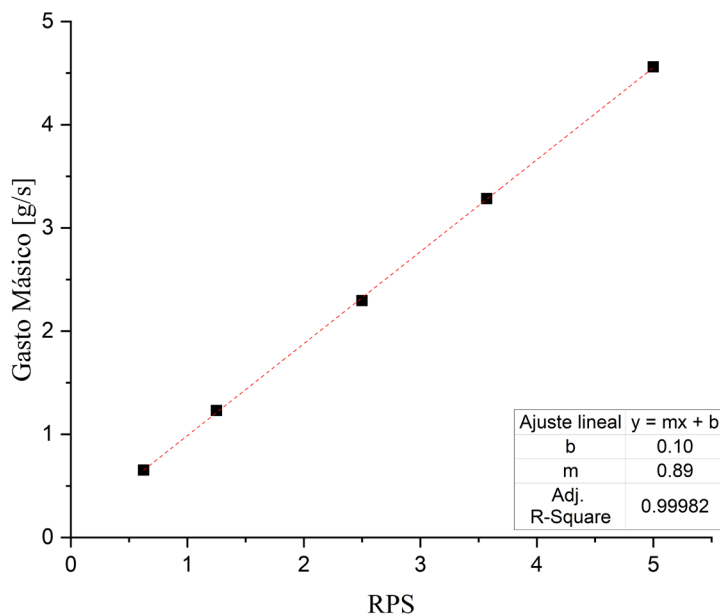
Para caracterizar el flujo másico se varió el tiempo de operación de 5 a 50 segundos en 6 intervalos, se realizaron 10 mediciones para cada tiempo de operación y se eligieron 5 velocidades del motor 300, 214.2, 150, 75 y 37.5 RPM. Las masas se midieron con una balanza analítica que tiene una incertidumbre asociada de 0.05 g.

De manera arbitraria se realizaron mediciones con la tolva completamente llena, a medio llenar y casi vacía, no se encontraron diferencias en la salida del material, lo que indica que las partículas se mueven hacia el sinfín de manera uniforme y existe una uniformidad al bajar por la tolva y llenar al sinfín, este resultado es importante ya que es producto de un buen diseño y control.

En la Gráfica 3.1 se pueden observar los valores promedios para cada tiempo y una desviación estándar que en promedio no supera los 0.2 g, se realizó un ajuste lineal a cada una de las 5 velocidades que se utilizaron y se obtuvieron en todos los casos coeficientes de correlación de Pearson de al menos 0.9999. En la Gráfica 3.2 se muestran las pendientes de cada ajuste contra las revoluciones por segundo (RPM) y se obtiene un ajuste lineal de los datos, donde la pendiente permite conocer cuánta masa de partículas sale por el sinfín en una revolución (0.89 g/rev).



Gráfica 3.1.- Resultados de masas promedio contra tiempo para diferentes revoluciones por minuto. Se muestran los ajustes lineales obtenidos. Las desviaciones estándar para cada punto no son mayores a 0.2 g, por lo que no se pueden ver en la gráfica.



Gráfica 3.2.- Gastos másico en función de la velocidad de rotación del tornillo. La pendiente del ajuste lineal representa la cantidad de material que sale en una revolución.

3.3.3. *Instalación en el experimento*

La cámara de partículas se instaló antes del codo de alimentación a una distancia de 0.405 m (Figura 3.7), se pegó a un tubo de PVC claro cédula 80, para observar de manera directa la salida del material.



Figura 3.7.- Instalación de la cámara de partículas.

3.4. *Separador ciclónico.*

Para evitar que las partículas en el sistema se dispersen en el ambiente del laboratorio, se diseñó y construyó un separador ciclónico con un bidón de 100 L, (Figura 3.8). Los detalles del diseño de separadores ciclónicos se pueden consultar en Hoffmann y Stein (2007).

El sistema descarga a presión atmosférica, por lo que el tubo se encuentra separado a una cierta distancia de la entrada del separador ciclónico. Para evitar la pérdida de partículas durante el arranque o paro del experimento, se fabricó una malla metálica cubierta con forro para cojines, (Figura 3.8) Izquierda.

El tubo de entrada al separador (de 7.6 cm de diámetro) se colocó a 10.16 cm de separación del tubo de salida (de 2.51 cm de diámetro).



Figura 3.8.- Izquierda, se muestra el último puerto de medición con la malla metálica y con el forro para cojines, centro, instalación de separador ciclónico y derecha, se muestra el tubo de salida.

Para evitar que las partículas con suficiente energía cinética no pudiesen escapar del separador ciclónico, se diseñó y colocó un tubo (de 7.6 cm de diámetro) en la salida del separador. Este tubo también se forró con malla y tela (Figura 3.8 central y derecha).

4. Velocimetría por Seguimiento de Sombras de Partículas (PSTV)

En este trabajo se utiliza la técnica Velocimetría por Seguimiento de Sombras de Partículas (PSTV por sus siglas en inglés) para estudiar la dinámica de las interacciones partícula-partícula, partícula-tubo y partícula-gas. La implementación de esta técnica se inspiró en la técnica Velocimetría por Sombras de Partículas o PSV por sus siglas en inglés, desarrollada por Estevadeordal y Goss (2005), que se basa en retratar la sombra de partículas en dos imágenes. La sombra se genera a partir de iluminar con un volumen de luz colocado frente a la zona que se desea estudiar (Figura 4.1), alineado con el eje óptico de la cámara.

Echeverría (2015), utilizó esta técnica para estudiar un flujo supersónico de aire descargado a la atmósfera, saliendo de un tubo de 4 mm de diámetro interno, con un número de Mach $M = 1.4$. Por lo que se sabe que la técnica tiene una resolución espacial y temporal suficientes para estudiar un flujo con números de Mach entre $0.3 < M < 1$.

Al ser un flujo compresible los cambios de densidad se pueden estudiar de manera cualitativa con técnicas no intrusivas como lo son *shadowgraph* y *schlieren* Porta (2013). En particular la técnica PSV coincide con un arreglo de *shadowgraph* simple (Figura 4.1), esto ofrece la oportunidad de tener dos técnicas que aportan información diferente, pero de manera simultánea, aunque en un flujo como el que se desea estudiar no se espera que existan cambios de densidad lo suficientemente grandes como para que este arreglo *shadowgraph* los detecte.

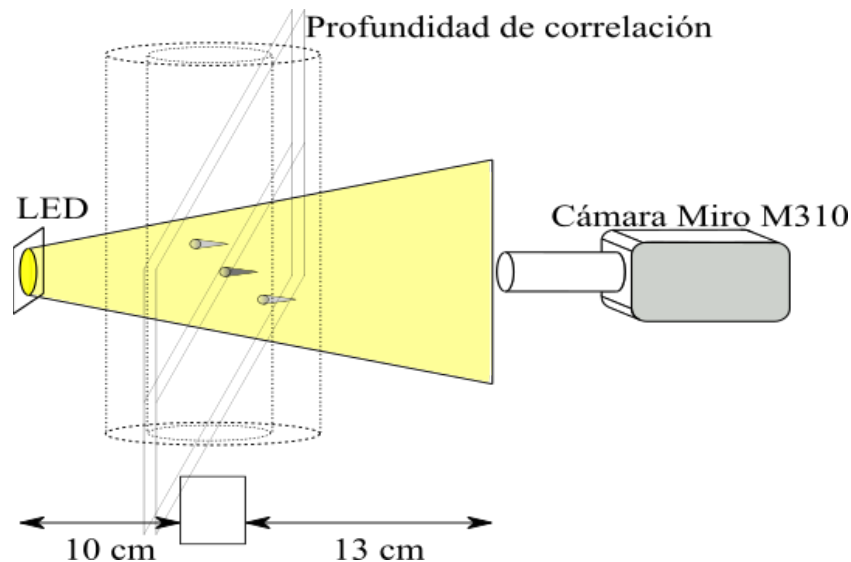


Figura 4.1.- Arreglo típico de PSV y simultáneamente arreglo *shadowgraph* simple, se muestran distancias reales del arreglo utilizado para este trabajo. Este arreglo coincide también con el arreglo para PSTV.

PSV es una variación de PIV, en la que se utiliza una fuente de luz menos intensa que en el PIV tradicional ya que no depende de la dispersión Mie de las partículas. En este caso se utiliza la luz de un LED de alta potencia. El resultado son imágenes similares a las obtenidas en PIV pero

invertidas, es decir, en lugar de tener partículas iluminadas sobre un fondo negro se obtienen partículas oscuras sobre un fondo brillante. La región espacial estudiada depende de que la distancia de profundidad de campo sea pequeña (DOF por sus siglas en inglés), que a su vez depende, en su totalidad, de la óptica utilizada para limitar el espesor del volumen de medición.

Además, es importante considerar los efectos que tienen las partículas fuera de foco en los resultados de la correlación cruzada. Este parámetro, llamado profundidad de correlación, determina la profundidad de medición, es decir, el espesor del volumen real donde se está midiendo y considera qué sombras aún contribuyen de manera significativa los resultados de la correlación cruzada. Existen dos relaciones equivalentes para poder determinar esta profundidad, las cuales fueron obtenidas teóricamente por Olsen y Adrian (2000) y validadas mediante simulación numérica y experimentalmente por Bourdon et al. (2004) y la profundidad de correlación se calcula con la siguiente expresión:

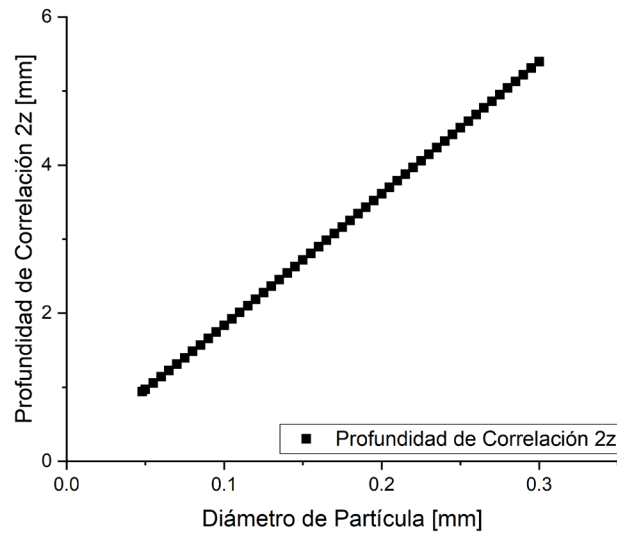
$$2z = 2 \left[\frac{(1 - \sqrt{\varepsilon})}{\sqrt{\varepsilon}} \left(\frac{f^{\#2} d_p^2 + 5.95(m+1)^2 \lambda^2 f^{\#4}}{m^2} \right) \right]^{\frac{1}{2}} \quad \text{Ec. (20)}$$

Donde ε es un parámetro umbral (normalmente 0.01), $f^{\#}$ es el número f de la óptica utilizada, λ es la longitud de onda predominante de la luz utilizada y m es la magnificación. El parámetro de umbral es la relación de la intensidad de partícula en el eje (para alguna z) a la intensidad en el foco (en $2z = 0$). Meinhart et al. (2000) demostró que cuando esta proporción cae por debajo de 0.01, la intensidad de partículas fuera de foco es suficientemente baja para no influir en la medición de la velocidad de manera significativa.

Con la distribución de tamaños se puede estimar la profundidad de correlación, esta se muestra en la Gráfica 4.1 y considerando el tamaño de partícula más frecuente ($d=0.094$ mm) se tiene una profundidad de correlación $2z \sim 1.7$ mm. Comparado con la profundidad de campo $\text{DOF} = 0.35 \pm 0.06$ mm es 4.8 veces mayor.

Esto implica que al realizar un análisis utilizando la correlación cruzada se debe tener en cuenta que los resultados consideran partículas desenfocadas ~ 1.7 mm a partir del plano de enfoque en ambas direcciones. Debido esencialmente a que la escala no se conserva, no se deben de considerar partículas que estén en planos alejados al plano de enfoque, por lo que el análisis de las imágenes es crítico para asegurar que se tiene una escala adecuada sin importar el tamaño de las partículas.

El problema real radica en que al tener partículas de tamaño considerable, estas se siguen detectando lejos de la profundidad de correlación, aunque de manera desenfocada.



Gráfica 4.1- Profundidad de correlación obtenida a partir de la Ecuación (26).

Para las técnicas como PIV y PSV los trazadores son adecuados si responden a cambios súbitos de velocidad del flujo. Estos cambios están relacionados con el nivel de turbulencia y las escalas involucradas tanto temporales como espaciales. En este estudio la información que proporciona el tiempo de relajación está relacionada a la diferencia de velocidades entre el gas y las partículas, ya que de acuerdo a la teoría de Fanno el flujo se mantiene acelerado durante toda su trayectoria.

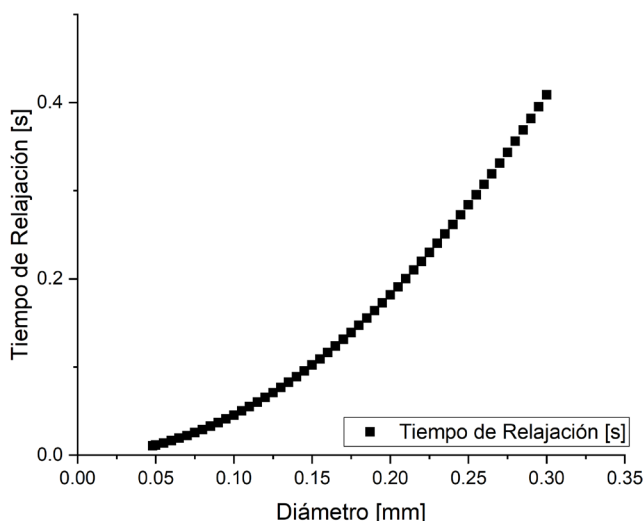
El tiempo de relajación o de respuesta τ_s es una medida de la tendencia de las partículas a alcanzar el equilibrio con la velocidad del fluido (velocidad relativa cero), y se utiliza para determinar qué tan fielmente una partícula sigue al fluido cuando existen variaciones en la velocidad del flujo, como aceleraciones, giros, etc. Si el tiempo de relajación es pequeño, la velocidad de la partícula será muy similar a la del fluido después de un cambio en su velocidad (Anwar (2008), Melling (1997) y Raffel et al. (2007)).

El tiempo de relajación se define como:

$$\tau_s = \frac{d_p^2 \rho_p}{18\mu} \quad \text{Ec. (21)}$$

donde d_p es el diámetro de las partículas, ρ_p la densidad de las partículas y μ es la viscosidad dinámica del fluido en el que se mueven (el desarrollo de la Ec. (21) se puede consultar en Crowe et al. (2011)). Este resultado es ampliamente utilizado en trabajos donde se siembran flujos de alta velocidad o turbulentos (Anwar (2008), Scarano (2008), Hileman y Samimy (2001)).

Utilizando los valores proporcionados por el fabricante de las partículas (salvo el tamaño de las partículas) y considerando la viscosidad dinámica del aire como $\mu_c = 1.846 \times 10^{-5}$ Kg/ms, se obtienen tiempos de relajación τ_s que van del orden de 10^{-2} s para la partícula más pequeña hasta 10^{-1} s para la partícula más grande, utilizando en ambos casos los diámetros obtenidos a partir de la distribución de tamaños y suponiendo que el área proyectada es circular (Gráfica 2.2), los resultados de tiempos de relajación se pueden ver en la Gráfica 4.2.



Gráfica 4.2.- Tiempos de relajación para las partículas utilizando el intervalo de la distribución medida de tamaños (Gráfica 2.1), calculadas a partir de la Ec. (27) y considerando a las partículas como esféricas.

Las técnicas PSV y PSTV comparten el mismo arreglo experimental (Figura 4.1). La diferencia esencial entre ellas es la manera en que se procesan las imágenes. En este trabajo se tienen partículas de un tamaño considerable (~ 0.1 mm), y el flujo gas-partículas que se desea estudiar es en un régimen diluido por lo que el análisis a través de la correlación cruzada no es práctico. A su vez el tamaño de las partículas impide que se pueda utilizar la profundidad de correlación como se explica antes, en su lugar se definió una nueva distancia llamada profundidad de detección (o DOD por sus siglas en inglés). Como producto de este trabajo, se escribió un artículo en el cual se describe la técnica y el proceso para determinar el DOD. El artículo *A method to determine the measurement volume for particle shadow tracking velocimetry (PSTV)* fue publicado en el *Journal of Visualization* (Echeverría et al. (2020)) y se puede consultar en el Apéndice 5, en el cual se determina que el DOD=3.55 mm, lo que implica que únicamente partículas que se encuentren a lo más ± 1.77 mm del plano de enfoque serán consideradas, esta distancia es casi el doble de la profundidad de correlación, lo que justifica el uso de PSTV en lugar de PSV al no subestimar la distancia real de detección. Adicionalmente en el artículo se presentan resultados importantes de la técnica aplicada al caso de estudio de este trabajo.

5. Instrumentación del experimento

Para poder utilizar la teoría de Fanno se requieren mediciones confiables de presión, temperatura y flujo másico. Para obtener tales mediciones se utilizaron 5 transductores de presión, 6 termopares expuestos tipo K, y un medidor de flujo tipo Coriolis. La ubicación y distancias importantes del experimento se muestran en la Figura 5.1.

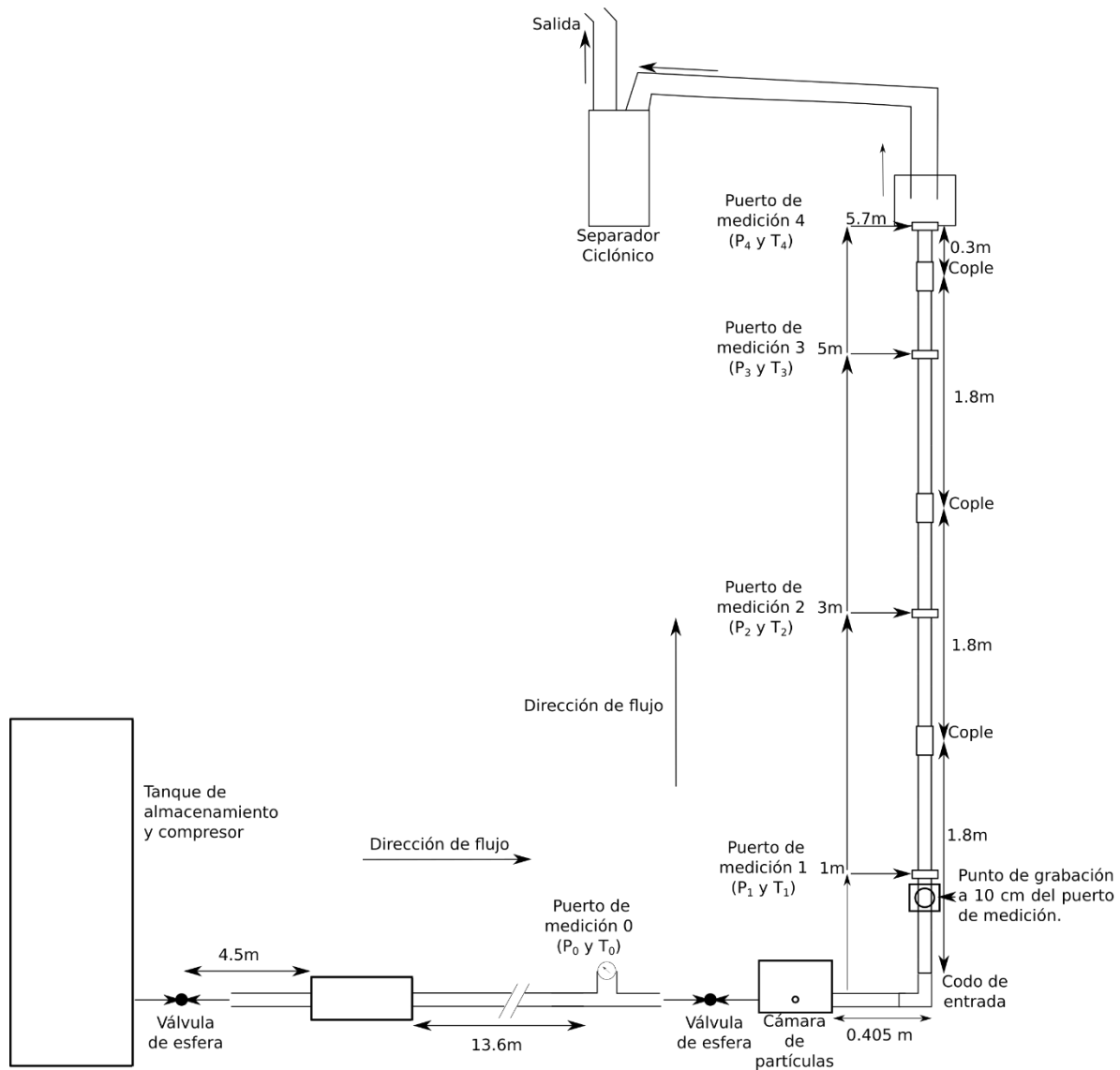


Figura 5.1.- Esquema del experimento completo, ubicación de puertos de medición en configuración presión-temperatura en cada uno.

Los transductores de presión utilizados son de la marca MEAS y tienen las siguientes características:

1 U535P-010005-300PS, de 300 ± 0.3 psi.

2 U535P-010005-100PS, de 100 ± 0.1 psi.

2 U535P-010005-50PS, de 50 ± 0.05 psi.

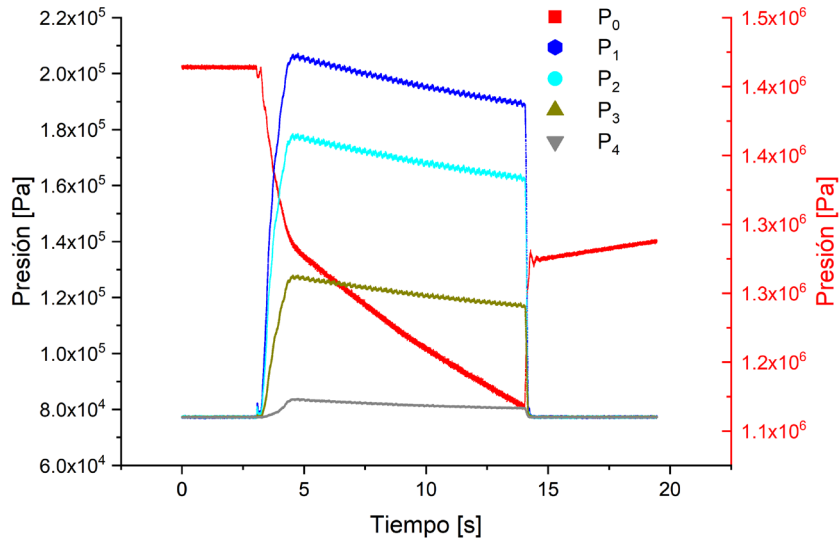
Asimismo, se utilizaron 5 termopares con incertidumbre asociada de 0.1°C ; cuatro en los puertos de medición instalados a lo largo de la sección de pruebas, más uno de control para registrar la temperatura ambiente. Por otro lado, el medidor tipo Coriolis (Endress & Hauser Promass 83F), tiene una incertidumbre de 1 g/s en todo el intervalo de medición.

Todas las señales de presión, temperatura y flujo másico fueron registradas por un sistema de adquisición de datos IMC Cronos-Flex CRFX-2000. La tasa de adquisición empleada para los transductores de presión y para el Coriolis fue de 2 kHz, mientras que para los termopares fue de 1 kHz. Se eligieron estas frecuencias por las características del equipo de adquisición y por la respuesta de los transductores utilizados.

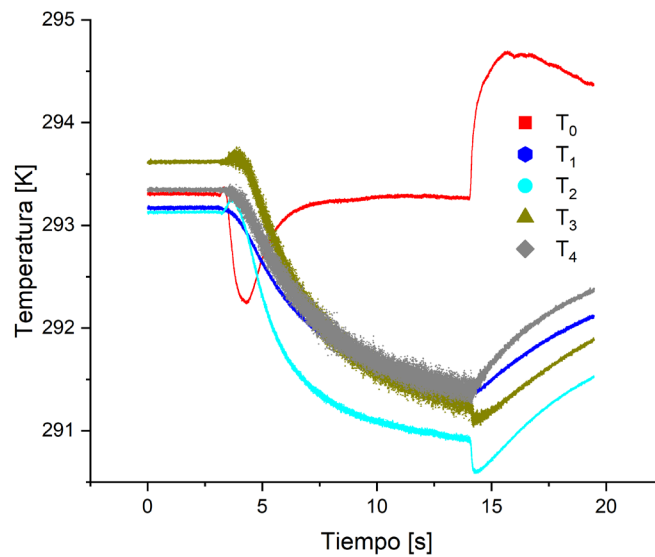
Se utilizó una Cámara Phantom Miro M310 con una frecuencia de grabación de 7200 cps y un tiempo de separación entre cuadros de 400 ns.

5.1. Caracterización del flujo de aire y análisis

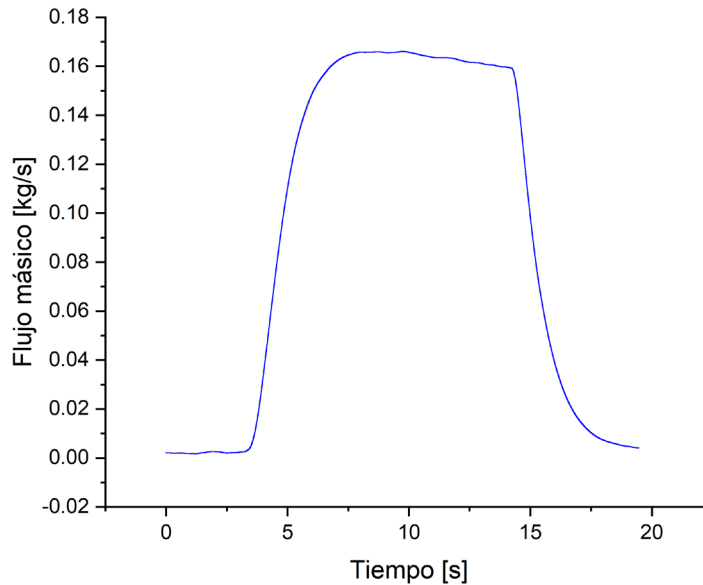
Utilizando los transductores se caracterizaron 7 aperturas de válvula o 7 flujos máxicos. Se muestra un ejemplo de las señales típicas de presión, temperatura y flujo máxico para la apertura 7 en la Gráfica 5.1.



Gráfica 5.1.- Ejemplo de señales de presión adquiridas, se observa el comportamiento de la presión en el tiempo de la apertura 7. El subíndice indica el puerto de medición.



Gráfica 5.2.- Ejemplo de señales de temperaturas adquiridas, se observa el comportamiento de la temperatura en el tiempo de la apertura 7. El subíndice indica el puerto de medición.



Gráfica 5.3 Ejemplo de señal de flujo másico, se observa el comportamiento del flujo másico en el tiempo de la apertura 7.

Se calculó el factor de compresibilidad Z , para cada apertura, se define como:

$$Z = \frac{p}{\rho RT} \quad \text{Ec. (22)}$$

Para el cálculo se utilizan los valores promedios de un intervalo de las señales donde hay flujo constante, la desviación estándar para las señales de presión, temperatura y flujo másico no supera el 1%

Z varía entre 1 y 0.9999 para todos los casos, por lo que es válido suponer al gas como ideal. Utilizando Ec. (16) se puede calcular la velocidad y al sustituirla en la Ec. (17) el número de Mach, con lo cual se obtienen las siguientes expresiones:

$$V = \frac{\dot{m}RT}{PA} \quad \text{Ec. (23)}$$

$$M = \frac{\dot{m}RT}{PA\sqrt{\gamma RT}} \quad \text{Ec. (24)}$$

El resultado se puede ver en la Gráfica 5.4, los valores obtenidos son promedios de las señales donde no hay cambios significativos y las barras de error corresponden a las desviaciones estándar.

El comportamiento general observado para las diferentes aperturas es de un flujo que se acelera. Para todas las aperturas se obtienen flujos subsónicos.

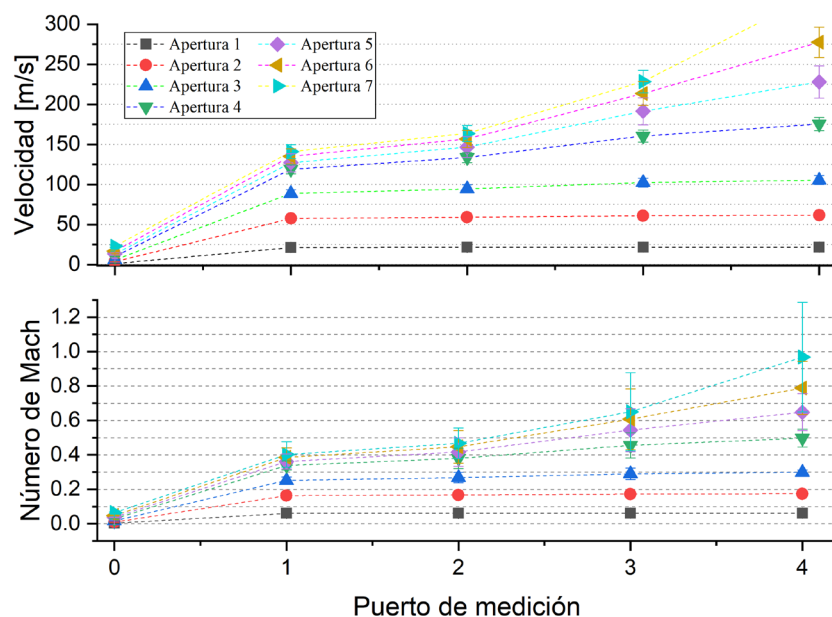
De acuerdo con los objetivos planteados, se desea estudiar un flujo compresible, es decir $M > 0.3$, sin embargo la presión necesaria para lograr este valor ocasiona que el flujo másico no se pueda mantener el tiempo suficiente para realizar el experimento, además de poner demasiado esfuerzo en las juntas en los tubos de acrílico así como los puertos de medición, por lo que se decidió trabajar únicamente con las aperturas 1 y 2, para hacer visualizaciones del flujo de partículas y únicamente con la apertura 2 para un análisis completo con partículas.

Se analizaron los distintos flujos utilizando la teoría de Fanno, para calcular el número de Mach, presión y temperatura, en el puerto de medición 1 utilizando valores de número de Mach, presión y temperatura del puerto de medición 4, la distancia entre estos dos puertos de medición es de 4.7 m.

Tabla 5.1.- Se presentan los resultados teóricos obtenidos con la teoría de Fanno así como sus errores porcentuales respecto a las mediciones promedio realizadas, se presentan los resultados para las 7 aperturas, se utilizaron los valores de medición del puerto 4 y se muestran los resultados para el puerto 1 de medición.

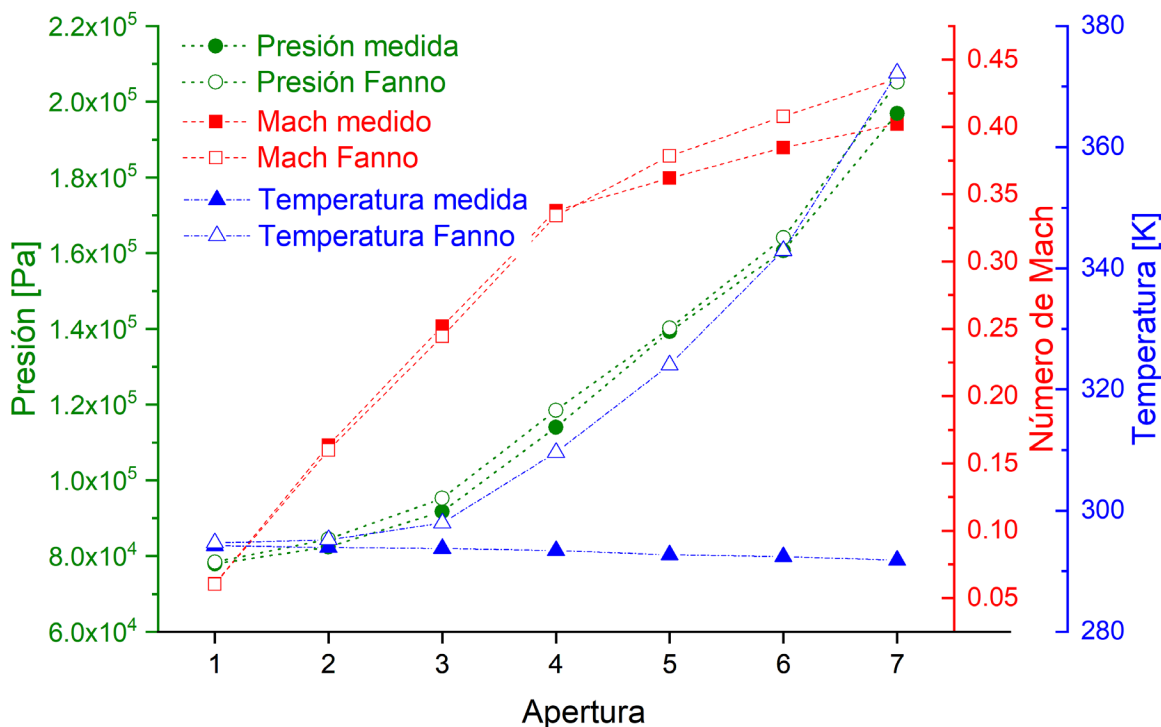
Apertura de válvula	Número de Mach experimental	Número de Mach Fanno	Error relativo [%]	Presión experimental [Pa]	Presión Fanno [Pa]	Error relativo porcentual 1	Temperatura experimental [K]	Temperatura Fanno [K]	Error relativo porcentual
1	0.0606	0.0602	0.6	77918.7	78432.7	0.7	294.2	294.7	0.1
2	0.1636	0.1599	2.2	82434.1	84492.0	2.5	293.8	295.2	0.4
3	0.2519	0.2443	3.0	91766.8	95265.1	3.8	293.7	297.9	1.4
4	0.3378	0.3339	1.2	114048.2	118524.2	3.9	293.3	309.6	5.5
5	0.3619	0.3784	4.5	139260.3	140175.7	0.7	292.7	324.1	10.7
6	0.3846	0.4079	6.0	160656.6	164069.9	2.1	292.4	342.9	17.3
7	0.4020	0.4356	8.4	196900.3	205238.4	4.2	291.8	372.2	27.6

Los resultados obtenidos muestran un comportamiento acelerado al igual que el observado en la Gráfica 5.4 y coincide con lo predicho por la teoría de Fanno, al menos hasta la apertura 5 (ver Gráfica 5.5), donde se registra un error relativo menor al 10% para la temperatura.



Gráfica 5.4.- Superior: Velocidad del aire contra apertura. Inferior: Número de Mach contra apertura.

Una de las posibles causas por las que existan discrepancias entre los resultados del experimento y la teoría de Fanno es que el factor de fricción es considerado como constante, además de que este factor es estimado con la ayuda de la ecuación de Colebrook (Colebrook y White (1937) y Colebrook et al. (1939)) y se utiliza un valor diferente para cada apertura, debido a que se tiene un número de Reynolds diferente en cada caso. En la Tabla 5.2 se muestran los valores del número de Reynolds y el factor de fricción correspondiente para cada altura, en todos los casos se utilizó una rugosidad estimada de 1.5×10^{-6} m.



Gráfica 5.5.- Comparación entre los resultados experimentales y la teoría de Fanno para la presión, temperatura y número de Mach.

Tabla 5.2.- Valores del número de Reynolds y factor de fricción, para cada apertura.

Apertura	Re	f
1	2.7×10^4	0.02415
2	8.3×10^4	0.01900
3	1.6×10^5	0.01679
4	3.3×10^5	0.01485
5	5.2×10^5	0.01388
6	7.3×10^5	0.01328
7	1.1×10^6	0.01268

Estos resultados indican que el flujo de aire es turbulento en todos los puertos de medición y en todas las aperturas.

Adicionalmente se comprobó que las medidas del flujo másico fueran correctas, debido a que la el equipo se utilizó cerca de su límite de operación. Se hicieron además mediciones con un tubo de Pitot con lo cual se descartó cualquier mal funcionamiento del equipo.

5.2. Sincronización de Cámara-Led, Cámara de Partículas y Sistema de Adquisición de Datos.

Una de las cosas que se desea saber es si existe un cambio significativo en las señales de los transductores en el momento en que existen partículas en la vecindad del puerto de medición y en el momento de introducirlas al tubo. Para buscar esto se sincronizaron las señales entre el sistema de adquisición IMC Cronos-Flex CRFX-2000, la inyección de las partículas y la grabación con el sistema Cámara-LED. En la Figura 5.2 se muestra un esquema de bloques de esta sincronización y en la Figura 5.3 se muestra un diagrama de tiempo de las señales involucradas. Además, se utiliza esta sincronización para que el sistema siempre grabe la misma cantidad de datos, dependiendo únicamente de la apertura de la válvula. Se fijó un interruptor de fin de carrera en la apertura deseada, para poder tener una señal de inicio del sistema de sincronización y como tope para poder asegurar que la respetabilidad de los experimentos.

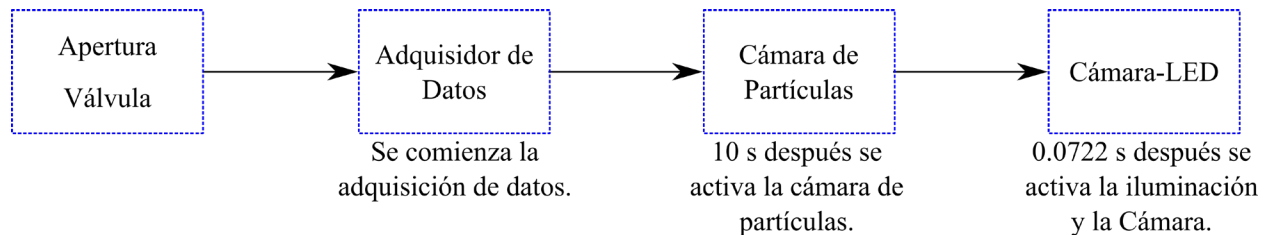


Figura 5.2.- Esquema de funcionamiento del disparador.

El adquisidor guarda la información durante $\Delta t = 13.116 s$ y la señal consta de tres intervalos, $t_1 = 10 s$ señales sin la presencia de partículas, al terminar se enciende la cámara de partículas, y después de $t_2 = 0.4235 s$ y $t_2 = 0.5082 s$ (estos tiempos se deben a que los puertos 3 y 4 se encuentran más arriba y las partículas tardan más tiempo en llegar, para asegurar que ya existan partículas en la zona de interés se utilizan esos tiempos respectivamente dependiendo de la posición en la que se esté gravando) se dispara la cámara y el LED, la grabación de la cámara dura $t_3 = 2.671 s$ que corresponde a 19,230 cuadros o 9,615 pares de imágenes.

Para poder hacer la sincronización de la cámara con el resto de las señales sin perder la capacidad de sincronización de la misma se utilizó una compuerta AND como seguidor que permite realizar el disparo de la luz de manera sincronizada con el circuito de control de la Cámara-LED. El circuito de generación de pulsos se puede consultar en la Figura 5.4.

6. Experimentos

Se realizaron mediciones con el adquisidor de señales y se grabaron las partículas en cuatro alturas distintas, se utilizó el sistema de sincronización descrito en el apartado anterior. Las ubicaciones de los puntos de medición H_1, H_2, H_3 y H_4 así como los puertos de medición se pueden consultar en la Figura 6.1.

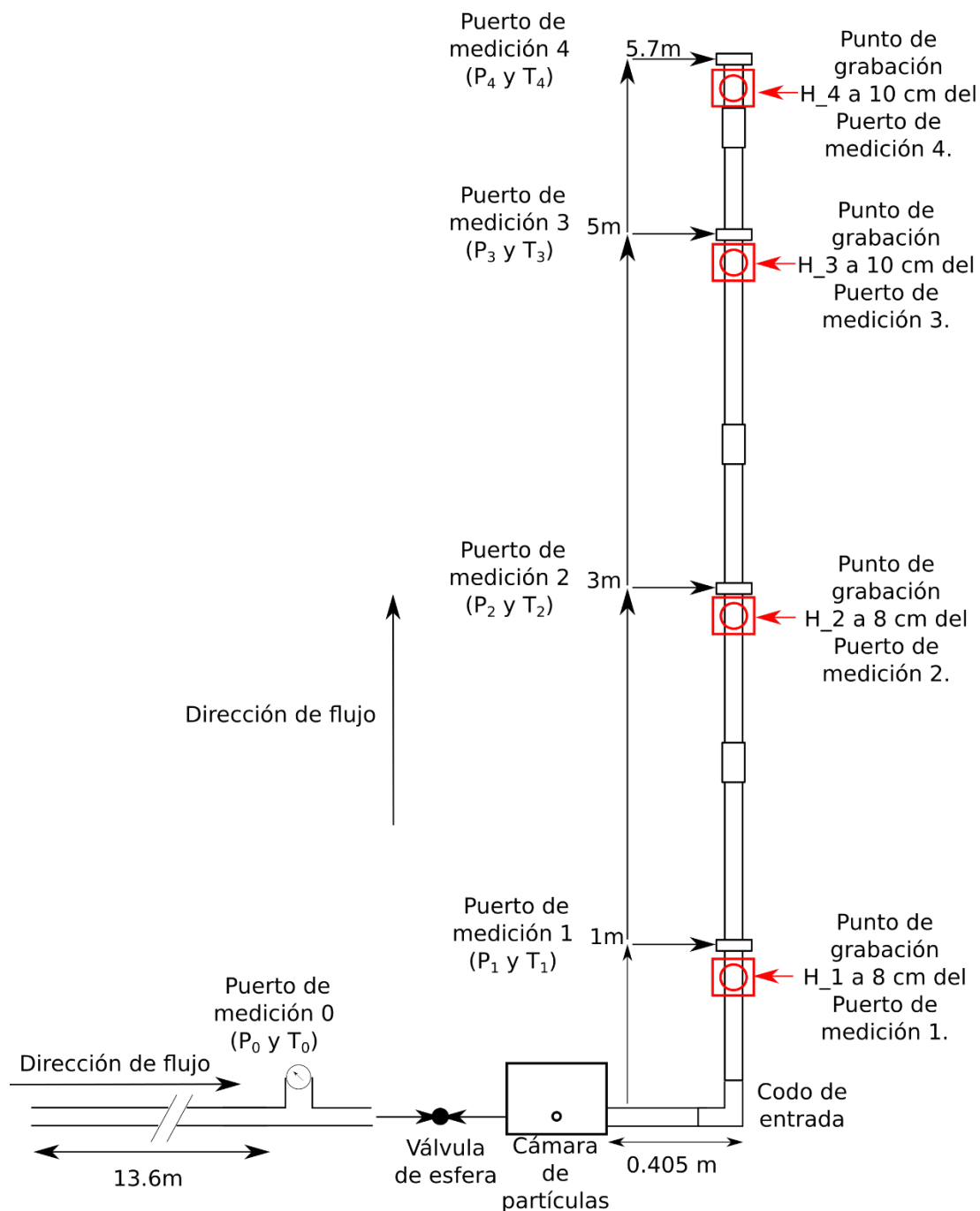


Figura 6.1.- Puntos de medición con la cámara rápida.

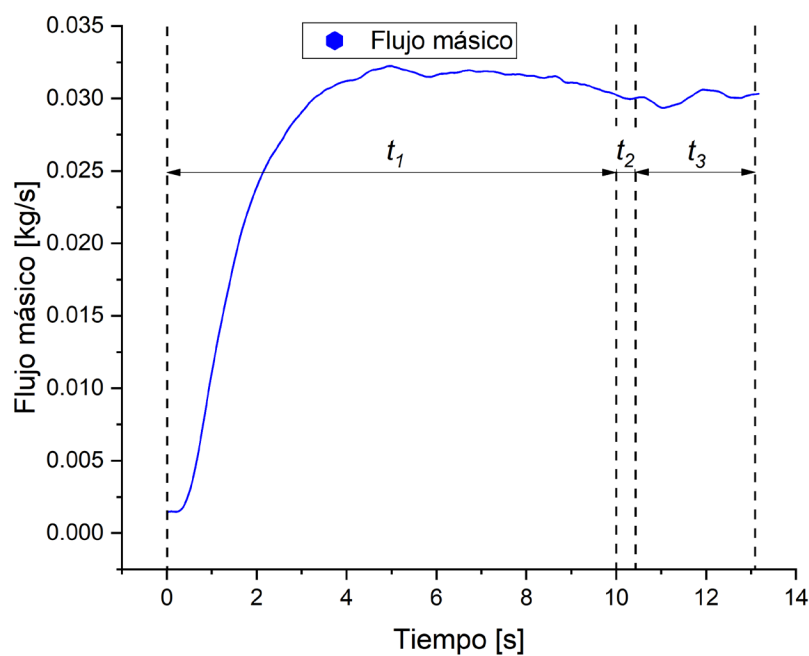
Se realizaron 4 tomas de datos para cada una de las 4 posiciones de la cámara. En total se realizaron 16 experimentos y se registraron las señales de flujo másico, presión y temperatura de cada puerto de medición. En cada caso se colocó la cámara en una altura diferente, H_1, H_2, H_3 y H_4 (Figura 6.1), a pesar de tener 16 experimentos, sólo se analizaron 10, debido a que en 6 casos más de un transductor se saturó dando lecturas erróneas. También en dos casos no se tuvieron partículas debido a que se vació la cámara de partículas.

Todos los experimentos fueron realizados en un mismo día a lo largo de 18 hr aproximadamente y en ese periodo los cambios de temperatura ambiente del laboratorio pueden ser considerados insignificantes ya que la temperatura promedio fue de 296 K con una variación máxima de un grado.

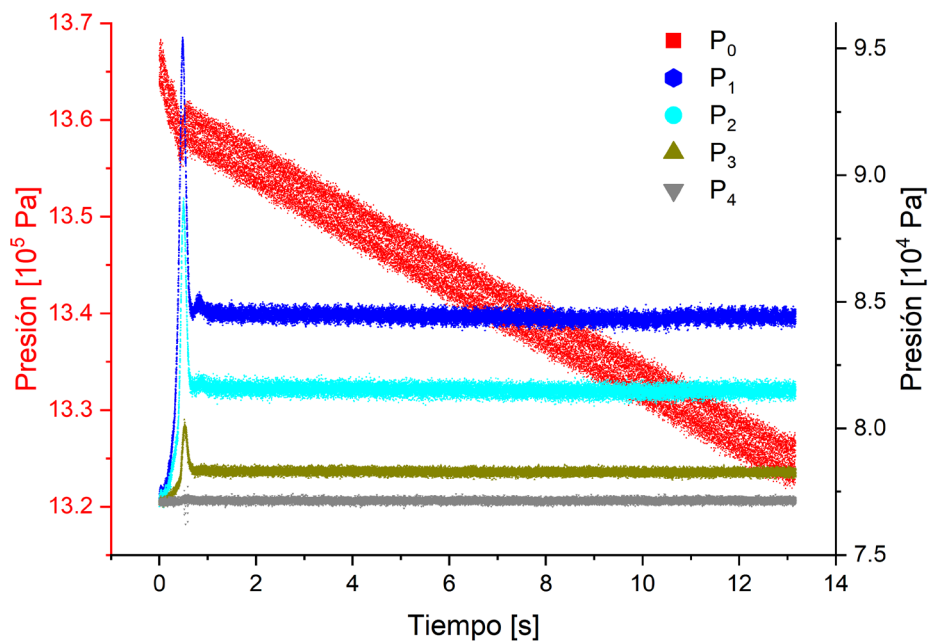
6.1. Resultados y análisis

A continuación se muestran los resultados obtenidos con los transductores y con la técnica PSTV.

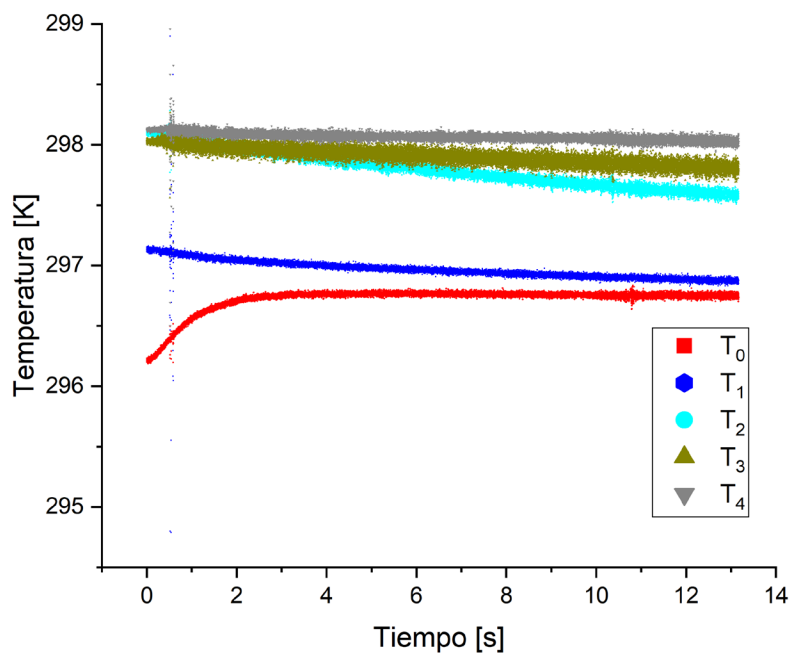
En las Gráficas 6.1, 6.2 y 6.3 se muestran ejemplos de las señales completas de flujo másico, presión y temperatura respectivamente. En todos los experimentos la presión en el último puerto de medición P_4 (Gráfica 6.2) corresponde a la presión atmosférica.



Gráfica 6.1.- Señal de flujo másico completa. Se observan los intervalos de tiempo t_1 , t_2 y t_3 .



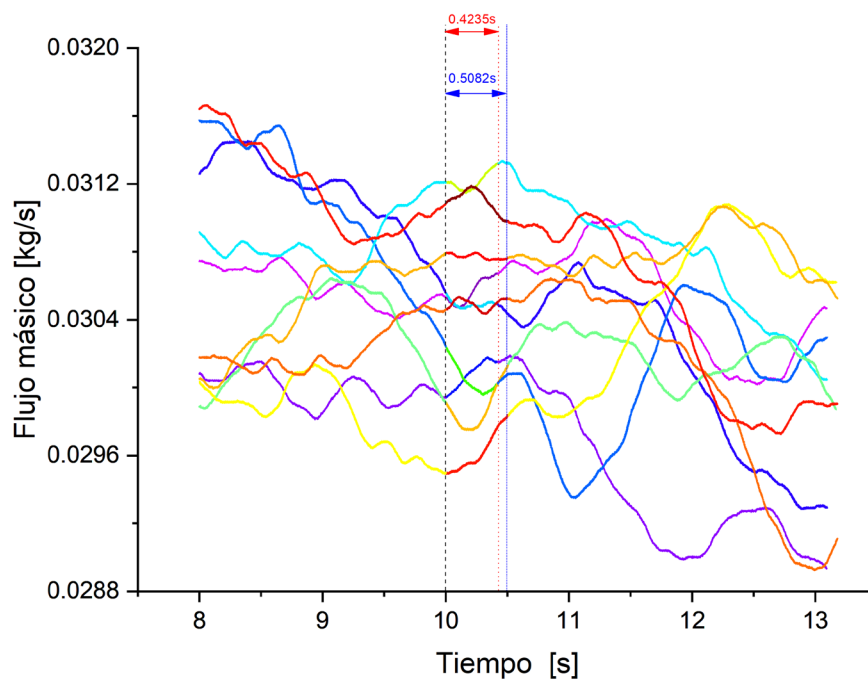
Gráfica 6.2.- Señales de presión completas de los 5 puertos de medición. El subíndice indica el puerto de medición.



Gráfica 6.3.- Señales de temperatura completas de los 5 puertos de medición. El subíndice indica el puerto de medición.

6.2. Resultados a partir de los transductores

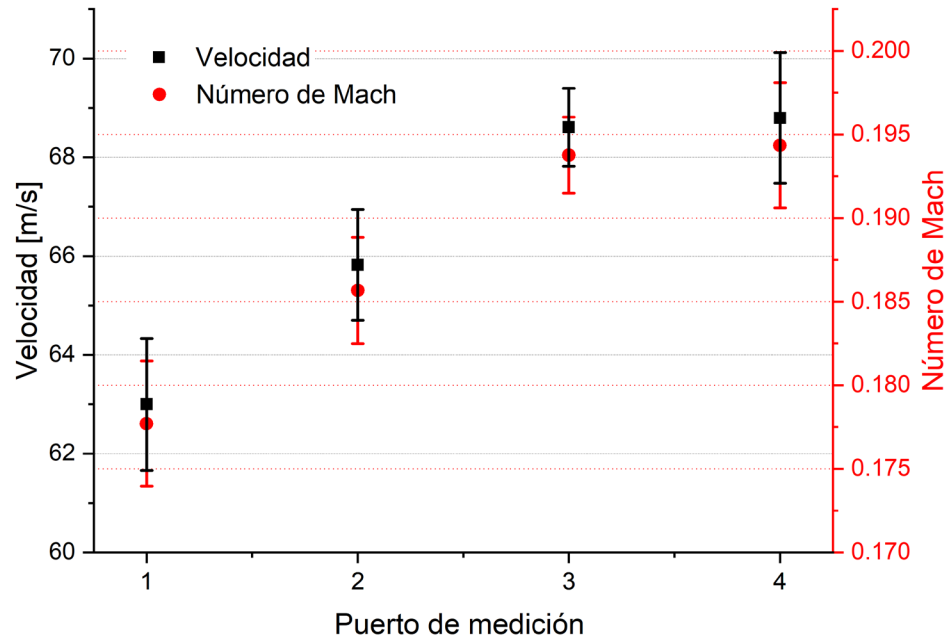
Un aspecto importante de este proyecto es que se puede mostrar, a pesar de la complejidad de los flujos, que los experimentos son repetibles. En la Gráfica 6.4 se pueden ver los flujos máscicos de cada experimento a partir del segundo 8 en el que se consideró que el flujo estaba desarrollado. Se observa que todos los valores varían a lo más 9%. También se muestran los intervalos correspondientes a t_2 (para las alturas H_1 y H_2 $t_2 = 0.4235 s$ y para H_3 y H_4 $t_2 = 0.5082 s$). Las variaciones en el flujo máscico son del orden de la incertidumbre asociada al equipo de medición.



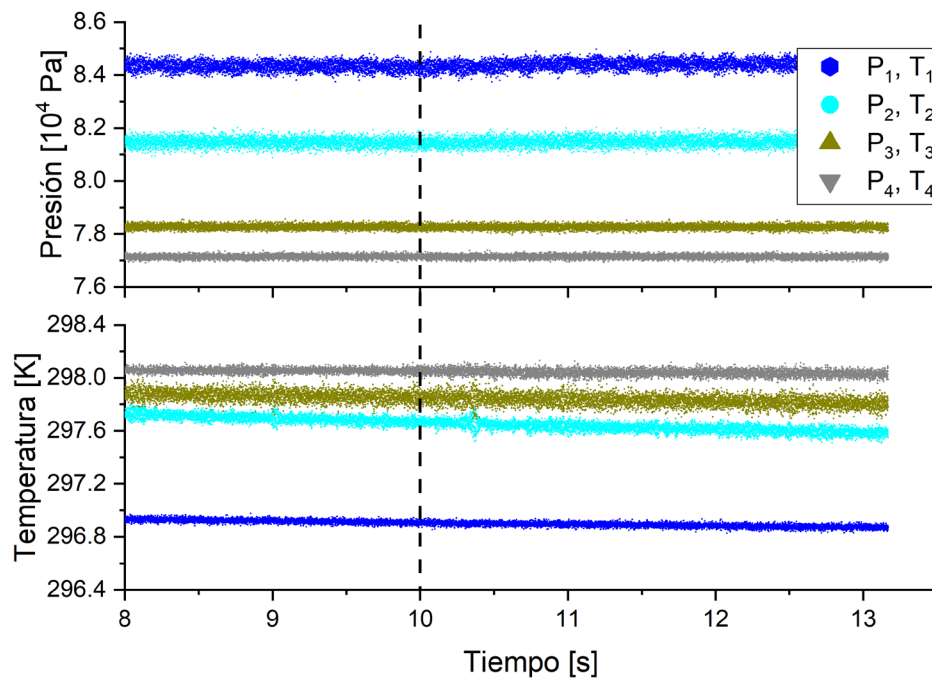
Gráfica 6.4.- Flujos máscicos de todos los experimentos.

Con los valores registrados de flujo máscico, presión y temperatura se calcularon las velocidades y números de Mach (Ec. 27 y 28 respectivamente), para cada experimento, así como los valores promedios para cada puerto de medición. Estos resultados se muestran en la Gráfica 6.5. Se puede observar que el comportamiento es creciente en ambos casos así como la presión y la temperatura son decrecientes, comportamiento predicho por la teoría de Fanno, ya que la entropía está aumentando conforme el flujo se acerca a $M = 1$.

También se observa que el flujo al llegar al final del tubo se desacelera, debido principalmente a que es descargado en aire, que está quieto.



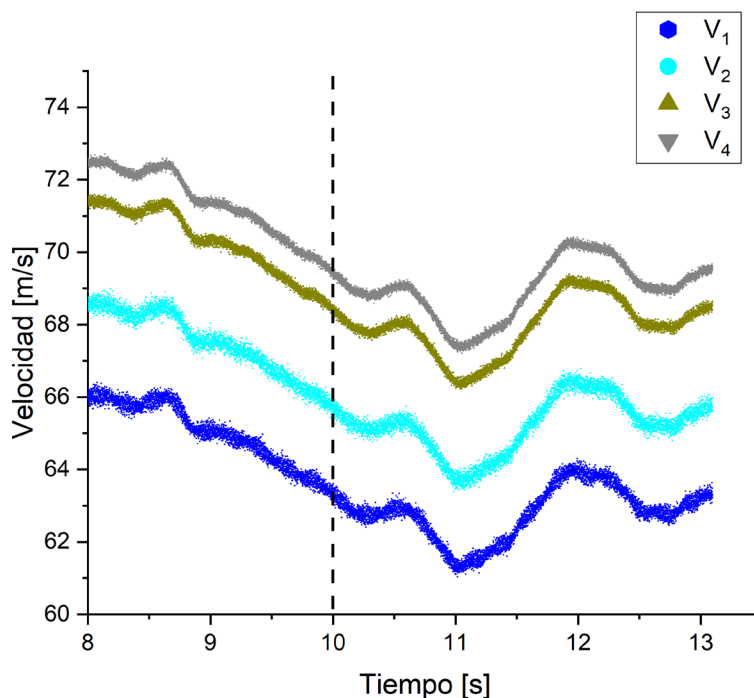
Gráfica 6.5.- Se muestran los valores promedio de velocidad y número de Mach por puerto de medición para el gas, las barras de error corresponden a las desviaciones estándar.



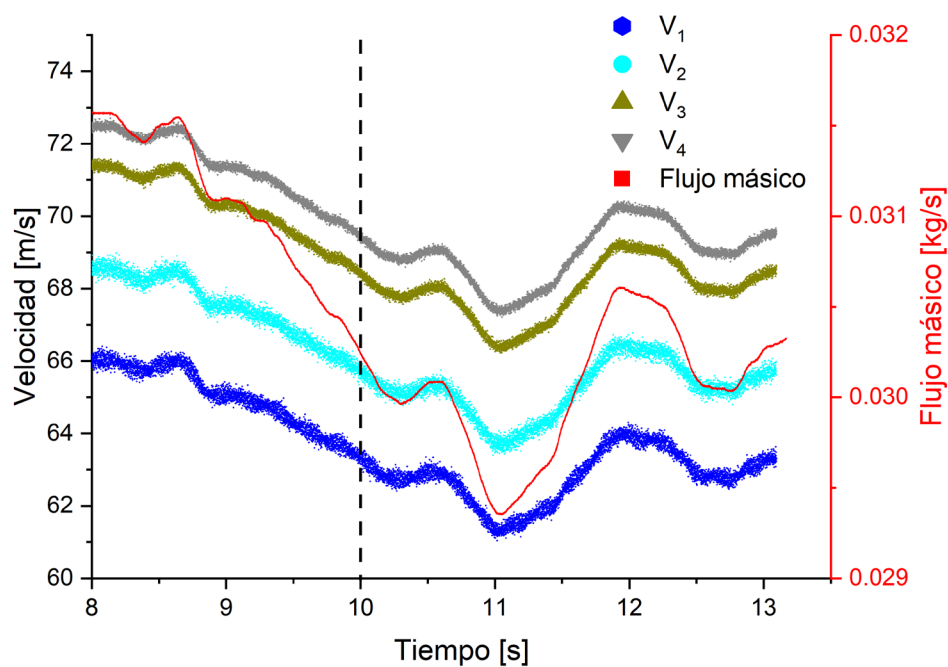
Gráfica 6.6.- Señales de presión y temperatura. El subíndice indica el puerto de medición.

En el comportamiento de la velocidad a lo largo del tiempo se observan variaciones para todos los experimentos, en la Gráfica 6.7 se muestra un ejemplo.

En todos los experimentos, se observa que la presión y la temperatura en cada puerto de medición se mantienen alrededor de un cierto valor, como se puede ver en la Gráfica 6.6 que muestra los valores de presión y temperatura para el mismo experimento que se puede observar en la Gráfica 6.7. Por lo tanto, las variaciones de velocidad que se observan son debidas principalmente a las fluctuaciones en el flujo másico (\dot{m}) ya que la única variable en la Ec. 27 que presenta variaciones en el tiempo, como se observa en la Gráfica 6.8.



Gráfica 6.7.- Velocidades para los diferentes puertos de medición. La línea segmentada indica el inicio de funcionamiento de la cámara de partículas. El subíndice indica el puerto de medición.



Gráfica 6.8.- Flujo másico y velocidades. La línea segmentada indica el inicio de funcionamiento de la cámara de partículas. El subíndice indica el puerto de medición.

También en la Gráfica 6.8 se observa que a partir de que se comienzan a inyectar partículas, se tiene un efecto de estrangulamiento del flujo de aire, ocasionando fluctuaciones mayores en el flujo másico. Este comportamiento podría explicar las caídas más pronunciadas, pero no los aumentos del flujo másico. También es posible que el cálculo de la velocidad del sonido esté subestimada debido a la presencia de la fase granular.

6.3. Resultados cualitativos del sembrado del Flujo

Se hicieron grabaciones con dos flujos máscicos promedio $\dot{m}_1 = 0.012 \text{ kg/s}$ y $\dot{m}_2 = 0.026 \text{ kg/s}$. Estos fueron hechos con una presión en el tanque de almacenamiento de $1.4 \times 10^6 \text{ Pa}$. Se grabaron videos con una duración de 2.671 s (19,231 cuadros). En la Figura 6.2 se muestran ejemplos de las imágenes obtenidas.

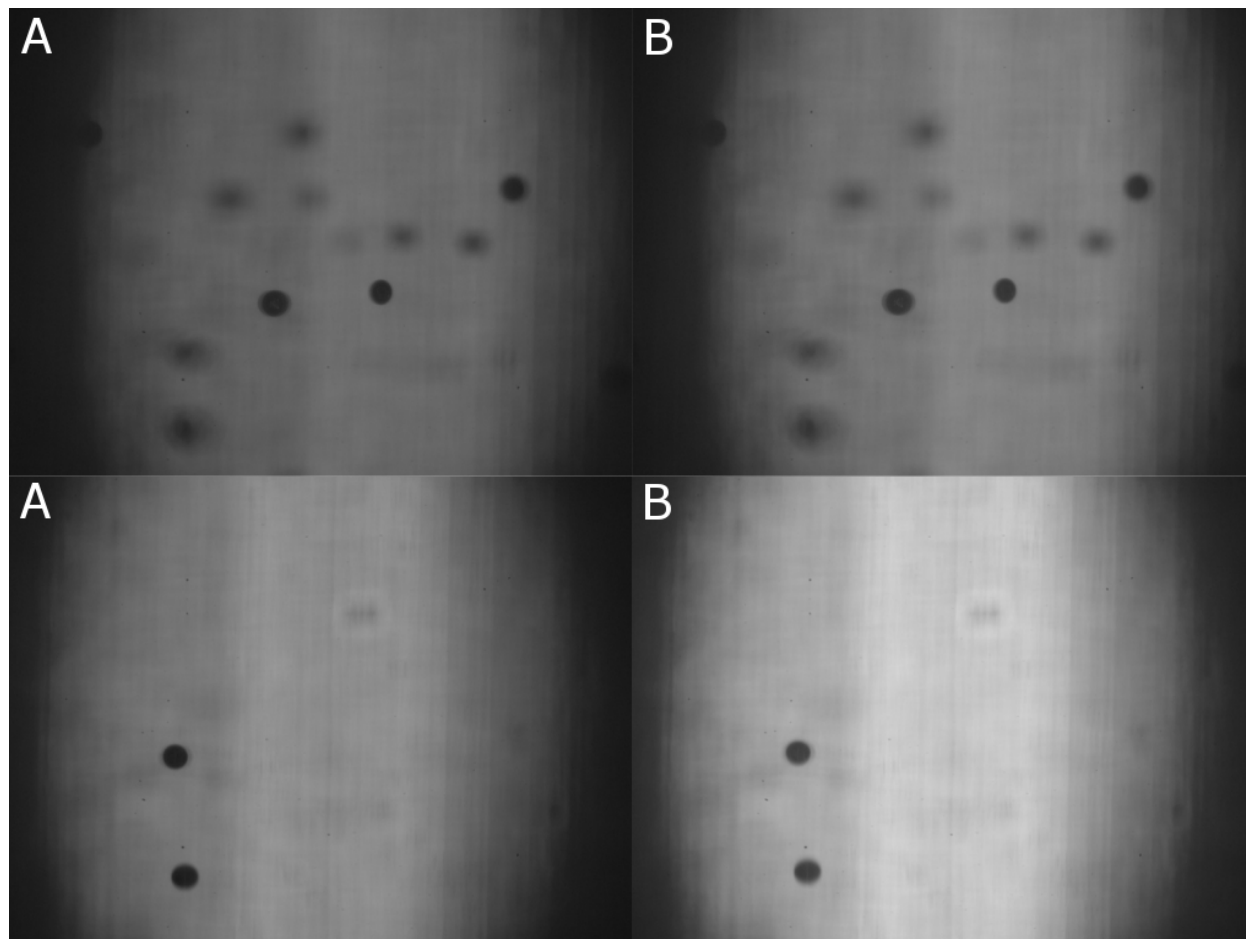


Figura 6.2.- Superior flujo correspondiente a la apertura 1. Inferior flujo correspondiente a la apertura 2. A corresponde al primer cuadro y B a al siguiente cuadro $400 \times 10^{-9} \text{ s}$ después. Se puede observar que para el flujo obtenido con la apertura 1 se tiene en general más partículas por cuadro. También se observa que en este tiempo el desplazamiento es del orden de 6 pixeles para la apertura 2 y de 2 pixeles para la apertura 1.

Para \dot{m}_2 las partículas aparecen únicamente en dos cuadros debido a su velocidad, sin embargo para \dot{m}_1 se puede observar y seguir a una partícula por al menos 4 cuadros. En los dos primeros se tiene una separación temporal de 400 ns y entre el segundo y el tercero se tienen 0.278 ms. En la Figura 6.3 se pueden observar fenómenos de interés como es rotación de las partículas,

velocidades de partícula en diferentes planos y movimiento fuera del plano de enfoque. Este resultado es importante ya que muestra posibles movimientos de las partículas dentro del tubo.

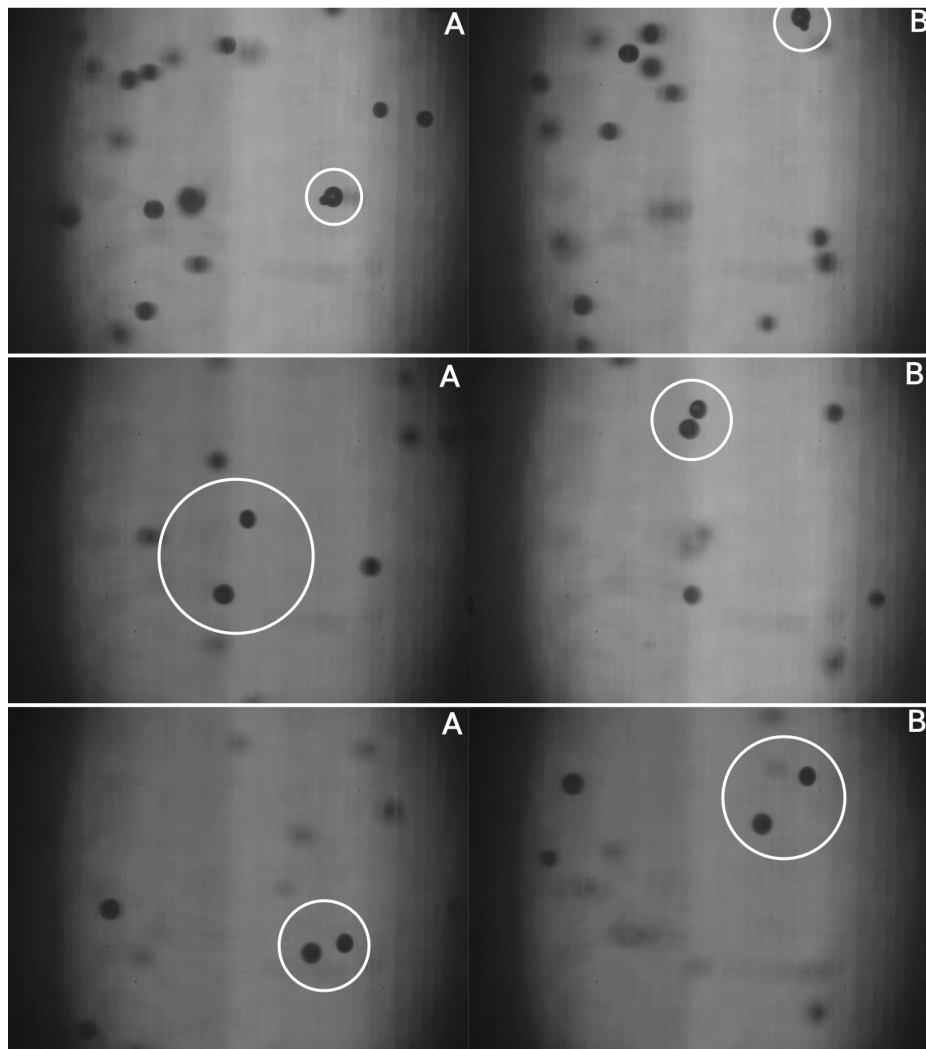


Figura 6.3.- Separación entre cuadros derechos e izquierdos 0.278 ms. Arriba, se puede ver una partícula rotando. Centro y Abajo, dos partículas con diferentes velocidades.

6.4. Resultados de PSTV

Para analizar los videos, primero se procesaron todos los cuadros con el filtro de mínima detección (Min Detection) descrito por Echeverría et al. (2020). Con esto se aseguró que la profundidad de detección fuera de $DOD = 3.55$ mm. Este proceso requirió a lo más 18 hr por video. La detección se realizó con el programa Xcitex ProAnalyst® Professional Edition V1.6.0.2 la cual tardo entre 4 hr y 24 hr por video. Los tiempos de procesamiento de imágenes son costosos computacionalmente hablando.

En la Tabla 6.1, se presentan las cantidades de partículas por video, así como las partículas correlacionadas entre dos cuadros, las no correlacionadas y las eliminadas.

Tabla 6.1.- Cuadros analizados, partículas detectadas, correlacionadas y eliminadas.

Altura	Número de videos	Cuadros analizados	Partículas detectadas	Partículas correlacionadas	Partículas eliminadas
H_1	2	38,462	11,792	7,418	4,374
H_2	3	57,693	16,694	9,785	6,909
H_3	3	57,693	30,793	8,523	22,270
H_4	2	38,462	20,759	7,670	13,089
Total	10	192,310	80,038	33,396	46,642

La cantidad de partículas que no fueron correlacionadas es casi del mismo orden de magnitud que las correlacionadas. La existencia de partículas no correlacionadas se debe a que al aplicar el filtro de mínima detección, las partículas que tienen una componente de velocidad paralela al eje óptico de la cámara (componente v_y), salen de la profundidad de detección, ver Figura 6.4. Esto ocurre tanto para partículas detectadas que viajan hacia el plano de enfoque así como partículas que se alejan de él, en ambos casos haciendo que estas se desenfocan y por lo tanto sean eliminadas. Otro motivo para que las partículas no sean detectadas es debido a las estrías del tubo, ya que al estar frente a una estría la partícula puede parecer más desenfocada ocasionando que no sea detectada.

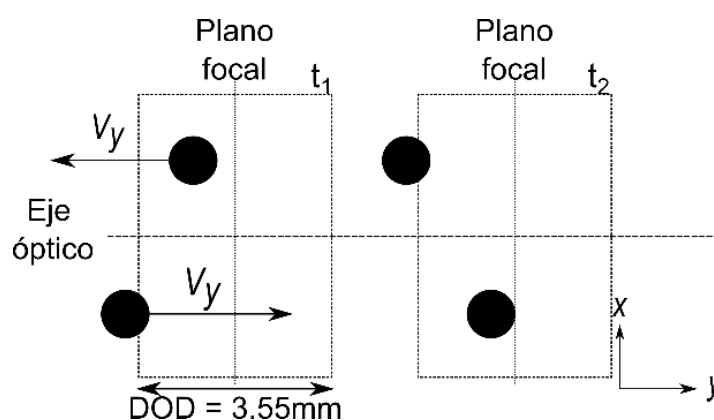
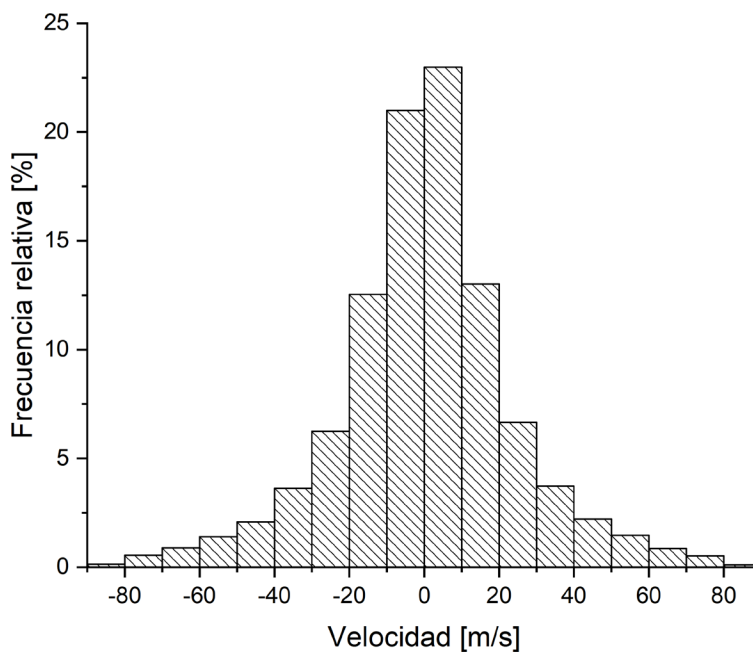


Figura 6.4.- Vista aérea de la zona de medición, ejemplo de desplazamientos de partículas fuera del DOD. Se muestran los dos casos posibles en donde la partícula puede estar desenfocada en el t_1 y enfocada en t_2 y viceversa, recordando que $t_2 - t_1 = 400$ ns.

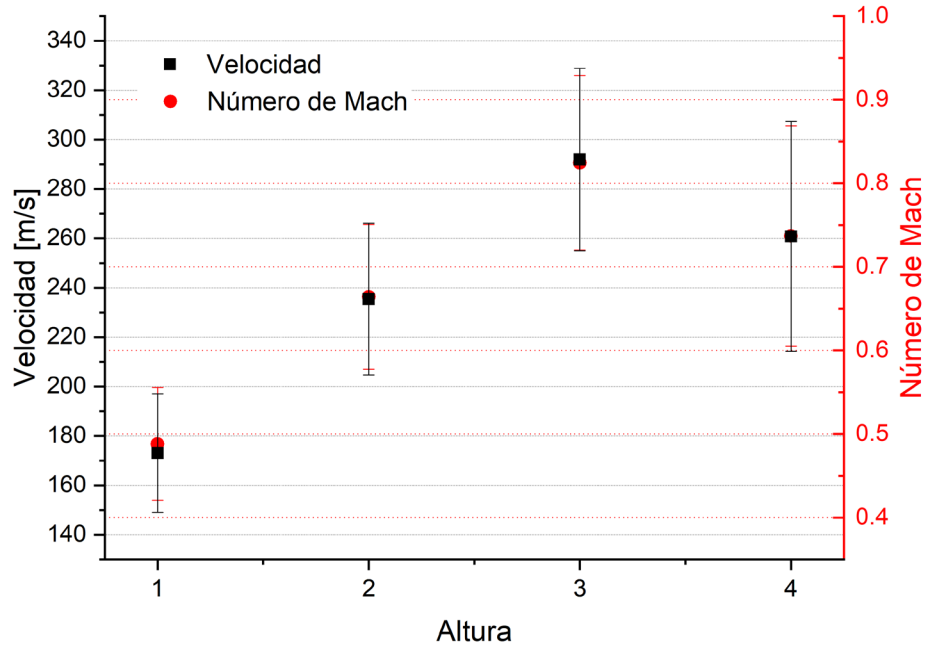
La velocidad predominante de las partículas es en la dirección vertical w (dirección z). Para todas las alturas las distribuciones de la componente u son similares entre si, todas simétricas respecto al cero. En la Gráfica 6.9 se muestra el histograma de todas las componentes de \mathbf{u} de todas las alturas.



Gráfica 6.9.- Histograma de velocidades de partícula en la dirección x .

Se puede suponer que la componente v tiene el mismo comportamiento que u .

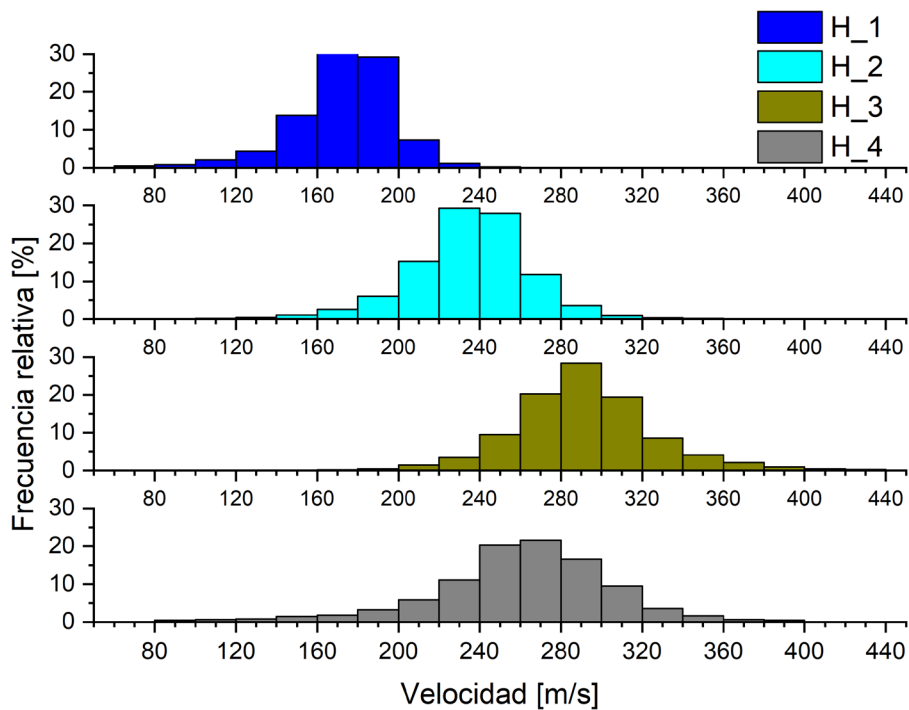
En la Gráfica 6.10 se muestran los resultados promedios de velocidad y número de Mach de cada altura y en la gráfica tal se muestran las velocidades promedio de las partículas. Al igual que para el gas la velocidad disminuye en el último puerto de medición debido a que se descarga a presión atmosférica.



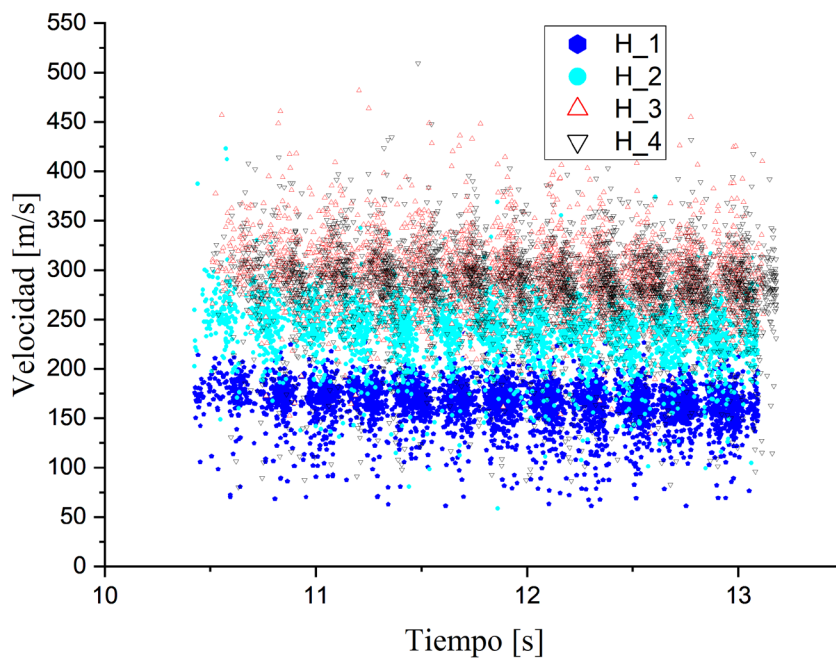
Gráfica 6.10.- Se muestran los valores promedio de velocidad y número de Mach por puerto de medición para las partículas, las barras de error corresponden a las desviaciones estándar.

Se puede ver en la distribución que la dispersión de velocidades de las partículas en cada altura es considerable (Gráfica 6.11). Esto se debe principalmente a que las partículas no son homogéneas en tamaño y no son esféricas como se mostró en las Gráficas 2.1 y 2.2.

En la Gráfica 6.12 se muestran las velocidades de partículas a lo largo del tiempo en las diferentes alturas (H_1, H_2, H3 y H_4). En la cual se pueden observar franjas que corresponden a la frecuencia de inyección de partículas que corresponde a 5 Hz o 300 RPM del tornillo sinfín. También se observa que aunque si hay un máximo de inyección cada 5 segundos, si existen partículas entre estos máximos. Para disminuir este efecto se podría incrementar la velocidad del motor utilizando un esquema de micro pasos con una rampa de aceleración para asegurar que el motor tenga suficiente fuerza para empezar y continuar con la inyección.



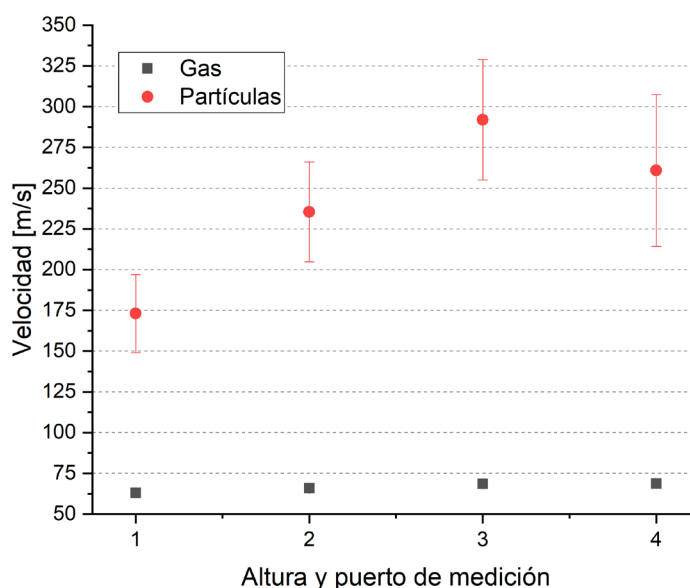
Gráfica 6.11.- Histograma de velocidades de las partículas para cada altura.



Gráfica 6.12.- Velocidades de las partículas en las diferentes alturas.

6.5. Comparación de velocidades de las partículas y el gas

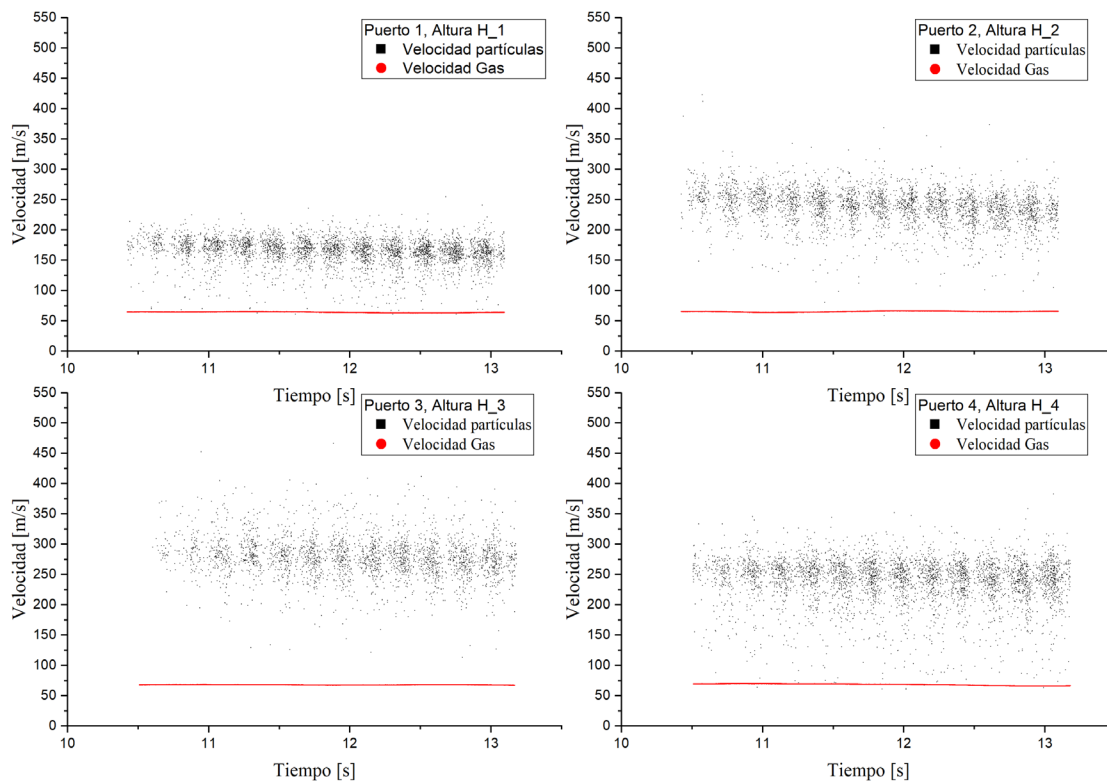
En la Gráfica 6.13 se muestran las velocidades promedio tanto de las partículas como del gas, se puede observar que la velocidad de las partículas es un orden de magnitud mayor que la del gas, lo cual parece ser un resultado físicamente incorrecto, debido principalmente a que las partículas en principio, son arrastradas por el gas. Ese razonamiento sería correcto si todo el trayecto del flujo fuera recto, sin embargo hay un codo de 90° antes del primer transductor (Figura 5.1), una explicación plausible se da en el trabajo publicado (Echeverría et al. (2020)). Más adelante se analizará el efecto del codo en el experimento.



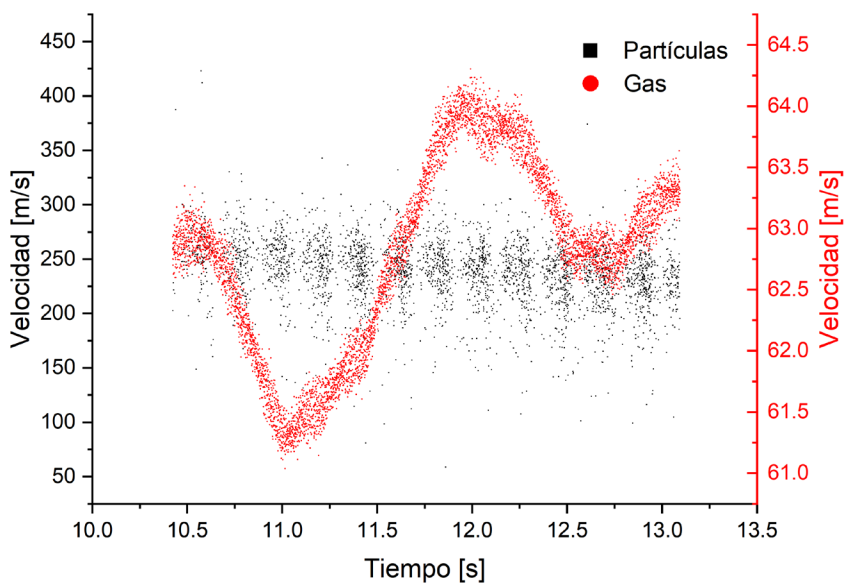
Gráfica 6.13.- Velocidades promedio de las partículas y el gas.

Al tener una sincronización entre los equipos (transductores y adquisición de la cámara) es posible graficar simultáneamente las velocidades de las partículas con las velocidades del gas, como se ve en la Gráfica 6.14. Debido a la diferencia de velocidades entre el gas y las partículas no se puede apreciar si existe alguna relación entre la presencia de partículas y la velocidad del gas. En general no se encontró una relación entre el paso de las partículas y la velocidad del gas, esto se puede ver en la Gráfica 6.15, la cual es un ejemplo de lo que se observa en todos los experimentos, como se discutió antes el flujo másico es la variable que aporta mayor cambio en la velocidad.

La forma de medir la presión y temperatura es en principio un valor promedio de la sección transversal donde están ubicados los transductores, por lo que se asume que los valores registrados no se ven afectados del todo por la presencia del granular en la vecindad de este plano.



Gráfica 6.14.- Velocidades del gas y de las partículas en el tiempo para cada altura.



Gráfica 6.15.- Ejemplo de Velocidades de partículas y del gas en H_2. No se observa la existencia de una correlación entre las dos velocidades.

Un resultado importante es que la velocidad del gas es un orden menor que las velocidades de las partículas, esto se puede deber a la presencia de un codo de 90° que sirve para llevar a la vertical al tubo de transporte.

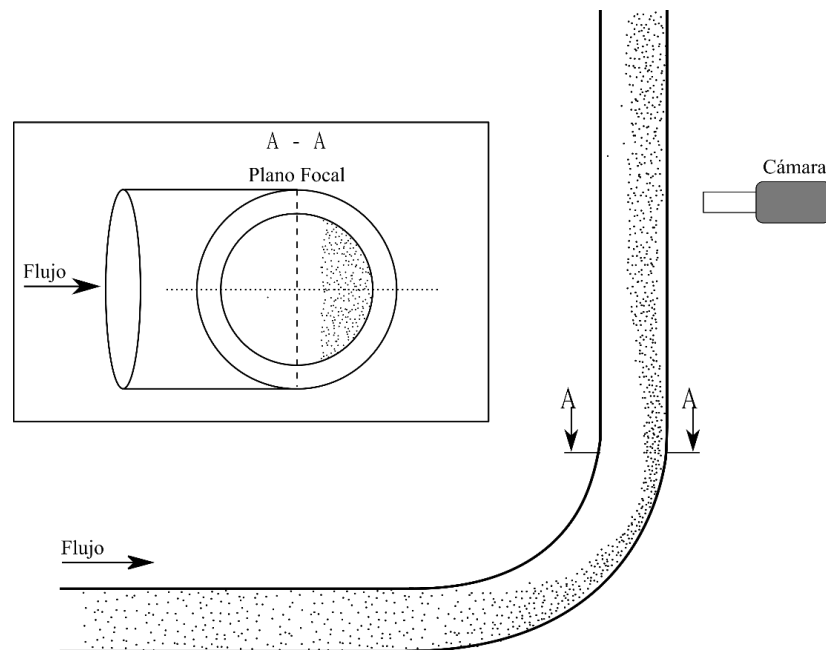


Figura 6.5.- Distribución del granular dentro de la tubería.

Los efectos que introduce el codo al flujo de acuerdo a los experimentos de Schallert y Levy (2000) son una mayor concentración de partículas en la pared más cercana a la cámara y una aceleración de las mismas debida al radio de curvatura (Figura 6.5). Aguas abajo, esta concentración se dispersa y se mezcla gradualmente sobre la sección transversal de la tubería debido a la turbulencia y a los flujos secundarios que puedan existir. Se puede justificar que el granular continúe acelerándose gracias a que su tiempo de relajación es grande ($\sim 10^{-1}$ s). Aunque este efecto podría, en principio, explicar las velocidades altas del granular después del codo, se requiere un estudio especializado para determinar la distribución espacial del medio granular en la sección transversal a lo largo de la tubería tanto antes como después del codo. En cuanto al gas, una posible explicación de su velocidad es que dentro del codo, debido a irregularidades o a que su velocidad fuera cercana a la supersónica, se podría formar una onda de choque normal u oblicua en alguna zona del codo, desacelerando la velocidad del gas pero no del granular debido a su tiempo de relajación. Esta hipótesis concuerda con el reporte técnico realizado por Higginbotham et al. (1956) donde describen que un flujo compresible al pasar por un codo ocasiona que a la salida de este se estrangule el flujo, es decir que se forme una onda de choque normal, así como caídas de presión que ocurren dentro del codo. Quedan pendientes mediciones antes y a la salida del codo para poder saber dónde se forma la onda de choque.

6.6. Interacción gas-partículas

Como se mencionó antes uno de los objetivos de este trabajo es estudiar la interacción del gas con las partículas.

Para estudiar esta interacción es necesario calcular el número de Reynolds relativo entre las partículas y el gas, con esto se puede saber qué tipo de estela hidrodinámica se produce por dicha interacción y a partir de eso poder estimar el coeficiente de arrastre, para esto se debe saber si la compresibilidad del gas afecta de manera significativa al arrastre de las partículas.

De acuerdo a Loth (2008), cuando el número de Mach relativo a la partícula es mayor que un valor crítico $M_p > 0.6$ indica que los efectos compresibles del gas afectarán significativamente el coeficiente de arrastre de la partícula y si $M_p < 0.6$ el coeficiente de arrastre es indistinguible del caso incompresible, esto implica que la partícula está libre de ondas de choque. Para evaluar si el flujo alrededor de la partícula puede tratarse como flujo continuo o no, Loth utiliza el criterio del número de Knudsen, si $Kn_p < 10^{-3}$ se puede asumir la condición de no deslizamiento convencional para los coeficientes de arrastre. Y si el número relativo de Reynolds $Re_p > 40$ a 45, el flujo puede considerarse como un flujo no enrarecido.

Se calcularon el número de Mach, Knudsen y Reynolds relativos a la partícula con las siguientes expresiones:

Número de Mach relativo a la partícula

$$M_p = \frac{|U_g - U_p|}{\sqrt{\gamma RT}} \quad \text{Ec. (25)}$$

Número de Knudsen relativo a la partícula

$$Kn_p = \sqrt{\frac{\pi\gamma}{2}} \left(\frac{M_p}{Re_p} \right) \quad \text{Ec. (26)}$$

Número de Reynolds relativo a la partícula

$$Re_p = \frac{|U_g - U_p| \bar{d}_p \rho}{\mu} \quad \text{Ec. (27)}$$

Donde, $|U_g - U_p|$ es la velocidad relativa entre las velocidades promedio del gas y de las partículas, μ es la viscosidad dinámica del aire, ρ es la densidad del aire y \bar{d}_p es el diámetro promedio de las partículas, considerando que más del 55% de las partículas tienen una circularidad cercana a uno, se puede considerar que las partículas tienen un diámetro promedio de $\bar{d}_p \sim 0.094 \text{ mm}$, por lo que se esperaría que el error al hacer esta suposición sea pequeño.

Se consideran las velocidades relativas promedio para las cuatro alturas, y el resultado para los números de Mach, Knudsen y Reynolds relativos a la partícula se puede ver en la Tabla 6.2.

Estos resultados permiten afirmar que en todos los casos existe desprendimiento de la capa límite en las partículas, lo que produce estelas hidrodinámicas en la parte trasera de las mismas. En todos los casos se puede considerar como fluido continuo, no rarificado. Únicamente para la altura 4 se deben de considerar los efectos de compresibilidad, es decir ondas de choque al frente de las partículas o formadas en imperfecciones de la superficie. Como se discutió antes el arreglo óptico coincide con un arreglo shadowgraph simple, por lo que el sistema sería capaz en principio de detectar una onda de choque, sin embargo, por las irregularidades de la pared del tubo, es posible que esta información se pierda.

Tabla 6.2.- Resultados de los números de Mach, Knudsen y Reynolds relativos a la partícula por alturas.

Altura	M_p	$Kn_p [10^{-3}]$	Re_p
1	0.31	85.4	552.45
2	0.49	88.5	820.82
3	0.64	92.2	1036.13
4	0.55	93.6	877.27

En la Figura 6.6 se muestra dónde están mapeados los números de Mach y Reynolds relativos a la partícula para este trabajo.

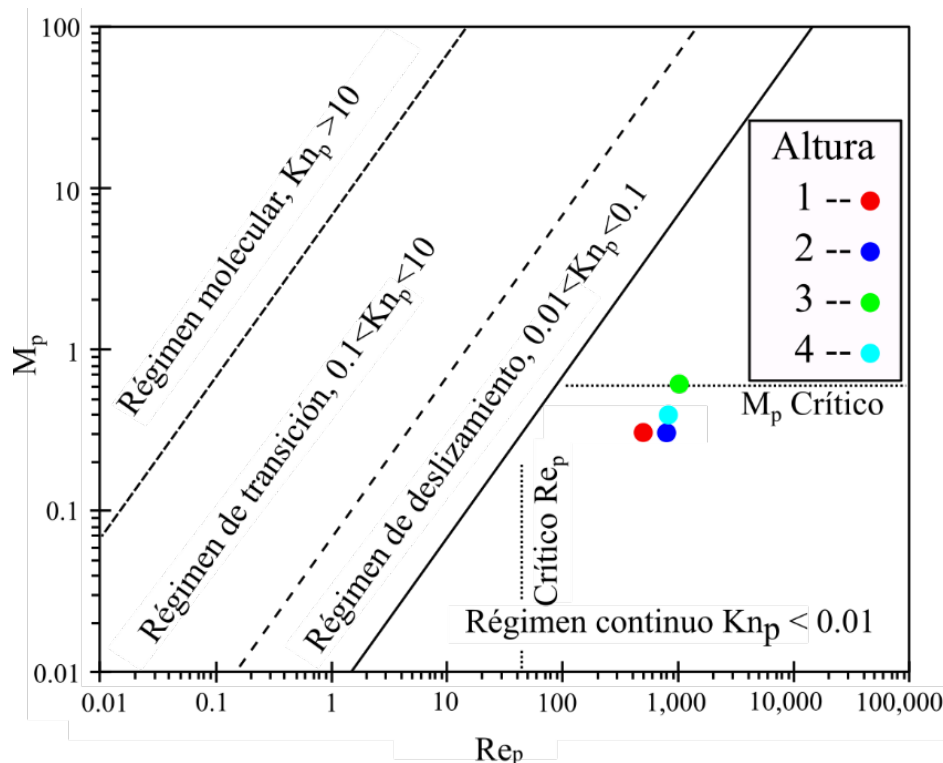


Figura 6.6.- Número de Mach contra número de Reynolds relativos a la partícula. Se muestran las regiones para los regímenes incompresibles, compresibles, condición de deslizamiento y transición. Figura modificada a partir de Michaelides et al. (2017).

Aplicando los criterios antes mencionados y considerando partículas esféricas, se utiliza la expresión propuesta por Parmar et al. (2010) que tiene es válida hasta $M_p = 1.75$, $Re_p = 2 \times 10^5$ y $Kn_p < 0.01$:

$$C_{D,\chi} = \frac{24}{Re_p} (1 + A_1 Re_p^{n1}) + A_2 \left(1 + \frac{A_3}{Re_p^{n2}} \right)^{-1} \quad \text{Ec. (28)}$$

Los coeficientes y exponentes de la Ec. (32) se pueden encontrar en la Tabla 6.3. Si $M_p < 0.6$ se obtiene la relación empírica del coeficiente de arrastre derivada por Clift y Gauvin (1970) para flujos turbulentos.

Tabla 6.3.- Coeficientes y exponentes para diferentes números de Mach y flujo no rarificado, los valores resaltados en azul son los valores que se utilizan en este trabajo.

χ	A_1	A_2	A_3	$n1$	$n2$
$M_p < 0.6$	0.15	0.42	42000	0.687	1.16
$M_p \geq 0.6$	0.15	0.513	483	0.684	0.669
$M_p = 1$	0.118	0.69	3550	0.813	0.793
$M_p = 1.75$	0.107	0.646	861	0.867	0.634

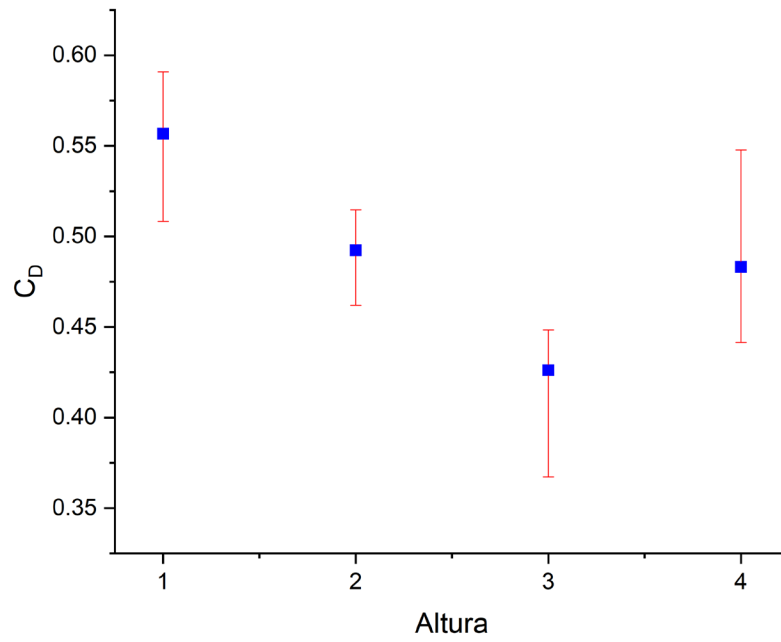
En la Tabla 6.4 se muestran los resultados para los coeficientes de arrastre para cada altura.

Tabla 6.4.- Coeficientes de arrastre por altura.

Altura	C_D
1	0.56
2	0.49
3	0.42
4	0.48

En la Gráfica 6.16 se muestra el coeficiente de arrastre por altura, los valores correspondientes a las barras de error son los valores considerando la desviación estándar de los promedios de las velocidades de las partículas.

Si bien las partículas al tener un tiempo de relajación grande continúan acelerándose a lo largo del tubo hasta H_3, no es el único efecto que contribuye a que se mantengan aceleradas, como se puede ver por los coeficientes de arrastre que muestran en las tres primeras alturas un decremento y en el último puerto un incremento que contribuye al frenado de las partículas.



Gráfica 6.16.- Coeficiente de arrastre en las diferentes alturas.

7. Conclusiones

Se diseñó y construyó un experimento de varios metros de longitud que permite el estudio de un flujo bifásico (gas-sólido), compresible y turbulento, que ahora forma parte de la infraestructura de la UNAM. El experimento tiene una repetibilidad del 91%.

A pesar de las dimensiones del experimento, la desviación en la vertical es de 2 mm, lo que permite tener seguridad y precisión en el manejo de la cámara.

Se diseñó y construyó una montura óptica para el sistema Cámara-LED, con una alineación que tiene un error estimado menor a 0.005 mm. Además esta base permite una rápida alineación perpendicular al tubo a lo largo de los cuatro puertos de medición (4.7 m).

Se diseñó y construyó un sistema de inyección de partículas novedoso para condiciones extremas que dará lugar a una publicación. Se midió el flujo másico con precisión y se implementó un sistema de control de revoluciones versátil que permite elegir entre 0 y 300 RPM.

Se diseñó y construyó un separador ciclónico para recuperar las partículas utilizadas, lo que permite por un lado reutilizarlas y por otro mantener el laboratorio libre de partículas.

Se determinó experimentalmente la distribución de tamaños de las partículas aplicando métodos de análisis de imágenes similares a los utilizados en microscopía celular. Esto permite tener una mayor resolución que al utilizar tamices y se mostró que la información de la distribución de tamaños que proporciona el fabricante es imprecisa.

Se obtuvieron mediciones de los transductores de presión, temperatura y flujo másico, con lo que se logró una caracterización del flujo base. Experimentalmente se obtuvieron valores promedio de los números de Mach en diferentes posiciones y para diferentes flujos y se comprobó que para el caso de estudio, la teoría de Fanno es válida con un error relativo para la velocidad que no supera el 3% para las primeras cuatro aperturas caracterizadas. Además, se corroboró la medición del flujo másico con un tubo de Pitot, validando las mediciones del equipo Coriolis.

También se implementó la técnica PSTV que es una alternativa a las técnicas de medición tradicionales como PIV. Se determinó la importancia del post proceso de las imágenes y sus implicaciones en la determinación de los campos de velocidad. En este caso particular PSTV es la mejor opción, debido a que se tiene una densidad de partículas baja y porque el arreglo óptico es práctico, ya que desplazar verticalmente un láser de alta potencia sería más complicado y se requeriría una instalación más robusta.

Se definió una nueva longitud óptica (profundidad de detección DOD) que permite determinar con precisión el volumen de medición, lo que dio origen a un artículo (ver Sección 4).

El volumen de medición en este estudio tiene un valor de $6.688 \times 96.336 \times 3.55 \text{ mm}^3$.

Se encontraron efectos no esperados debidos al codo que permite la conexión entre la tubería horizontal y la vertical. En particular se determinó que la velocidad de las partículas es superior a la del gas hasta en un orden de magnitud, este resultado es contraintuitivo, debido a que el gas

arrastra a las partículas al momento de ser introducidas al tubo y en su trayecto las partículas deberían tener una velocidad inferior a la del gas, sin embargo el codo hace que se forme una onda de choque que desacelera al gas y al mismo tiempo acelera a las partículas por el radio de curvatura. Las partículas no se desaceleran a la misma tasa que el gas debido a su inercia que se ve reflejada en un tiempo de relajación grande (10^{-2} s para la partícula más pequeña hasta 10^{-1} s para la partícula más grande).

Se determinaron coeficientes de arrastre promedio considerando partículas esféricas para diferentes alturas determinando que en la tercera altura existen efectos debidos a la compresibilidad que son importantes ya que forman ondas de choque en las partículas.

Si bien en promedio la teoría de Fanno se ajusta a los experimentos, aún falta conocer los detalles dentro de la tubería, como la distribución de presiones, temperatura y por lo tanto de velocidades en la sección transversal y simultáneamente realizar el PSTV en diferentes planos en el interior del tubo.

Los flujos turbulentos y compresibles siguen ofreciendo retos que ponen a prueba los mejores equipos de medición y aún quedan muchas preguntas por resolver.

Por otro lado en el tema de los flujos multifásicos gas-partículas, aún se debaten muchos fenómenos observados experimentalmente como lo son el efecto de la cantidad del granular en el flujo de transporte y el tamaño del granular en el nivel de turbulencia, la interacción entre choques de partículas y estelas hidrodinámicas, y desde luego las ondas de choque en la superficie de las partículas y su interacción con las estelas y partículas.

Es importante notar que este estudio originalmente fue planteado con el uso de la técnica PSV, sin embargo se realizaron diferentes pruebas con esta técnica, así como PIV y mediciones manuales, pero debido al tamaño y cantidad de partículas se tuvo que modificar la técnica de medición e implementar el PSTV. El procesamiento de datos y la determinación del volumen de medición son muy diferentes en ambas técnicas, lo que requirió la combinación de filtros digitales y la definición de la profundidad de detección (DOD).

Este estudio produjo datos experimentales considerando partículas polidispersas en un régimen compresible que pueden ser utilizados para generar modelos o validar estudios computacionales.

8. Trabajo a futuro

Realizar mediciones con transductores como con la técnica PSTV antes del codo y después de este, para poder saber si se forma una onda de choque y de ser posible saber dónde, ya que existe la posibilidad de que esta sea normal, oblicua o ambas, principalmente porque la superficie dentro del codo así como sus uniones no son perfectamente lisas.

Estudiar el efecto de las ondas de choque en la interacción entre las partículas y utilizar relaciones para calcular el coeficiente de arrastre para diferentes geometrías a la de la esfera.

Utilizar flujos máxicos menores para estudiar interacciones entre el gas y las partículas donde la velocidad del gas sea mayor que la de las partículas y de ser posible conseguir los mismos números de Mach, Knudsen y Reynolds relativos a la partícula.

Para poder saber más de la distribución de presiones se pueden fabricar puertos de medición que incluyan más transductores, o en su defecto utilizar un juego de tubos de Pitot y caracterizar una sección transversal sin partículas y luego utilizar esos valores de manera promedio para compararlos con PSTV.

Una mejora importante a la técnica PSTV sería poder utilizar la información de las partículas desenfocadas para obtener velocidades en más planos dentro del tubo y así de una sola vez obtener la dinámica del granular en un volumen mayor dentro de la tubería. Se podrían utilizar redes neuronales para filtrar partículas con diferentes grados de desenfoque y estos relacionarlos con la escala correcta dada su posición con respecto al plano de enfoque y así obtener más vectores de desplazamiento y por lo tanto de velocidad.

9. Referencias

- Abràmoff, M. D., Magalhães, P. J., & Ram, S. J. (2004). Image processing with imageJ. *Biophotonics International*, 11(7), 36–41. <https://doi.org/10.1201/9781420005615.ax4>
- Anwar, M. (2008). Setup of Particle Image Velocimetry (PIV) in Hypersonic Flows [Blekinge Institute of Technology]. In *Sea-Mist.Se*. [http://www.sea-mist.se/fou/cuppsats.nsf/all/b33be33b36679712c125750100480493/\\$file/BTH_AMT_EX_2_008D10_SE.pdf](http://www.sea-mist.se/fou/cuppsats.nsf/all/b33be33b36679712c125750100480493/$file/BTH_AMT_EX_2_008D10_SE.pdf)
- Barati Dalenjan, M., Jamshidi, E., & Ale Ebrahim, H. (2012). The best screw shape for fine zinc oxide particles feeding. *Advanced Powder Technology*, 23(3), 372–379. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2011.05.001>
- Barati Dalenjan, M., Jamshidi, E., & Ale Ebrahim, H. (2015). A screw-brush feeding system for uniform fine zinc oxide powder feeding and obtaining a homogeneous gas-particle flow. *Advanced Powder Technology*, 26(1), 303–308. <https://doi.org/10.1016/j.appt.2014.10.010>
- Barsky, E. (2015). Entropic Invariants of Two-Phase Flows. In *Entropic Invariants of Two-Phase Flows*. Elsevier. <https://doi.org/10.1016/C2013-0-23121-4>
- Bates, L. (2000). *Guide to the Design, Selection and application of screw feeders* (1st ed.). Wiley.
- Bhusarapu, S., Al-Dahhan, M. H., & Duduković, M. P. (2006). Solids flow mapping in a gas-solid riser: Mean holdup and velocity fields. *Powder Technology*, 163(1–2), 98–123. <https://doi.org/10.1016/j.powtec.2006.01.013>
- Bourdon, C. J., Olsen, M. G., & Gorby, A. D. (2004). Validation of an analytical solution for depth of correlation in microscopic particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 15(2), 318–327. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/15/2/002>
- Clift, R., & Gauvin, W. (1970). The motion of particles in turbulent gas streams. *Chemeca* 1, 14–28.
- Colebrook, C. F., Blench, T., Chatley, H., Essex, E. H., Finnicome, J. R., Lacey, G., Williamson, J., & Macdonald, G. G. (1939). Correspondence. Turbulent Flow in Pipes, With Particular Reference To the Transition Region Between the Smooth and Rough Pipe Laws. (Includes Plates). *Journal of the Institution of Civil Engineers*, 12(8), 393–422. <https://doi.org/10.1680/ijoti.1939.14509>
- Colebrook, C. F., & White, C. M. (1937). Experiments with fluid friction in roughened pipes. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A - Mathematical and Physical Sciences*, 161(906), 367–381. <https://doi.org/10.1098/rspa.1937.0150>
- Crowe, C. T., Schwarzkopf, J. D., Sommerfeld, M., & Tsuji, Y. (2011). *Multiphase Flows with Droplets and Particles* (Vol. 21, Issue 11). CRC Press. <https://doi.org/10.1201/b111103>
- Echeverría, C. A. (2015). *Implementación de la técnica Velocimetría por Sombras de Partículas (PSV) para el estudio de las interfaces de un flujo supersónico*. [Universidad Nacional Autónoma de México]. <http://132.248.9.195/ptd2015/septiembre/0735148/Index.html>
- Echeverría, C., Porta, D., Stern, C., & Guzmán, J. E. V. (2020a). A method to determine the measurement volume for particle shadow tracking velocimetry (PSTV). *Journal of*

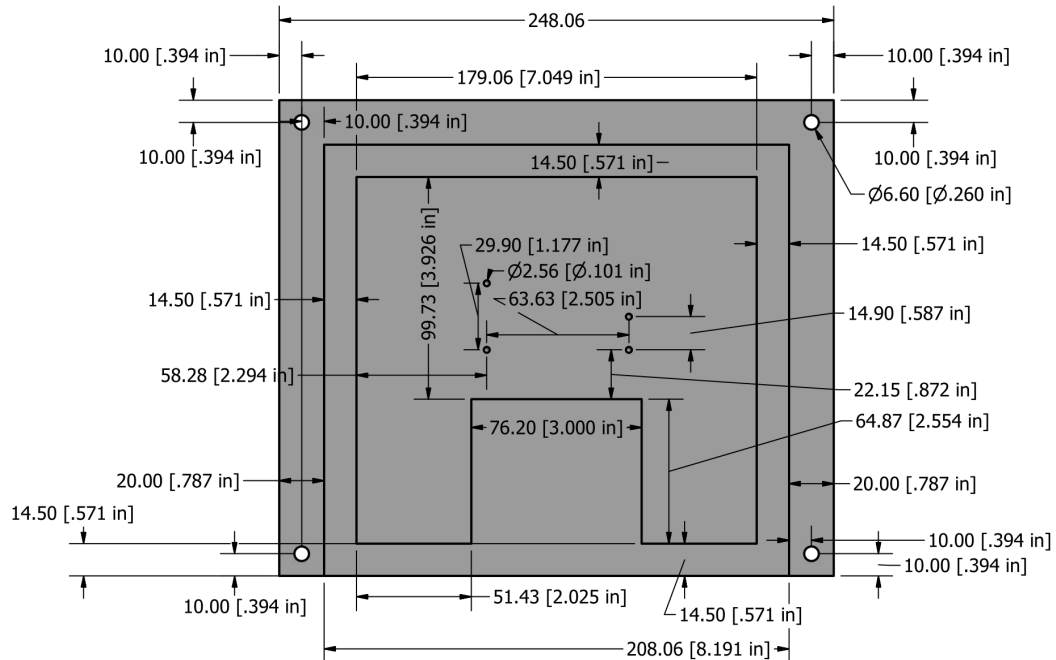
- Visualization*, 23(4), 577–590. <https://doi.org/10.1007/s12650-020-00657-8>
- Echeverría, C., Porta, D., Stern, C., & Guzmán, J. E. V. (2020b). A method to determine the measurement volume for particle shadow tracking velocimetry (PSTV). *Journal of Visualization*, 23(4), 577–590. <https://doi.org/10.1007/s12650-020-00657-8>
- Estevadeordal, J., & Goss, L. (2005). PIV with LED: Particle Shadow Velocimetry (PSV) Technique. *43rd AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit, January*, 1–10. <https://doi.org/10.2514/6.2005-37>
- Fernandez, J. W., Cleary, P. W., & McBride, W. (2011). Effect of screw design on hopper drawdown of spherical particles in a horizontal screw feeder. *Chemical Engineering Science*, 66(22), 5585–5601. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2011.07.043>
- Higginbotham, J. T., Wood, C. C., & Valentine, E. F. (1956). *A study of the high-speed performance characteristics of 90 degree bends in circular ducts* (Issue June). United States. <https://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19930084445>
- Hileman, J., & Samimy, M. (2001). Turbulence structures and the acoustic far field of a Mach 1.3 jet. *AIAA Journal*, 39(9). <https://doi.org/10.2514/2.1529>
- Hoffmann, A. C., & Stein, L. E. (2007). Gas Cyclones and Swirl Tubes. In *Aerosol Science and Technology* (Vol. 15, Issue 2). Springer Berlin Heidelberg. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-74696-6>
- Loth, E. (2008). Compressibility and Rarefaction Effects on Drag of a Spherical Particle. *AIAA Journal*, 46(9), 2219–2228. <https://doi.org/10.2514/1.28943>
- Lowe, M. L., & Kutt, P. H. (1992). Refraction through cylindrical tubes. *Experiments in Fluids*, 13(5), 315–320. <https://doi.org/10.1007/BF00209503>
- Meinhart, C. D., Wereley, S., & Gray, M. (2000). Volume illumination for two-dimensional particle image velocimetry. *Measurement Science and Technology*, 11(6), 809–814. <https://doi.org/10.1088/0957-0233/11/6/326>
- Melling, A. (1997). Tracer particles and seeding for particle image velocimetry. *Meas. Sci. Technol.*, 8, 1406–1416. <http://iopscience.iop.org/article/10.1088/0957-0233/8/12/005/pdf>
- Michaelides, E., Crowe, C. T., & Schwarzkopf, J. D. (2017). *Multiphase Flow Handbook, Second Edition* (C. J. D. S. Efstathios E., Michaelides Clayton T. (ed.); Second). CRC Press Taylor & Francis Group. <https://www.crcpress.com/Multiphase-Flow-Handbook/Michaelides-Crowe-Schwarzkopf/p/book/9781498701006>
- Naren, P. R., & Ranade, V. V. (2011). Scaling laws for gas-solid riser flow through two-fluid model simulation. *Particuology*, 9(2), 121–129. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2010.09.010>
- Olsen, M. G., & Adrian, R. J. (2000). Out-of-focus effects on particle image visibility and correlation in microscopic particle image velocimetry. *Experiments in Fluids*, 29 Suppl., 166–174.
- Parmar, M., Haselbacher, A., & Balachandar, S. (2010). Improved Drag Correlation for Spheres and Application to Shock-Tube Experiments. *AIAA Journal*, 48(6), 1273–1276. <https://doi.org/10.2514/1.j050161>
- Porta, D. (2013). *Estudio de interfaces en un flujo supersónico mediante shadowgra (gráfia de sombras s)*. UNAM.
- Raffel, M., Willert, C. E., Wereley, S. T., & Kompenhans, J. (2007). Particle Image Velocimetry.

-
- In *Current Science* (Vol. 79, Issue 1). <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72308-0>
- Rogers, R. (2015). Producing Methane from Offshore Hydrates. In *Offshore Gas Hydrates* (pp. 101-133.e1). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/b978-0-12-802319-8.00004-8>
- Saad, M. A. (1985). *Compressible Fluid Flow*. Prentice Hall.
- Scarano, F. (2008). Overview of PIV in supersonic flows. *Topics in Applied Physics*, 112, 445–463. https://doi.org/10.1007/978-3-540-73528-1_24
- Schallert, R., & Levy, E. (2000). Effect of a combination of two elbows on particle roping in pneumatic conveying. *Powder Technology*, 107(3), 226–233. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00189-8](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00189-8)
- Shapiro, A. (1953). *The Dynamics and Thermodynamics of Compressible Fluid Flow Volume I*. The Ronald press company.
- Sloan, D., Koh, C., & K.Sum, A. (2011). *Natural Gas Hydrates In Flow Assurance* (Vol. 52, Issue 55). https://www.mendeley.com/catalogue/a4242962-80d4-39aa-bd4b-4035c1797f0e/?utm_source=desktop
- Vreman, A. W. (2007). Turbulence characteristics of particle-laden pipe flow. *Journal of Fluid Mechanics*, 584, 235–279. <https://doi.org/10.1017/S0022112007006556>
- White, F. (2006). *Viscous Fluid Flow* (3ed ed.). McGraw-Hill.

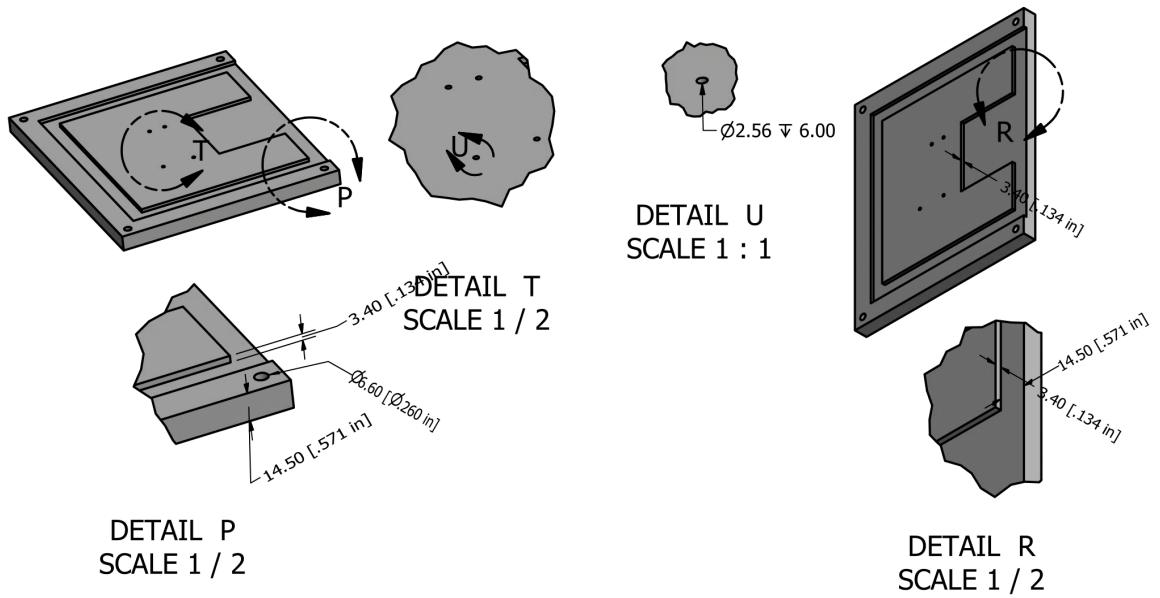
10. Apéndices

10.1. Apéndice 1

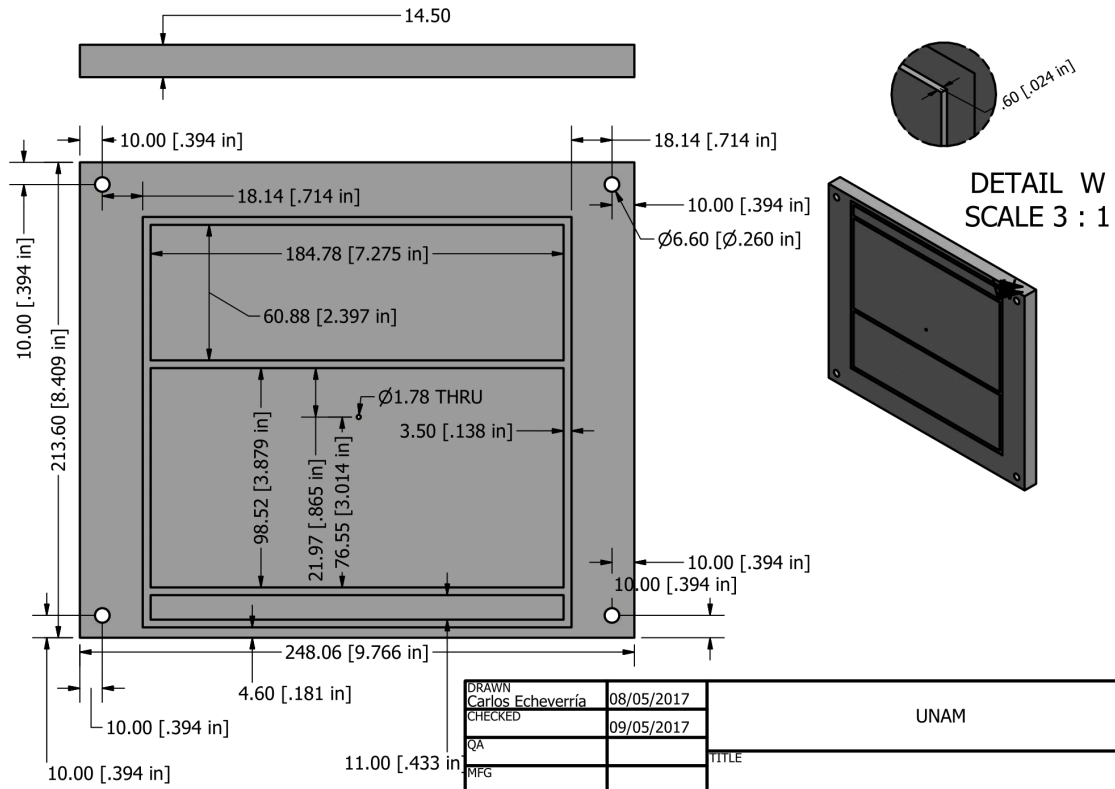
Planos de la cámara de partículas.



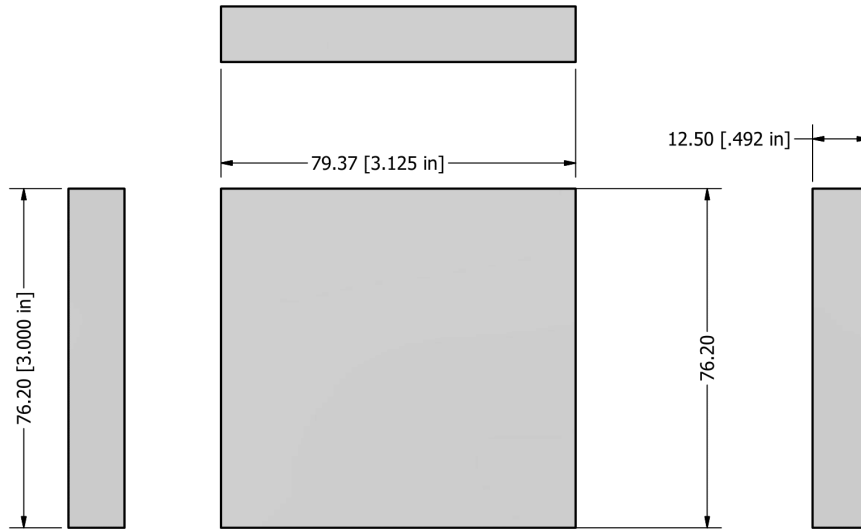
DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED		09/05/2017			
QA			TITLE		
MFG			Sembrador Base		
APPROVED					
			SIZE	DWG NO	REV
			A		
Medidas en			SCALE	1 / 2	SHEET 1 OF 23
milímetros [mm]					



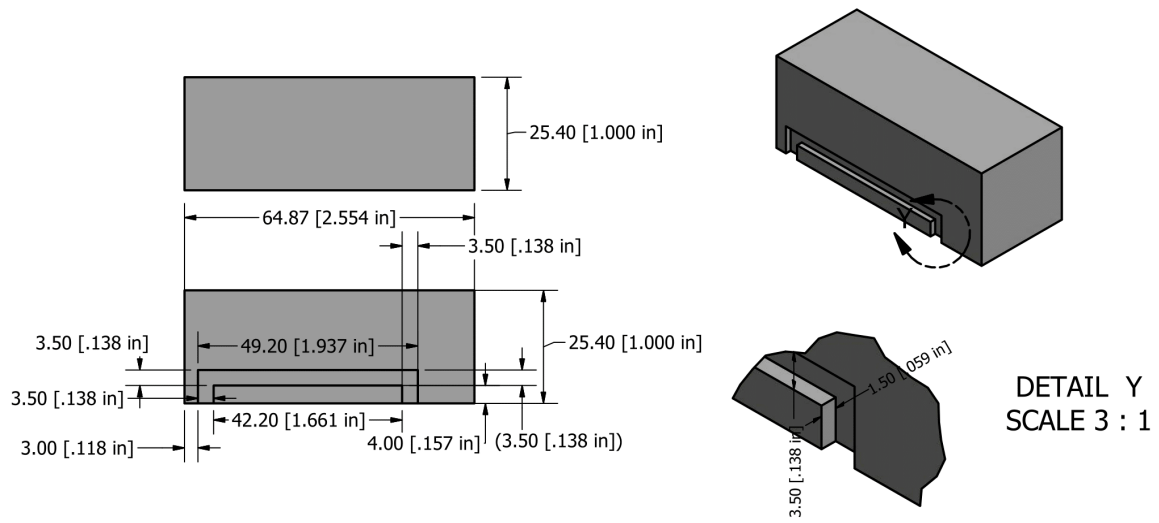
DRAWN Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED	09/05/2017			
QA		TITLE		
MFG		Sembrador Base detalles		
APPROVED		SIZE	DWG NO	REV
		A		
		SCALE	1 / 4	SHEET 2 OF 23



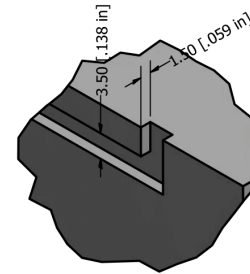
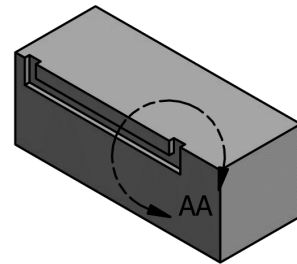
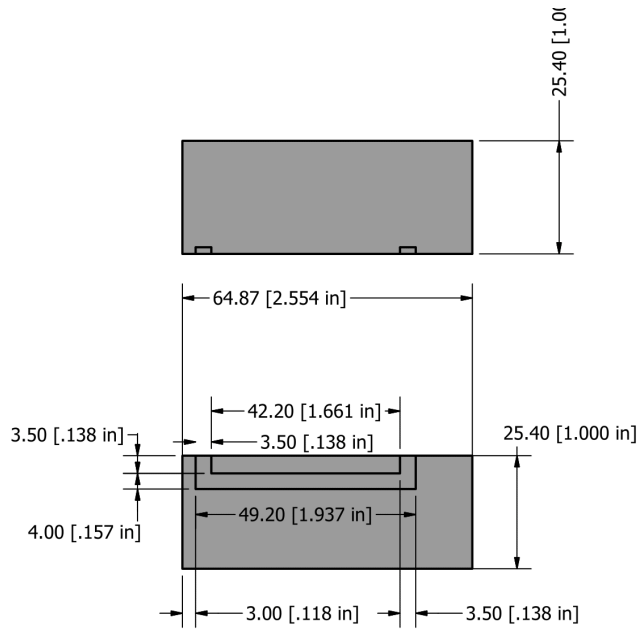
DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED		09/05/2017			
QA			TITLE		
MFG			Sembrador Tapa		
APPROVED			SIZE	DWG NO	REV
			A		
Medidas en			SCALE	1 / 2	SHEET 3 OF 23
milímetros [mm]					



DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED		09/05/2017	TITLE		
QA			Sembrador Base_Camisa		
MFG			SIZE	DWG NO	REV
APPROVED			A		
Medidas en			SCALE	1 : 1	SHEET 4 OF 23
milímetros [mm]					

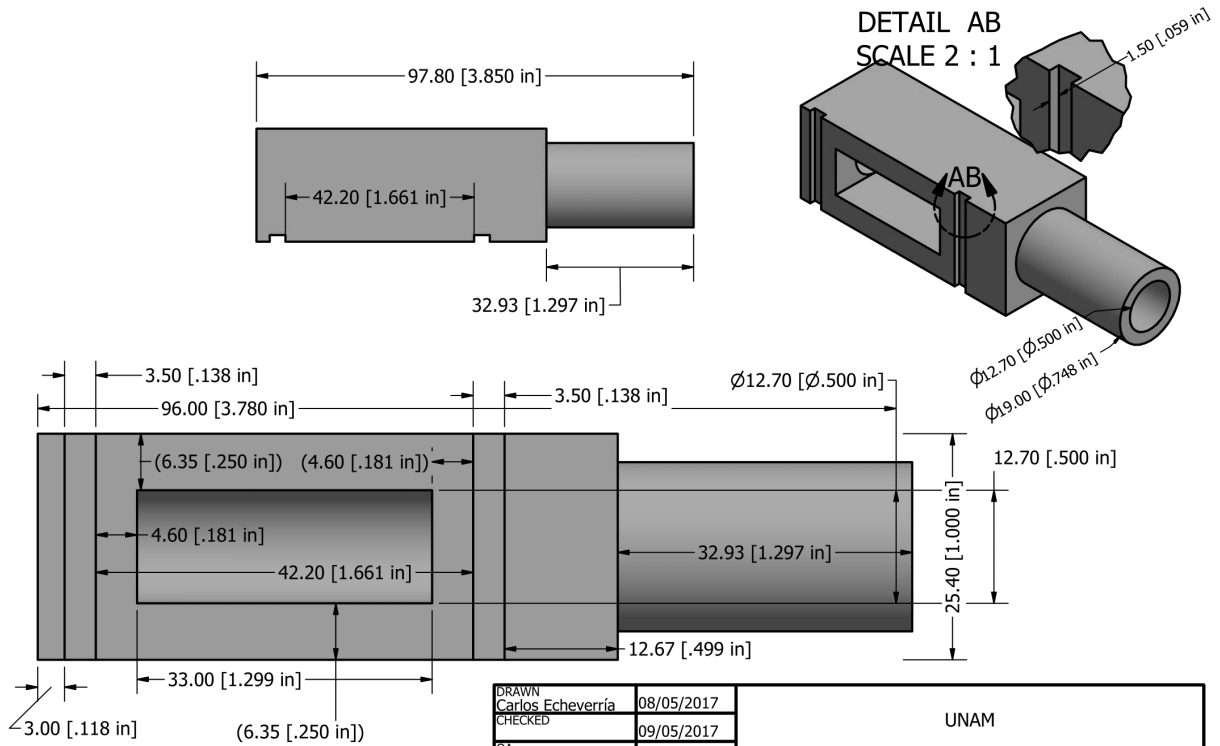


DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED		09/05/2017			
QA			TITLE		
MFG			Sembrador Base Tolva Derecha		
APPROVED					
			SIZE	DWG NO	REV
Medidas en			A		
milímetros [mm]			SCALE	1 : 1	SHEET 5 OF 23

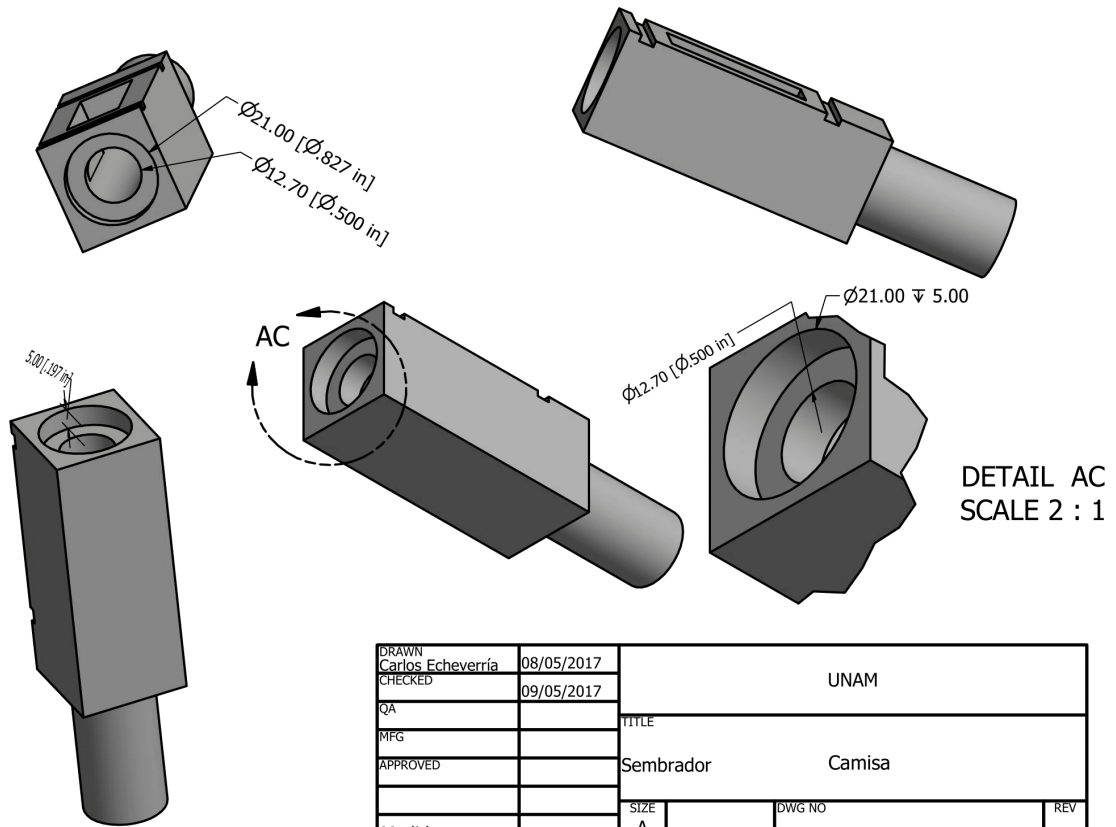


DETAIL AA
SCALE 2 : 1

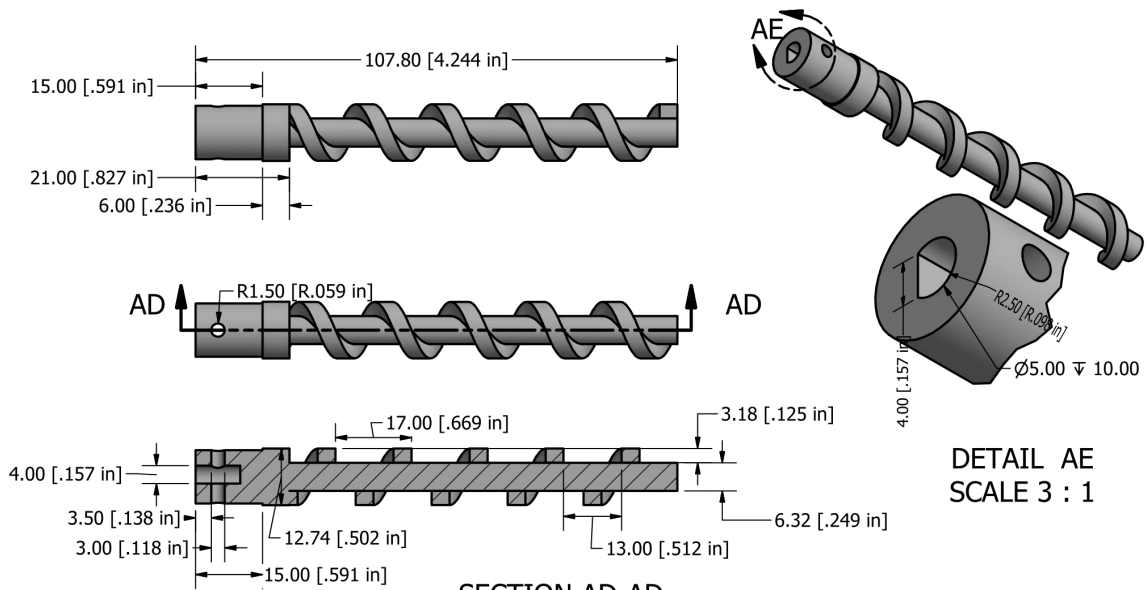
DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED		09/05/2017			
QA			TITLE		
MFG			Sembrador Base Tolva Izquierda		
APPROVED					
			SIZE	DWG NO	REV
			A		
Medidas en			SCALE	1 : 1	SHEET 6 OF 23
milímetros [mm]					



DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM	
CHECKED		09/05/2017	TITLE	
QA			Sembrador Camisa	
MFG			SIZE A	
APPROVED			DWG NO	
			REV	
Medidas en			SCALE 2 : 1	
milímetros [mm]			SHEET 7 OF 23	

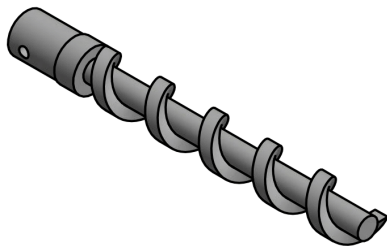


DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED		09/05/2017	TITLE		
QA			Sembrador Camisa		
MFG			SIZE	DWG NO	REV
APPROVED			A		
Medidas en			SCALE	1 : 1	SHEET 8 OF 23
milímetros [mm]					

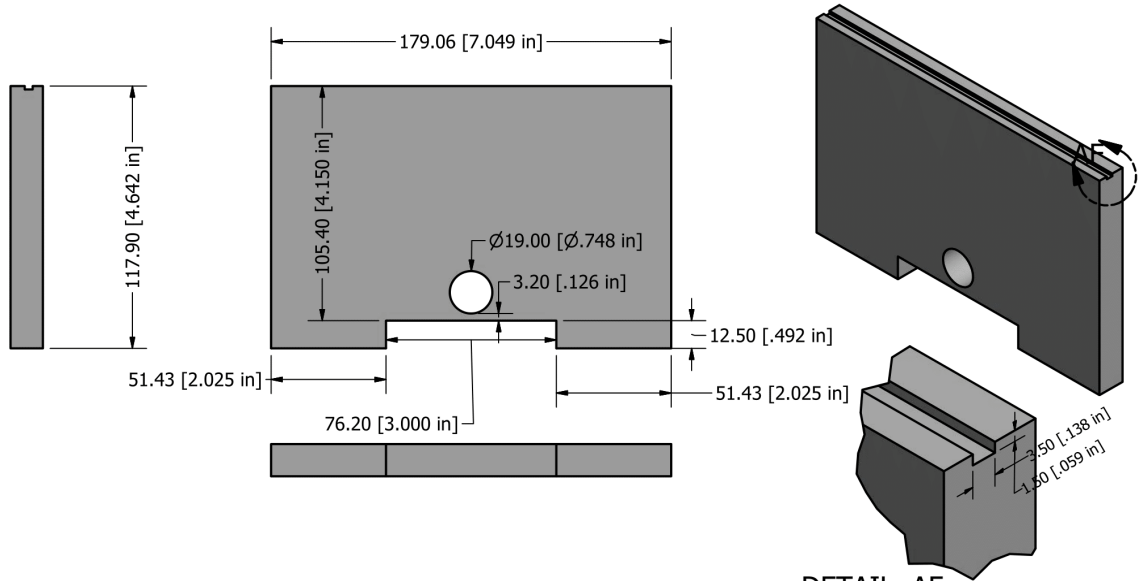


DETAIL AE
SCALE 3 : 1

SECTION AD-AD
SCALE 1 : 1

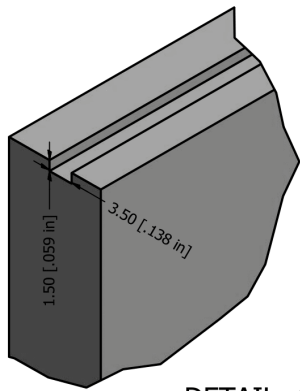
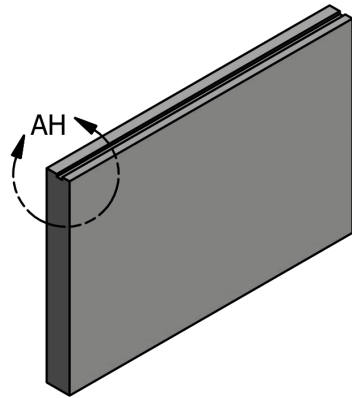


DRAWN Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM	
CHECKED	09/05/2017	TITLE	
QA		Sembrador Tornillo	
MFG		SIZE	REV
APPROVED		A	
Medidas en		DWG NO	
milímetros [mm]		SCALE	SHEET 9 OF 23
		1 : 1	

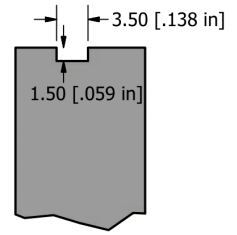
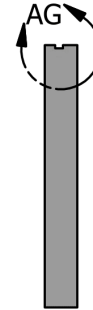
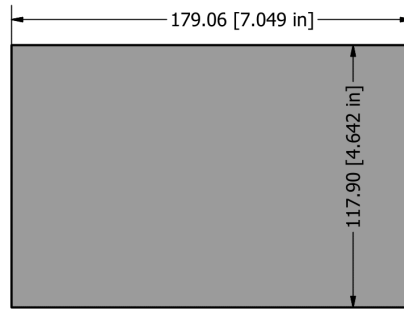
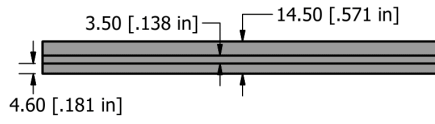


DETAIL AF
SCALE 2 : 1

DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED		09/05/2017			
QA			TITLE		
MFG			Sembrador Pared Frontal		
APPROVED					
			SIZE	DWG NO	REV
Medidas en			A		
milímetros [mm]			SCALE	1 / 2	SHEET 10 OF 23

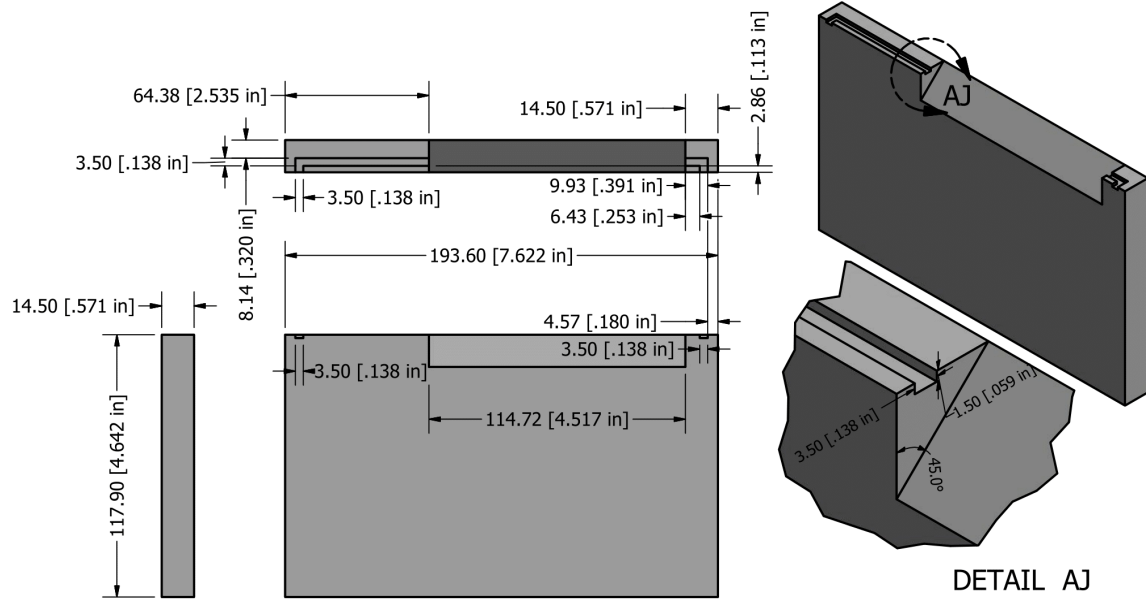


DETAIL AH
SCALE 2 : 1



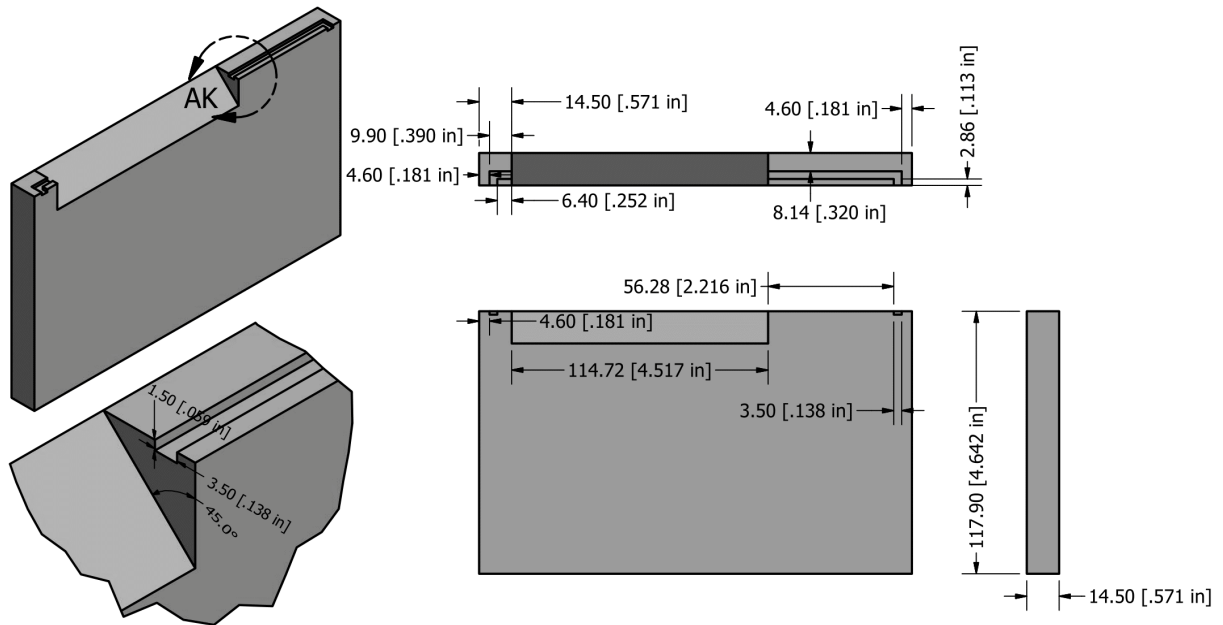
DETAIL AG
SCALE 2 : 1

DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED		09/05/2017			
QA			TITLE		
MFG			Sembrador Pared Posterior		
APPROVED			SIZE	DWG NO	REV
			A		
Medidas en			SCALE	1 / 2	SHEET 11 OF 23
milímetros [mm]					



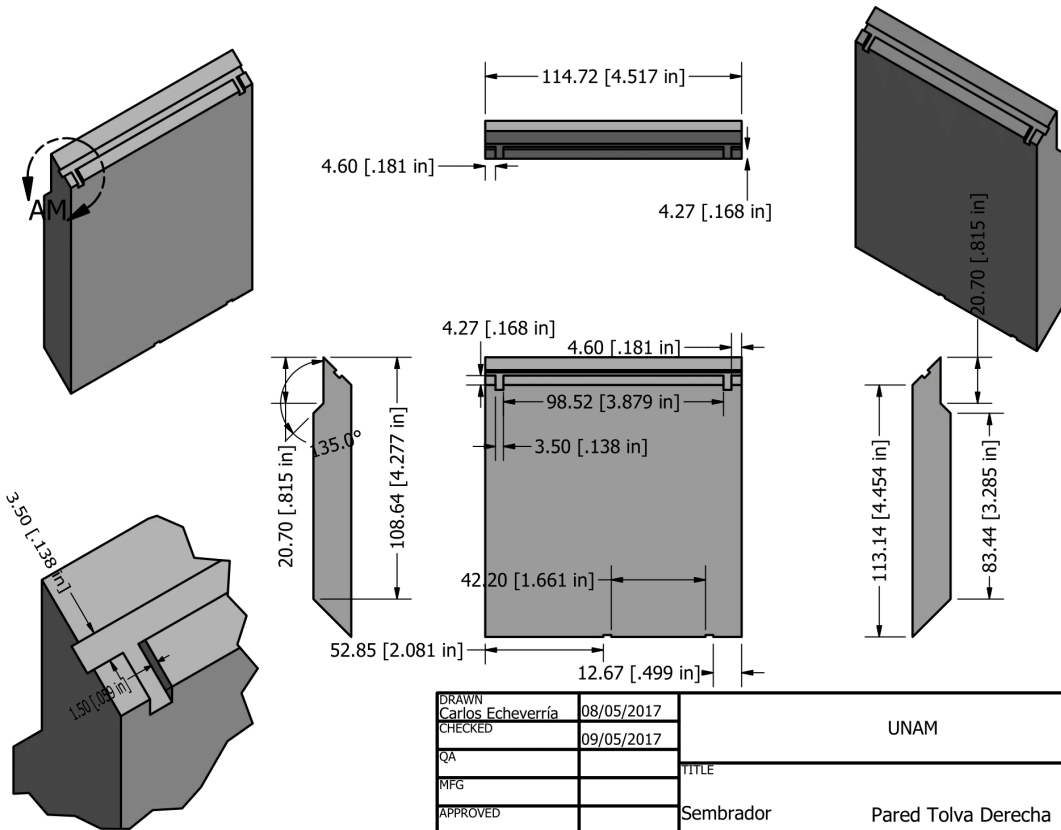
DETAIL AJ
SCALE 2 : 1

DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED		09/05/2017	UNAM		
QA			TITLE		
MFG			Sembrador Pared Derecha		
APPROVED			Sembrador Pared Derecha		
			SIZE	DWG NO	REV
Medidas en			A		
milímetros [mm]			SCALE	1 / 2	SHEET 12 OF 23



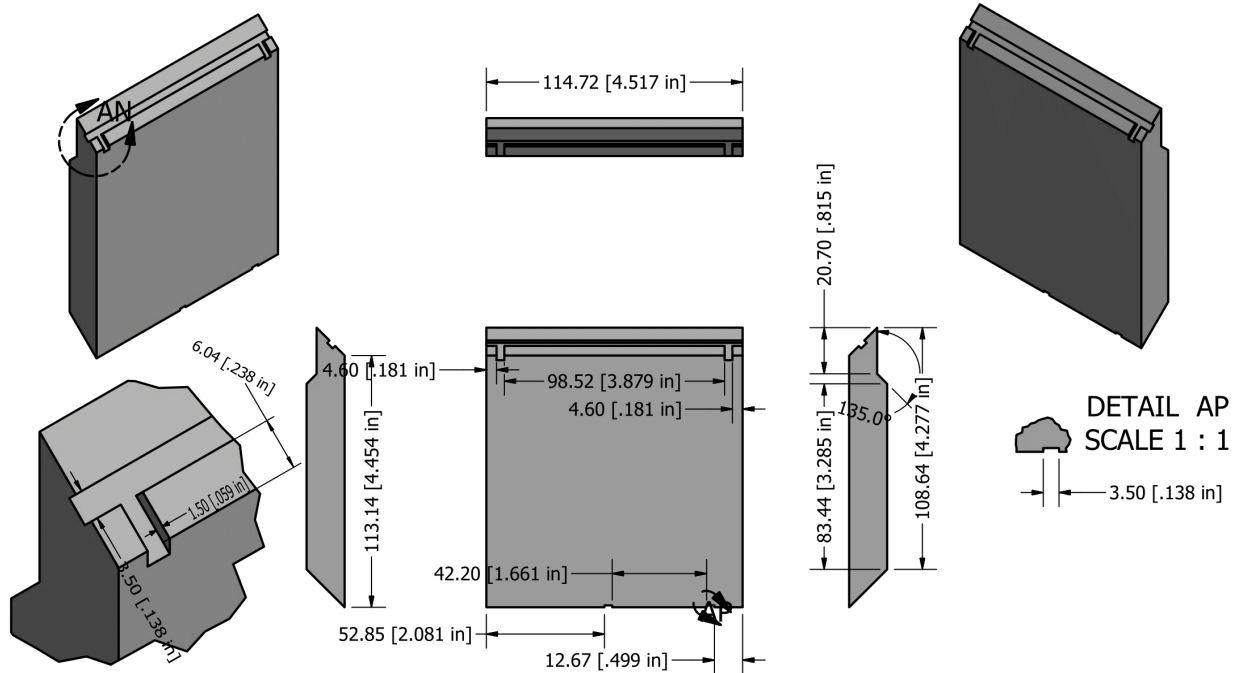
DETAIL AK
SCALE 2 : 1

DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED		09/05/2017			
QA			TITLE		
MFG			Sembrador Pared Izquierda		
APPROVED			SIZE	DWG NO	REV
			A		
Medidas en			SCALE	1 / 2	SHEET 13 OF 23
milímetros [mm]					



DETAIL AM
SCALE 2 : 1

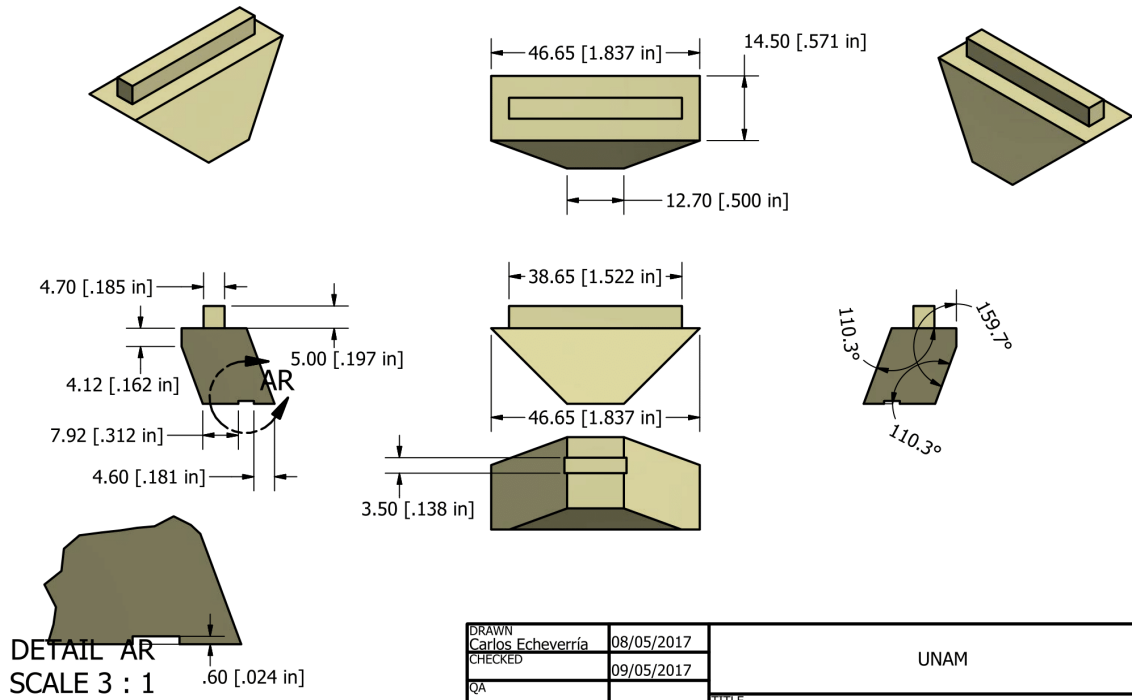
DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM	
CHECKED		09/05/2017		
QA			TITLE	
MFG			Sembrador Pared Tolva Derecha	
APPROVED				
			SIZE	DWG NO
Medidas en			A	
milímetros [mm]			SCALE	1 / 2
				SHEET 14 OF 23



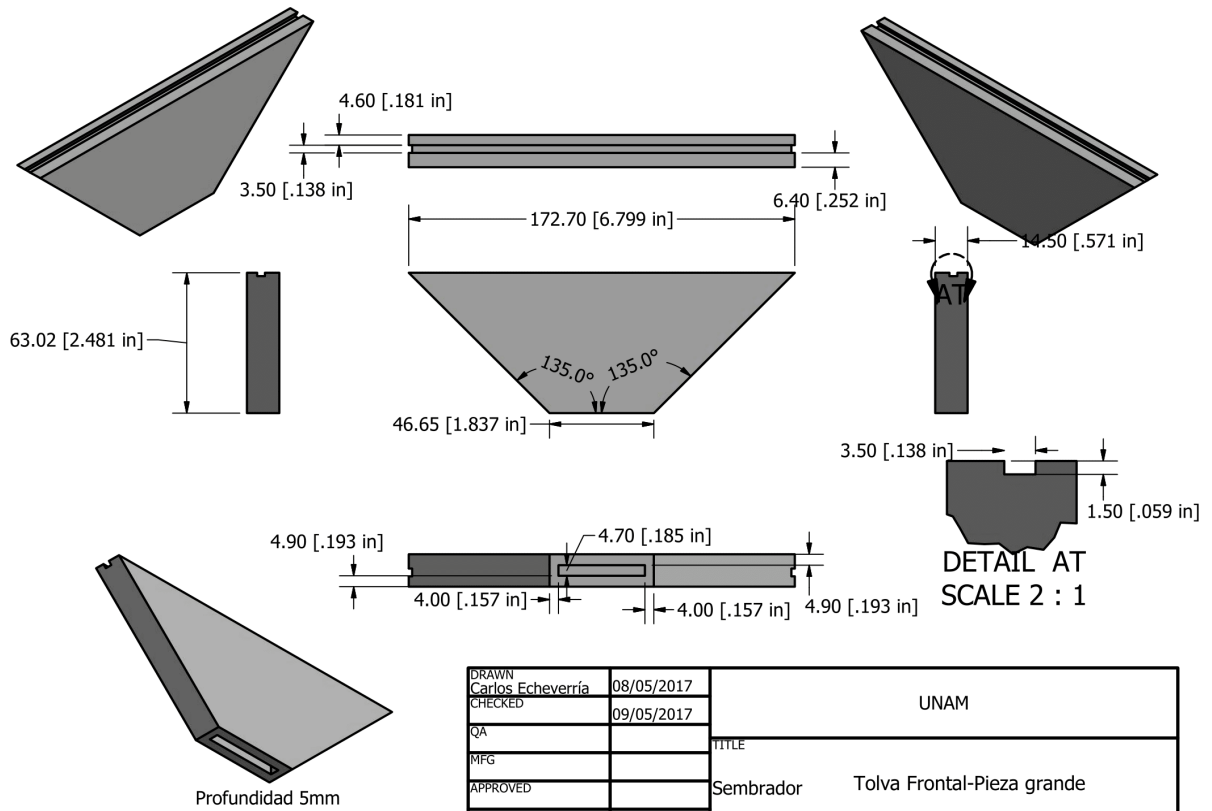
DETAIL AN
SCALE 2 : 1

DETAIL AP
SCALE 1 : 1

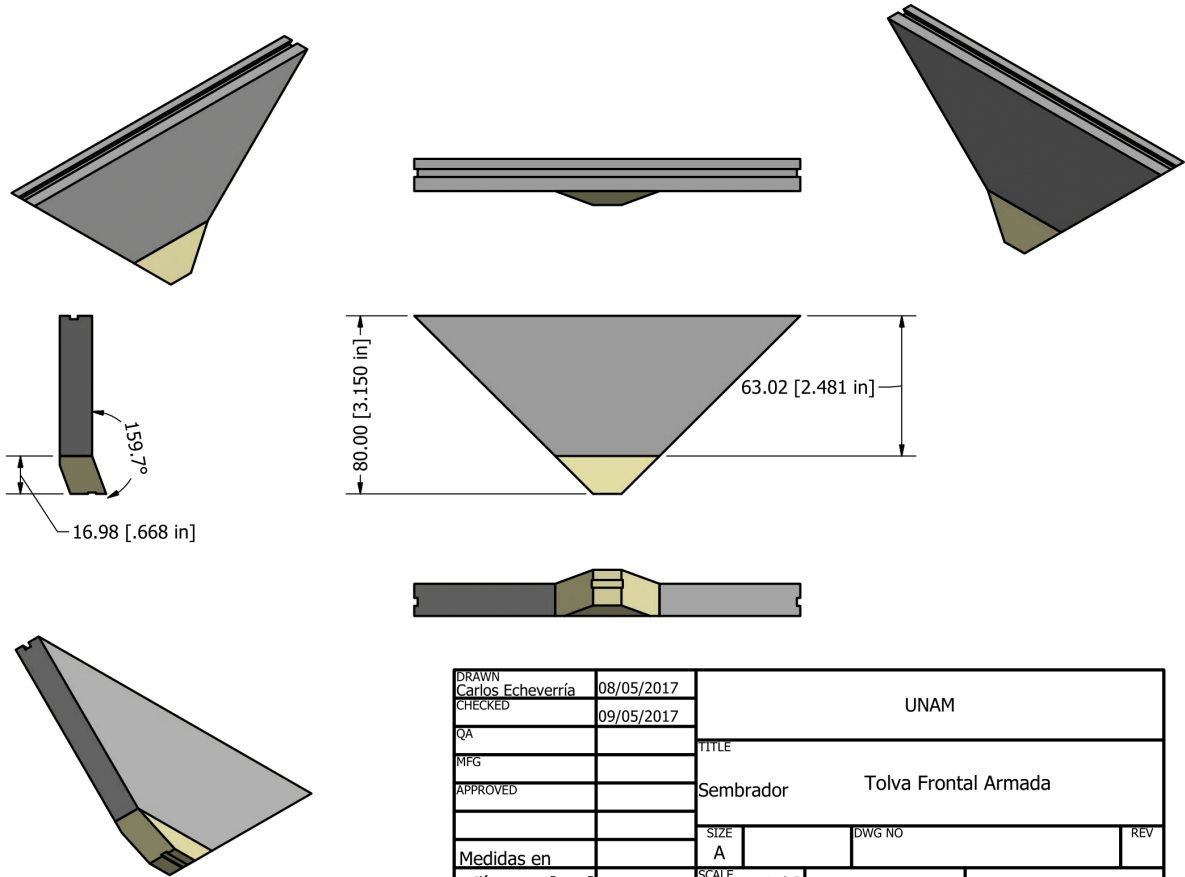
DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED		09/05/2017			
QA			TITLE		
MFG			Sembrador Pared Tolva Izquierda		
APPROVED					
			SIZE	DWG NO	REV
Medidas en			A		
milímetros [mm]			SCALE	1 / 2	SHEET 15 OF 23



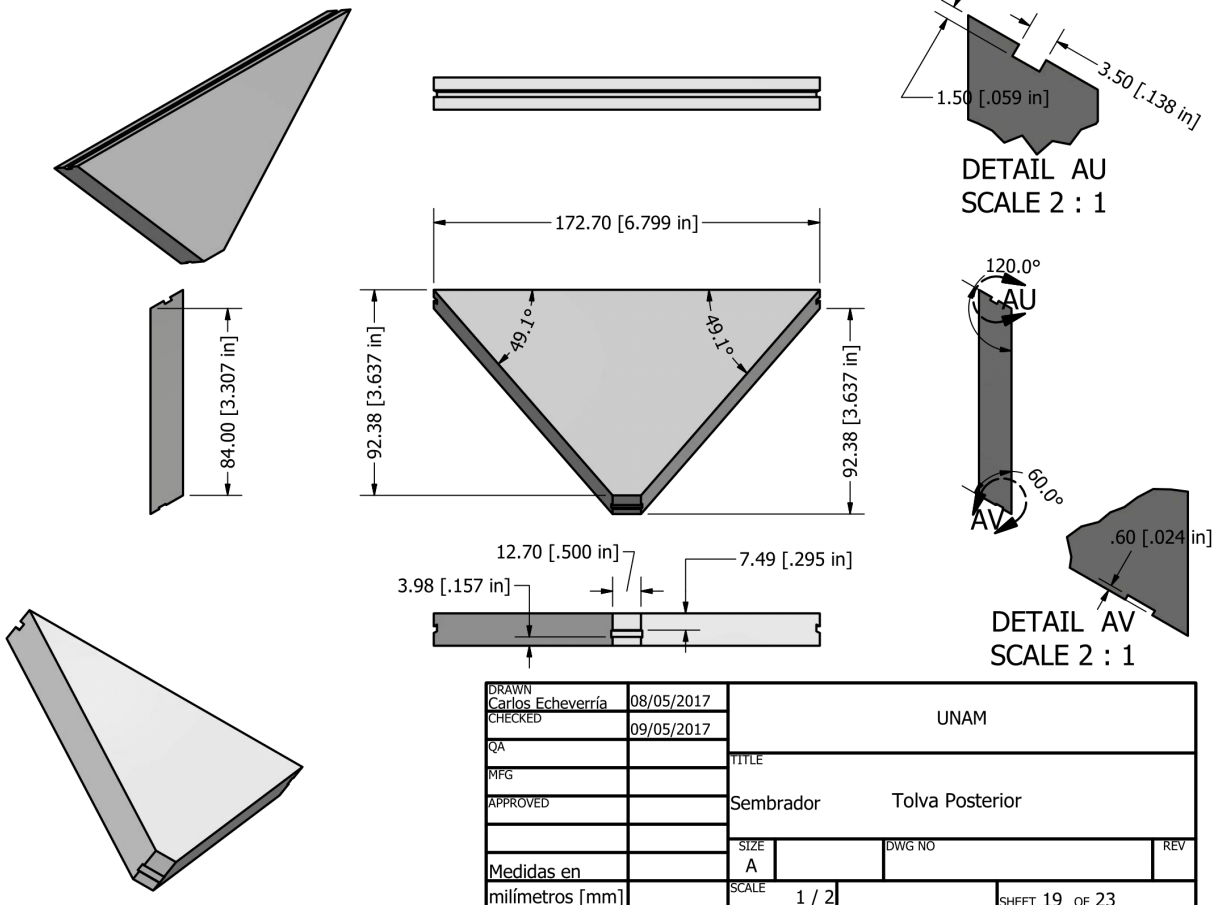
DRAWN Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED	09/05/2017	TITLE		
QA		Sembrador Tolva Frontal-Pieza pequeña		
MFG		SIZE	DWG NO	REV
APPROVED		A		
Medidas en		SCALE	1 : 1	SHEET 16 OF 23
milímetros [mm]				

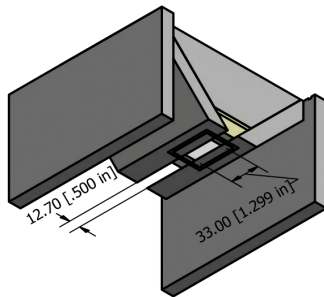
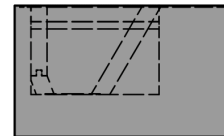
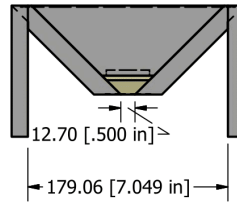
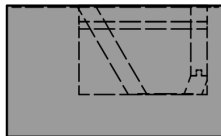
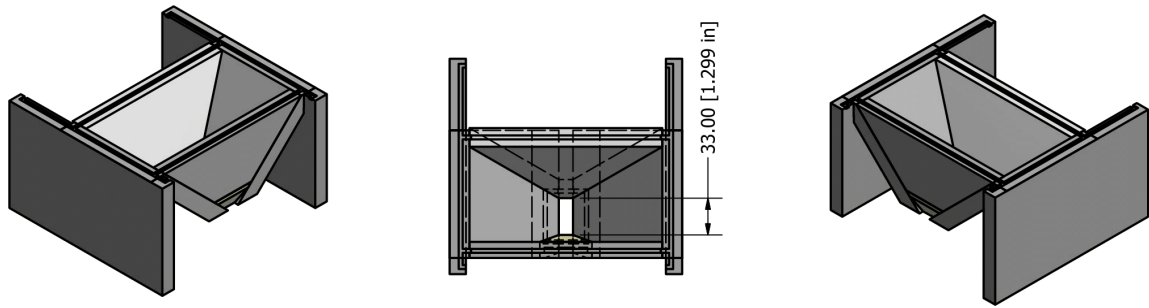


DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM	
CHECKED		09/05/2017		
QA			TITLE	
MFG			Sembrador Tolva Frontal-Pieza grande	
APPROVED			SIZE	REV
			A	
Medidas en			DWG NO	
milímetros [mm]			SCALE	1 / 2
				SHEET 17 OF 23

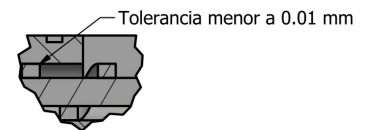
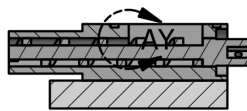
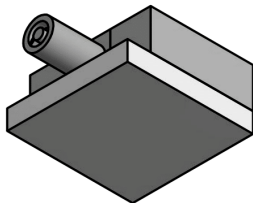
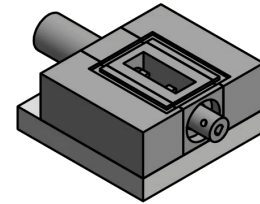
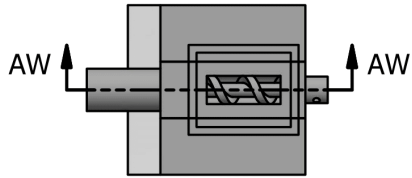
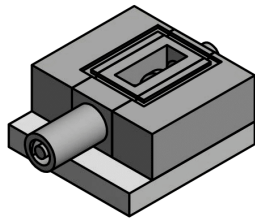


DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM	
CHECKED		09/05/2017		
QA			TITLE	
MFG			Sembrador Tolva Frontal Armada	
APPROVED			SIZE	DWG NO
			A	
Medidas en			SCALE	1 / 2
milímetros [mm]				SHEET 18 OF 23



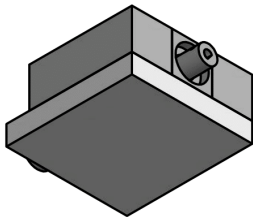


DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED		09/05/2017			
QA			TITLE		
MFG			Sembrador Tolva Armada con paredes laterales		
APPROVED					
			SIZE	DWG NO	REV
Medidas en			A		
milímetros [mm]			SCALE	1 / 4	SHEET 20 OF 23

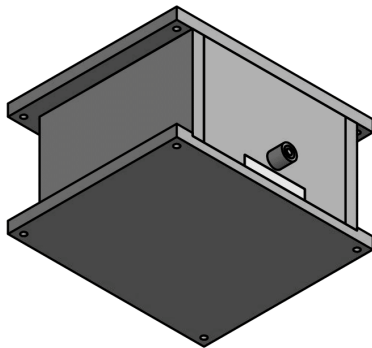
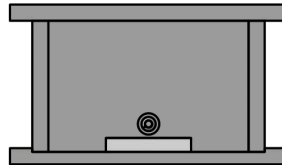
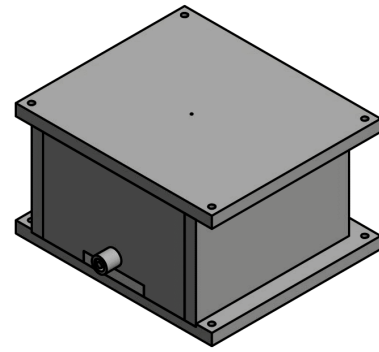
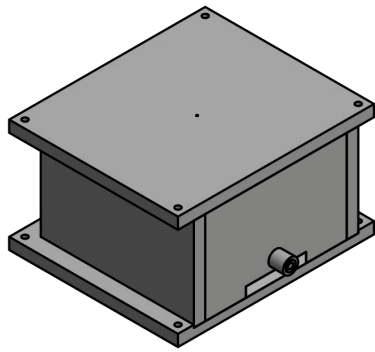


SECTION AW-AW
SCALE 1 / 2

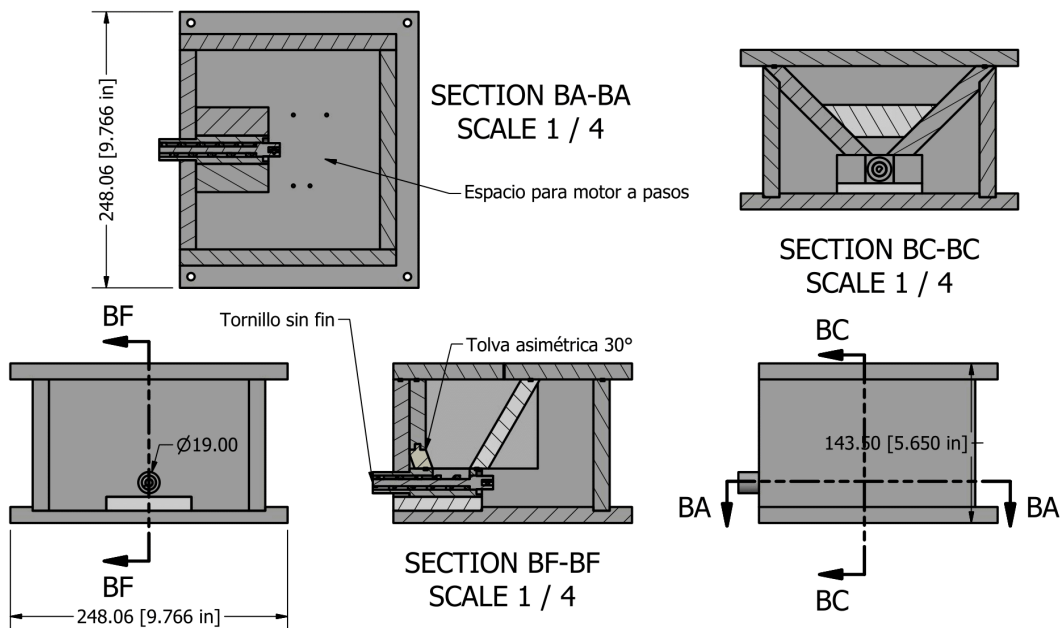
DETAIL AY
SCALE 1 : 1



DRAWN Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED	09/05/2017	TITLE		
QA		Sembrador Camisa con tornillo		
MFG		SIZE	DWG NO	REV
APPROVED		A		
Medidas en		SCALE	1 / 2	SHEET 21 OF 23
milímetros [mm]				



DRAWN Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM		
CHECKED	09/05/2017			
QA		TITLE		
MFG		Sembrador Sembrador Armado		
APPROVED		SIZE	DWG NO	REV
Medidas en		A		
milímetros [mm]		SCALE	1 / 4	SHEET 22 OF 23



DRAWN	Carlos Echeverría	08/05/2017	UNAM	
CHECKED		09/05/2017		
QA			TITLE	
MFG			Sembrador Sembrador Armado	
APPROVED			SIZE	REV
			A	
Medidas en			DWG NO	
milímetros [mm]			SCALE	SHEET 23 OF 23
			1 / 4	

10.2. Apéndice 2

Código para el movimiento del motor a pasos escrito en *Energia V0101E0013 para un microcontrolador MSP430G2553*.

//Declaración de Variables.

int X =500; // control corresponde a 300 RPM

int t1 = 10000; //Tiempo de espera entre la señal de la válvula y el encendido del motor.

int t2 = 120; //Tiempo de espera para el encender la cámara 100 para los puertos uno y 2 y 120 para 3 y 4.

int t = 755; // Funcionamiento del motor incluyendo el tiempo de cámara 735 para Alturas

//1 y 2 y 755 para 3 y 4.

int var = 0;

int intento = 0;

const int buttonPin = PUSH2; // señal del Interruptor de fin de carrera

const int ledPin =14;

int buttonState = 0;

void setup(){

//motor 1

//Puerto MSP y Cable motor

pinMode(2, OUTPUT); //P1.0-M 1

pinMode(3, OUTPUT); // P1.1-M 2

pinMode(4, OUTPUT); //P1.2-M 3

pinMode(6, OUTPUT); //P1.4-M 4

pinMode(7, OUTPUT); // Señal para la cámara de partículas

pinMode(15, OUTPUT); // Señal para la cámara

pinMode(ledPin, OUTPUT); //Indicador LED

// Se inicializa la señal del interruptor como entrada

pinMode(buttonPin, INPUT_PULLUP);

}

void loop(){

buttonState = digitalRead(buttonPin); // Se lee el estado del botón

//Si el interruptor está abierto.

if (buttonState == HIGH) {

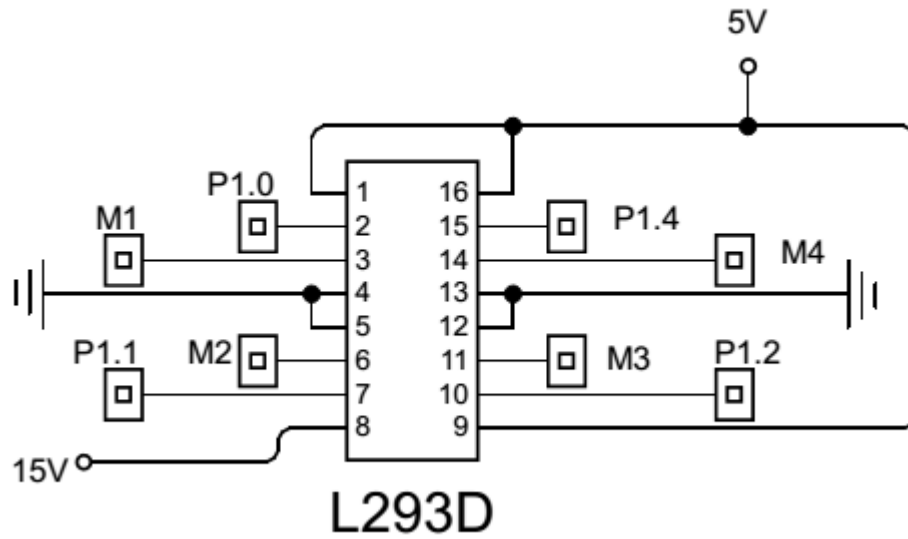
```
digitalWrite(2, LOW);
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(6, LOW);
digitalWrite(7, HIGH); //
digitalWrite(15,LOW); //
}
else {
digitalWrite(7, LOW); // comienza a adquirir el adquisidor
delay(t1); // se espera 10 segundos de grabación sin partículas
digitalWrite(ledPin, HIGH);
//1 Comienza el esquema de medios pasos para los embobinados del motor
for (var=0;var < t; var++) { // 686 ciclos son 2.744seg
if (var >= t2) { //después de t1+t2 comienza la grabación de la cámara
digitalWrite(15, HIGH);
}
digitalWrite(2, HIGH);
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(4, HIGH);
digitalWrite(6, LOW);
  delayMicroseconds(X);
//2
digitalWrite(2, HIGH);
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(6, LOW);
delayMicroseconds(X);
//3
digitalWrite(2, HIGH);
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
```

```
digitalWrite(6, HIGH);
delayMicroseconds(X);
//4
digitalWrite(2, LOW);
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(6, HIGH);
delayMicroseconds(X);
//5
digitalWrite(2, LOW);
digitalWrite(3, HIGH);
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(6, HIGH);
delayMicroseconds(X);
//6
digitalWrite(2, LOW);
digitalWrite(3, HIGH);
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(6, LOW);
delayMicroseconds(X);
//7
digitalWrite(2, LOW);
digitalWrite(3, HIGH);
digitalWrite(4, HIGH);
digitalWrite(6, LOW);
delayMicroseconds(X);
//8
digitalWrite(2, LOW);
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(4, HIGH);
digitalWrite(6, LOW);
```

```
delayMicroseconds(X);
}
while (buttonState == LOW){
// Mientras que el estado del interruptor este en bajo, todo se mantiene apagado hasta que
cambie de
//estado.
digitalWrite(2, LOW);
digitalWrite(3, LOW);
digitalWrite(4, LOW);
digitalWrite(6, LOW);
digitalWrite(7, HIGH);
digitalWrite(ledPin, LOW);
digitalWrite(15,LOW);
buttonState = digitalRead(buttonPin);
}
}
}
```

10.3. Apéndice 3

Diagrama de conexión para el motor a pasos.



10.4. Apéndice 4

Device Designed to Load High-Speed Gas Flows with Polydisperse Granular Phases in Diluted Regimes

C. Echeverría^{1,2,*}, D. Porta¹, C. Stern¹, J.E.V. Guzmán²

¹ *Facultad de Ciencias, Universidad Nacional Autónoma de México, México*

² *Instituto de Ingeniería, Universidad Nacional Autónoma de México, México*

*Corresponding author: C Echeverría carlosea1982@ciencias.unam.mx

Address: Facultad de Ciencias, UNAM

Av. Universidad 3000, Circuito Exterior S/N

Delegación Coyoacán, C.P. 04510

Ciudad Universitaria, D.F., México

We present and discuss a technical solution to the problem of feeding a constant stream of solid particles (with a specific size distribution) into a confined, high-speed flow of air. This flow evolves in a relatively long test section, whereby the compressible and turbulent effects adversely affect the particle injection process. Because the local velocity and pressure fluctuations upset the dynamical conditions at the feeder's discharge plane, certain key elements must incorporate special design features. The characterization of the particle loading process confirms that accurate volume flow rates are possible under extreme flow conditions in experimental flows.

Processes involving the circulation of confined gas-solid mixtures span an extremely wide array of industrial systems^{1,2}. Illustrative examples in regimes with low and moderate speeds may include fluidized beds³, pneumatic transportation systems in mining operations⁴, cyclone separators, etc. Other specialized systems require a rather strict control of the granular volume fractions present in the stream of gas. For example, the characterization and calibration procedures applied to measuring devices, such as Coriolis flow meters, depend critically on the correct determination of the granular volume fractions⁵.

Another important class of processes of interest concerns gas-solid flows with high speeds, in excess of 60 m/s. One such instance is the production of natural gas in deep-water facilities. Here, the fast moving gas removes a considerable number of sand particles from the reservoir, which are then carried along with the main current (i.e. the flow of gas) though the control and metering devices installed on the production complex. Sometimes the research concerning many of the relevant cases previously mentioned must be conducted in experimental facilities. In this context the injection of particles must be accurately controlled, in order to avoid spurious effects altering the local particle distributions and their associated velocities⁶.

Accordingly, the concrete problem of accurately loading the flow with a specified volume of solid particles can be addressed in different ways. The

injection piston tested by Tang and Chen⁷ proved to enable a high degree of control. An obvious limitation of such systems, however, is their inability to produce a continuous and smooth flow of particles. In contrast, screw conveyors are an effective means to a) accurately inject low and high volume fractions, b) operate in a prolonged manner, and c) handle polydisperse granular materials.

Clearly, the geometrical traits of the screw-conveyor system are influenced by the quantity and properties of the granular material to be injected, as well as by the experimental requirements related with the flow properties Bates⁴ (i.e. pressures, velocities, turbulence, etc.). Much of the available information focuses on resolving the motion of powders and small sized particulate matter in conveyor systems (see Ref 8). With this kind of materials, the feeding interruptions observed at low flow rates seem to disappear at higher operating speeds, especially when certain values of the pitch angle and the thickness of the screw blades are enforced. The geometrical configuration of the hopper and the screw are also relevant when considering the specific operating conditions (see Ref 9). Bates⁴ provides a wide overview of different applications in flow systems with either horizontal, inclined or vertical configurations.

In our case, the experimental flow under consideration concerns the joint evolution of a polydisperse granular material and a high-speed flow

of air. This flow takes place inside a vertical riser tube with an overall length of 5.7 m, and internal diameter of 0.0248 m. An average operating pressure of 1.35×10^6 Pa at the inlet produces velocities of approximately 250 m/s inside the test section. In view of the fact that the process particles are much larger than the ones constituting a powder, the conventional mixing techniques are inadequate for flow-loading purposes. Therefore, the process particles must be directly injected at a point upstream of the test section.

The granular material of interest consisted of the glass beads commercialized under the brand Jaygo Incorporated Dragonite® 4501. Their reported bulk density was 509.2 kg/m^3 , while the individual bead sizes ranged from 0.29×10^{-7} to $4.3 \times 10^{-7} \text{ m}^2$. Figure 1a shows the particle size distribution (expressed in terms of the respective plane-projected areas), as obtained by means of an optical measuring technique.

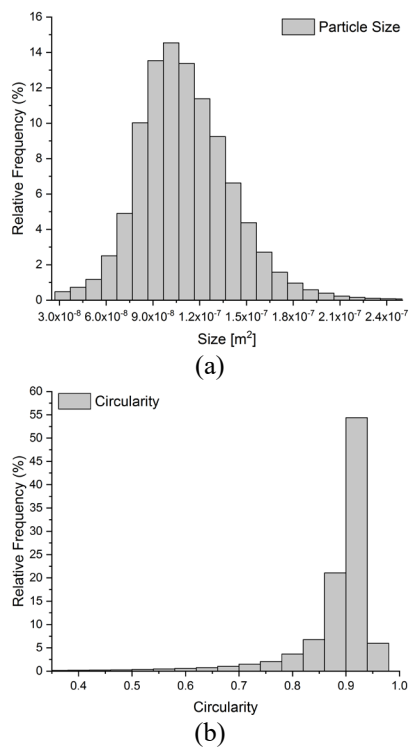


Figure 1. Particle characteristics. (a) Plane projected area distribution. (b) Particle circularities. Individual diameters were measured with the aid of the free image processing tool ImageJ (see Ref 10).

Even though most of the beads were approximately symmetrical, a relatively small fraction had significant circularity variations (Fig. 1b).

Accordingly, an adequate roundness of the particles could be safely assumed for design purposes.

Moreover, the remarkable hardness of the glass beads prompted the following considerations: a) particle fragmentation and attrition effects could be ignored, b) particle-particle interactions could be considered as inelastic, and c) particle-wall interactions could induce an elastic response from the walls of the container and the conveyor. As the diagrams of Fig. 2 illustrate, the hopper, the conveyor casing and the screw reflect these aspects in the final design. In accordance with the recommendations found in the open literature Bates⁴, the hopper was given an asymmetrical configuration (Fig. 2a). While the container, the hopper and the conveyor were constructed in Polyamide, the screw was constructed in bronze.

One particularly important design feature was the 0.6mm gap left between the screw and conveyor casing (Fig. 2b). This feature prevented the stacking and compactification of particles and, thereby, the subsequent mechanical blockage of the screw.

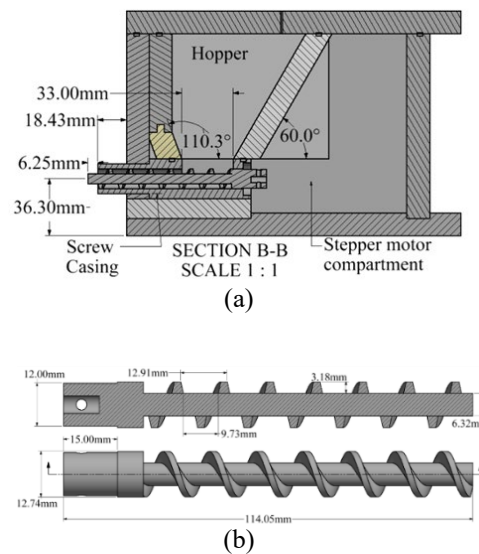


Figure 2. Diagram of the particle feeder design. (a) shows a lateral view of the container with the hopper and conveyor device; (b) shows the screw.

In addition, the possibility of a “fluidized” motion of the particles inside the screw conveyor required special attention. Such an undesirable effect was avoided by raising the pressure inside the container, in order to balance out the back pressure registered at the discharge plane (i.e. the point of injection). To this end, the container had to be flawlessly sealed. Another important design feature

was the extended length of the screw and conveyor casing, which protruded approximately 10mm into the test section (the suction of particles at this point did not occur according to a through verification test). The discharge plane perpendicularly oriented with respect to the main flow.

The screw was activated by a Minebea Type 17 PM-k102-01VSL, two-phase, hybrid stepper motor. This versatile motor could produce angular speeds in the range (~30 to 300 RPM) at high torque ratings. Its operation was controlled with a Texas Instruments MSP430G2553, 16MHz MCU, ultra-low-power microcontroller. A half-stepping, Pulse-width Modulation (or PWM) control software was programmed in the open source Energia IDE environment (version V0101E0013).

In order to characterize the granular mass flow rates, the feeder was set to operate for 50 seconds. Ten measurements were taken at six different time intervals, so that a meaningful statistical analysis could be performed. The foregoing process was applied with the motor running at each of the following angular speeds: 300, 214.2, 150, 75 and 37.5 RPM. It is worth stressing that the total mass delivered by the conveyor was measured with an analytical balance with an associated uncertainty of 0.05 g across the measuring range. The mass flow rate was found to be independent of the number of particles in the hopper.

Figure 3 shows the mass flow rates as a function of time. As can be seen, the linear-regression curves obtained for each one of the angular speeds fit the data points almost perfectly (the respective Pearson correlation coefficients were above 0.9999 in all cases). Furthermore, the corresponding standard deviations did not exceed 0.2 g (i.e. with a percent error lower than 1.4%) across the entire interval. The sole exception to the above behavior was the 5s point corresponding to the 150 RPM angular speed, for which the standard deviation was 3.4 g.

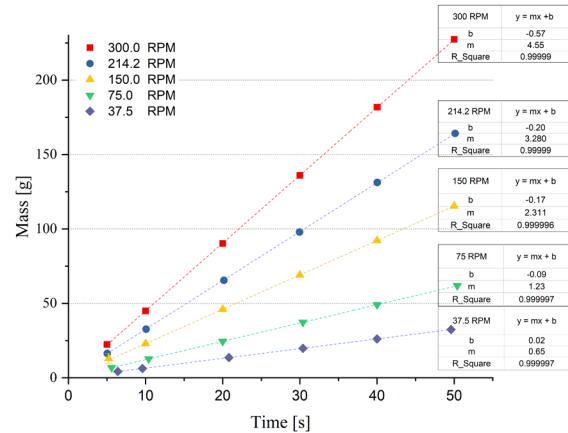


Figure 3. Mass injection as a function of time. Each curve corresponds to a different rotational speed of the screw.

By reorganizing the data we get the single curve presented in Figure 4, it condenses the slopes of all the regression lines, as a function of the angular speed in revolutions per second (RPM).

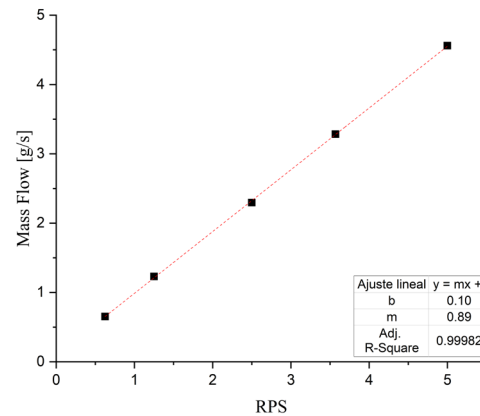


Figure 4. Mass flow rate as a function of the rotational speed of the screw in revolutions per second.

Thus, from this plot, one may directly determine the granular mass flow rate injected per turn, per second, regardless of the pressure and velocity conditions prevailing inside the test section. Such estimates fall within the 0.891 ± 0.006 g/rev uncertainty interval.

Data availability statement

The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Acknowledgements:

This work was conducted with the support from the IINGEN-UNAM and the Taller de Hidrodinámica y Turbulencias of the Facultad de Ciencias, at the UNAM.

¹P. R. Naren and V. V. Ranade, *Particuology*, 9 (2), 121, 2011.

²S. Bhusarapu, M. H. Al-Dahhan, and M. P. Duduković, *Powder Technol.*, 163 (1–2), 98, 2006.

³N. G. Deen, M. Van Sint Annaland, M. A. Van der Hoef, and J. A. M. Kuipers, *Chem. Eng. Sci.*, 62 (1–2), 28, 2007.

⁴L. Bates, *Guide to the Design, Selection and application of screw feeders*, 1st ed. Wiley, 2000.

⁵N. T. Basse, *Flow Meas. Instrum.*, 37, 107, 2014.

⁶S. Fokeer, S. Kingman, I. Lowndes, and A. Reynolds, *Chem. Eng. Process. Process Intensif.*, 43 (6), 677, 2004.

⁷L. Tang and W. Y. Chen, *Rev. Sci. Instrum.*, 70 (7), 3143, 1999.

⁸M. Barati Dalenjan, E. Jamshidi, and H. Ale Ebrahim, *Adv. Powder Technol.*, 23 (3), 372, 2012.

⁹J. W. Fernandez, P. W. Cleary, and W. McBride, *Chem. Eng. Sci.*, 66 (22), 5585, 2011.

¹⁰M. D. Abrámov, P. J. Magalhães, and S. J. Ram, *Biophotonics Int.*, 11 (7), 36, 2004.

A method to determine the measurement volume for particle shadow tracking velocimetry (PSTV)

C. Echeverría, D. Porta, C. Stern & J. E. V. Guzmán

Journal of Visualization

ISSN 1343-8875

J Vis

DOI 10.1007/s12650-020-00657-8





REGULAR PAPER

C. Echeverría · D. Porta · C. Stern · J. E. V. Guzmán

A method to determine the measurement volume for particle shadow tracking velocimetry (PSTV)

Received: 24 February 2020 / Revised: 14 April 2020 / Accepted: 6 May 2020
© The Visualization Society of Japan 2020

Abstract A method to determine the depth of detection (DOD) for particle shadow tracking velocimetry (PSTV) is presented. In contrast with other image-based velocimetry techniques, PSTV is capable of measuring particle velocity in a volume of the flow. However, a precise methodology to determine the size of the measurement volume was not available (in particular, for internal flows in tubes with circular cross sections). To correct this shortcoming, we determined the range of distances in which the particles could be clearly identified. This was accomplished by displacing a calibration target across the camera's field of view and by implementing appropriate filtering algorithms. The method was tested with a polydispersed gas-particle flow inside a tube. We found that the significantly improved particle count resulted in an unbiased statistical convergence of the data.

Keywords Volume of study · Depth of detection · PSTV · Internal flow visualization

1 Introduction

The determination of the flow field using particle image velocimetry (PIV) is done by means of a cross-correlation of the displacements in a small interrogation area. Particle tracking velocimetry (PTV) follows particles individually. The digital analysis of both PTV and PIV has been extensively developed since the 1980s, when digital processing techniques became accessible (Fig. 1a). A critical element of such techniques is the set of image filtering algorithms required to detect and spatially localize the tracer particles.

One of the first algorithms enabling easier detections appeared in the work of Adamczyk and Rimai (1998). According to these authors, the filtering process based on threshold levels reduces the weight of the images and, thereby, facilitates the detection of the particles. Further investigations stressing the relevance of these threshold levels in the image handling and particle detection processes was provided by Adrian and Westerweel (2011) and Raffel et al. (2007).

C. Echeverría (✉) · D. Porta · C. Stern
Taller de Hidrodinámica y Turbulencia, Facultad de Ciencias, UNAM, C.P. 04510 Ciudad Universitaria, CDMX, México
E-mail: carlosea1982@ciencias.unam.mx

D. Porta
E-mail: davidporta@ciencias.unam.mx

C. Stern
E-mail: catalina@ciencias.unam.mx

J. E. V. Guzmán
Laboratorio de Flujos Multifásicos, Instituto de Ingeniería, UNAM, C.P. 04510 Ciudad Universitaria, CDMX, México
E-mail: jguzmanv@iingen.unam.mx

Published online: 10 June 2020

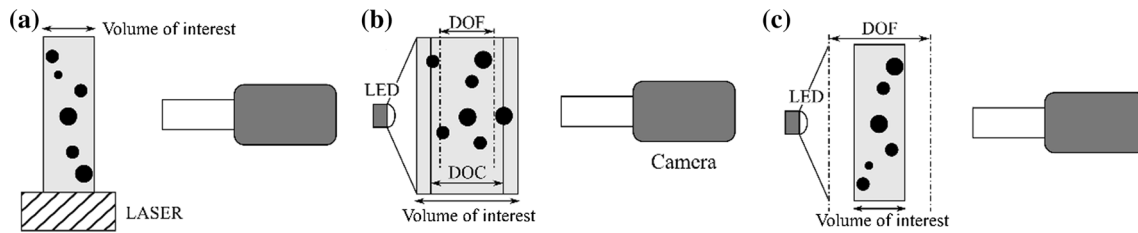


Fig.1 **a** Shows the typical PIV and PTV setup. Images **b**, **c** show the typical PSV and PSTV setup, with the depth of field and the depth of correlation for macroscopic measurements. Image **b** shows the case when the volume of interest is greater than DOF, corresponds to the case of this work and **c** shows when DOF is greater than the volume of interest the optical arrangement required by the PSTV

PTV has been used not only to measure the velocity of the flow (under the assumption that the tracer particles follow the flow faithfully), but also to study the motion of the particles themselves (e.g., with sprays, droplets, bubbles, etc.). PTV has given useful results in the analysis of two-phase flow systems at low speeds, providing dynamical information of the particles. Hagemeyer et al. (2015) showed the potential benefits of various methods by comparing four of them, namely: optical fiber probes, laser Doppler velocimetry (LDV), PIV, and PTV. Furthermore, when high resolutions are needed to correctly determine the specific motion of the particles (e.g., their trajectories) the PTV techniques are superior to techniques such as PIV. These measuring methods depend on whether the particles are distinguishable, or not, as well as on their volume fraction relative to the flow. The choice may also depend on the capability of the computer at hand since processing data for high particle densities is computationally expensive.

Both techniques can use plane or volumetric illumination by means of laser sheets or high-power pulsed LEDs. Figure 1a shows the illumination by a laser sheet. When the sheet's thickness is of the order of millimeters, it is frequently assumed that the particles move essentially in that plane.

Recently, PIV and PTV were combined to determine the properties of bubbly flows, in conjunction with the motion of the particles (Ahmadi et al. 2019; Cerqueira et al. 2018). When volumetric illumination is used, the particles are illuminated either from the front or from the back, to, respectively, yield reflected light or shadows (Fig. 1b, c). In many practical situations, PIV has two major drawbacks in comparison with PTV: (a) the necessary equipment is expensive, and (b) its implementation may be too complicated, or even impossible.

Hagemeyer et al. (2015) successfully employed the PTV technique to investigate a densely populated fluidized bed, while introducing a new segmentation algorithm to detect the particles. It was shown that statistical techniques relying on the computation of cross-correlations do not yield precise results when measuring the motion of individual particles. Later Huck et al. (2017) used the shadow particle tracking velocimetry (PSTV) technique, with collimated light, to investigate turbulent von Kármán flows in water. As the name suggests, this variation of the technique entails a direct measurement of the particle's shadows. In the case just described, the depth of field (DOF) was larger than the experimental domain (Fig. 1c). As a result, the measuring volume could be established unambiguously.

There are other instances, however, in which the effective volume of interest is determined by the type of flow under investigation. For example, in a flow with high concentrations of large particles only the motion of the solid phase in the vicinity of the surface can be observed (Hagemeyer et al. 2015). The measuring volume is thus effectively constrained. For flow carrying small concentrations of particles, the PSTV technique is most suitable. This technique profits from a volumetric illumination, typically produced by a pulsed LED. Setups of this kind were used by Estevadeordal and Goss (2005) and by Hessenkemper and Ziegenhein (2018).

Other techniques involve modifying or combining PIV and PTV. Particle shadow velocimetry (PSV) produces flow measurements through the cross-correlation of shadows of the seeding particles. It does not require a laser and diminishes the amount of spurious scattered light. In this case, the depth of correlation (DOC) determines the effective size of the volume of interest (Truong et al. 2018; Estevadeordal and Goss 2005). In essence, the DOC corresponds to the maximum thickness of a volume in which the cross-correlation algorithm will still take into account the visible particles (within some acceptable fuzziness level of their contours). The DOC depends on the wavelength, the refractive index, the focal length, the magnification power of the installed lenses, and the sizes of the particles. Usually, the DOC is somewhat larger than the depth of field (DOF) thickness. Thus, the determination of the volume of study, regardless of the technique employed, is quite important to produce meaningful measurements.

One potential problem with the back illumination shown in Fig. 1b, is that the particles registered by the camera reside in a volume larger than the depth of field (DOF) which, in turn, depends mostly on the size of the particles. There is no unique criterion to eliminate unfocused particles. Minov et al. (2016) and Castanet et al. (2013) suggest that the DOF can be used for this purpose. However, using a single threshold value to detect the particles may lead to a biased measurement of the particle size distributions, mainly because small particles have a smaller DOF and may not be detected. In a previous work by Kashdan et al. (2007), the volume of detection was defined as a function of the DOF, as well as the field of view. These authors proposed a way to measure the DOF with an objective set of criteria. It involves accounting for the grayscale gradients, to determine the out-of-focus degree of the image. In the same way, Van Mieghem et al. (2017) compared the theoretical and experimental DOF's, from whence it was determined that the camera could be positioned closer to the region under investigation.

In this paper, we propose a new methodology to determine the volume of study for two cases: (a) internal flows in tubes, and (b) free jets. The technique is defined in terms of the digital process applied to the images. The digital process is instrumental to the technique, because it is possible to detect particles outside the focal plane in any given image. Therefore, our main objective is to determine an effective depth of detection, in order to define an effective volume of study.

2 Description of the method

2.1 Experimental setup

By carefully displacing a calibration pattern, the images of particles are precisely obtained and accounted for. With this and image processing filters, we determine the volume in which particles can be identified and traced.

The particles of interest have sizes in a range from 0.029 to 0.43 mm² (Jaygo Incorporated Dragonite® 4501). For the tube, an acrylic tube with an internal diameter $D = 24.80$ mm and wall thickness $a = 3.50$ mm is used (Fig. 2). In this case, curvature, thickness, opacity, etc., must affect the effective measurement volume. For example, the curvature of the acrylic tube further distorts the shadows produced by the particles whenever they are not at the center of the tube, or in the focal plane of the camera.

The optical device consisted of a K1 CentriMax lens with MX-1 and MX-2 magnification lenses and a Miro M10 camera. This offered a large magnification of about 1.8 and a small field of view of

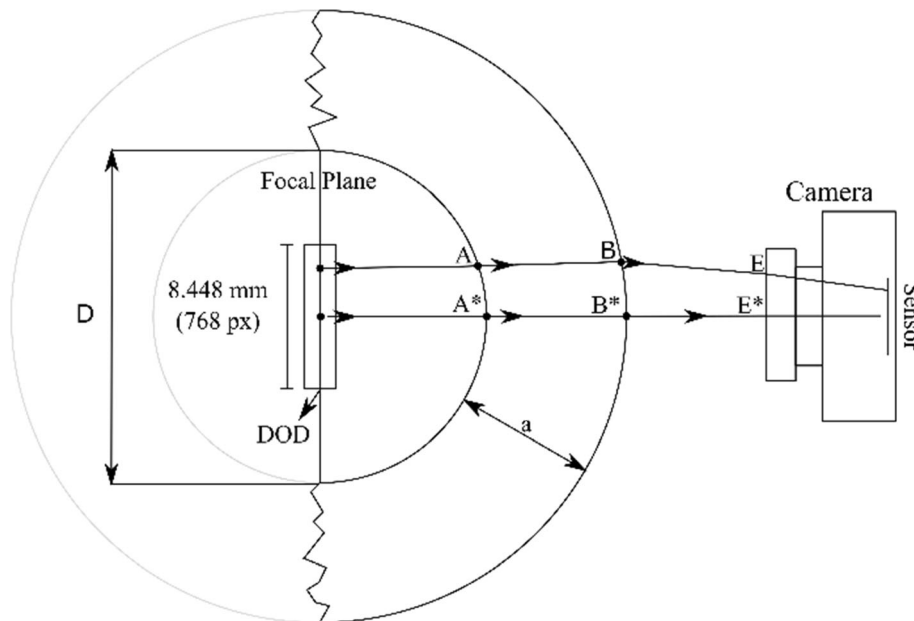


Fig.2 Light ray tracing. The focal plane is located at the center of the tube. The Depth of Detection distance (DOD) defines the detection (or sampling) volume

8.448 mm \times 6.336 mm. A high intensity LED was placed in the optical axis of the camera. With these elements, the light rays were only slightly deflected outside the tube (Fig. 2).

The main difference with Van Mieghem et al. (2017) is that in our case, the particles are of the same order of magnitude as the DOF itself (i.e., about ~ 0.3 mm). Thus, whenever a small positional shift occurs in the direction of the optical axis, the particles are observed out of focus, and the measurement of the effective volume becomes quite difficult. It may be concluded from the preceding argumentation that an adequate determination of the effective volume of study, as well as of the digital process required to minimize it, are both critical to the correct implementation of the technique.

As Truong, Harris, and McPhail, 2018 did for PSV, an effective distance is determined, whereby the tracking software Xcitex ProAnalyst® Professional Edition V1.6.0.2 could still correlate a given shadow (with diffuse borders) to a specific particle. This depth of detection (DOD) must be greater than the DOF defined by the optics. This DOD was determined by displacing a thin rectangular glass with a single layer of particles glued to its surface (Fig. 3).

This constituted a calibration pattern that was simultaneously placed inside and outside (free case) the acrylic tube, in order to take into account the effect associated with the wall's curvature.

The calibration pattern was displaced in the x -direction (i.e., in a direction perpendicular to the tube axis) as follows: The center of tube is the origin of the displacements, from 0 to $\pm 0.08D$ at intervals of 0.01D and from ± 0.08 to $\pm 0.33D$ at intervals of 0.02D. As can be seen in Fig. 3, a change of light intensity is produced at the edges due to the curvature of the tube. It should be noted that the observed vertical lines are not an artifact of the optical arrangement or the filtering process, but rather, they are the result of the manufacturing process of the tubes.

In total, 40 photographs were taken with this calibration pattern (both inside the tube and free case), at a fixed focal plane located at various positions (Fig. 4a, b).

2.2 Digital processing

Two digital filters were formulated. Both of them seek to eliminate undesired information from the images (such as background noise, vertical lines, non-homogeneous illumination, etc.), and facilitate the detection of the particles. Furthermore, they are meant to preserve, as much as possible, the projected shadows without changing their geometry. The first one, called Min Detect, was designed to eliminate spurious particles that are not sufficiently well focused, thereby reducing the effective detection distance. It enables the determination of the DOD to characterize the effective measurement volume (see Fig. 2). The second filter, called Max Detect, was designed to detect as many particles as possible regardless of the sharpness of their focus.

These filters were constructed with a series of tools native to Image J (Abràmoff et al. 2004) and in combination with plugins made for this software.

If the images obtained have, like in PIV, a difference in the intensities because of a pulsed light source, like a pulsed LED, then the first task is to homogenize these intensities. This step does not affect the photographs obtained for the determination of DOD in the microscope slide (thin glass), because the

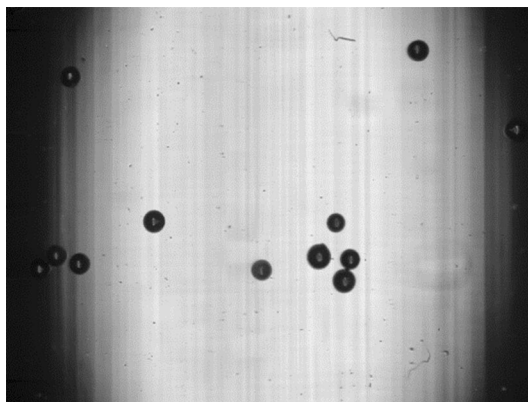


Fig.3 Snapshot of the calibration pattern is shown. The observed shadows are quite sharp, because all of the particles are located in the focal plane inside the tube

A method to determine the measurement volume

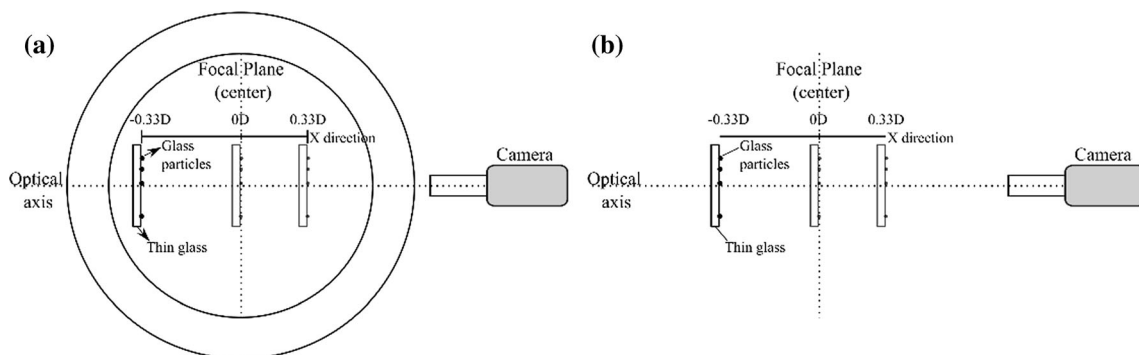


Fig.4 Calibration of the optical system. Shows the position of the calibration pattern necessary for the determination of the DOD. **a** Inside the tube. **b** Free case

illumination used was continuous and homogenous. One way to homogenize the illumination can be achieved with the plugin Stack Contrast Adjustment. This filter homogenizes the intensities using as reference, an image chosen by the user. Usually, the brighter one is chosen as reference because in these images greater contrast is observed. The parameters used for the resulting images were Slope = 5.000, Threshold = 0 and Max Factor = 0. The details of this filter can be consulted in Čapek et al. (2006) and Michálek et al. (2010).

In the next section, the filters Min and Max detection are described. Figure 5 shows a schematic of both processes.

2.2.1 Min detection filter

A subtraction of the background is performed (Rolling-Ball background correction), because the images have noise produced by the camera sensor mainly by thermal effects. When this noise is very large, it can lead to spurious detections as explained by Adrian and Westerweel (2011). These spurious detections occur

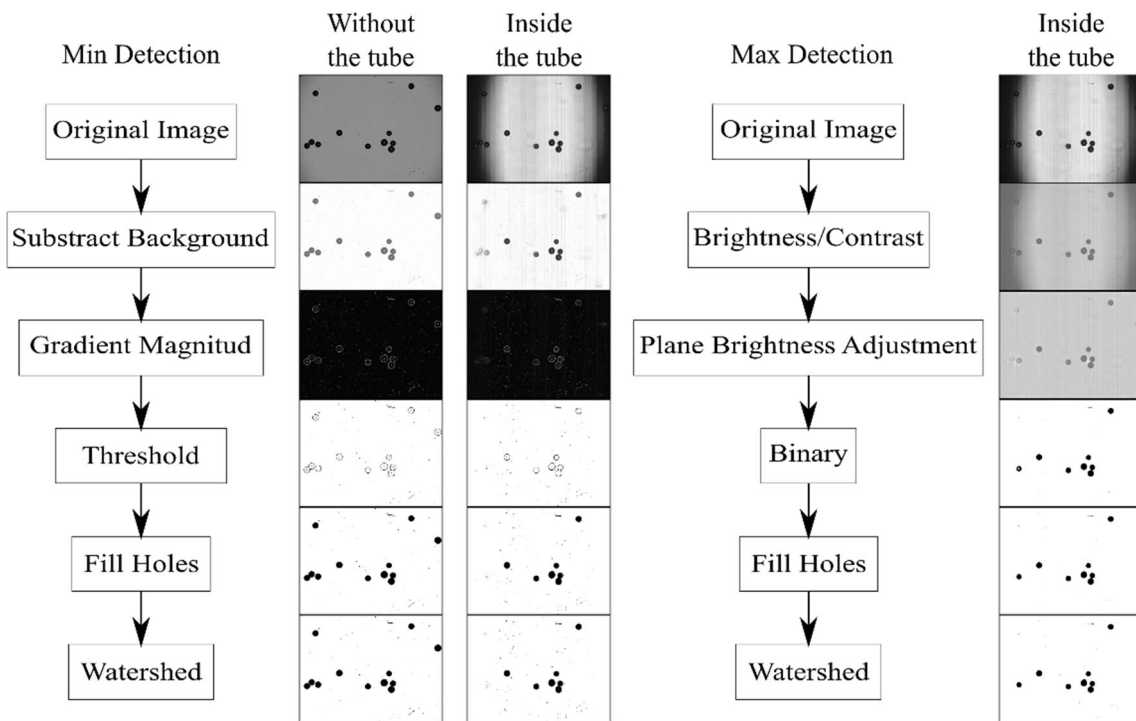


Fig.5 Digital process associated with the designed filters. The reference result is obtained with the calibration pattern outside the tube. In all cases, the particles are located at the focal plane ($x = 0D$)

mostly when small particles are used. Also in this case, there is information inherent to the tube which has defects of fabrication and curvature. Rolling-Ball background correction uses a rolling ball algorithm on the uneven background. The radius is set to the default value (50.0 pixels), which is the one that offered the best result on the images.

Then, the images are processed with the Image Differentials plugin, with the tool Gradient Magnitude. This tool gives the largest gradient magnitude when every possible direction is taken into account. The result is an image that highlights the edges of the particles near 255 (maximum level) on a black background (close to 0). The resulting image is 32-bit, so it must be converted into an 8-bit image to continue the process. The details of this plugin can be found in the work done by Unser (1999). When the particle has a diffuse edge, it is out of focus and less intense borderlines can be seen. When they are better focused a single line is observed. It is desired to preserve only these particles which are closer to the focus plane.

The next step is to apply a suitable threshold (see “ImageJ User Guide—IJ 1.46r | Image Menu,” n.d.) that serves as a cut-off value, so that any pixel that has a lower value is considered of one class and above this of another class. This results in images with a white background. Edges above this threshold that correspond to solid lines are seen as black. The diffuse edges are lost and appear as white. In this work, the threshold value was 20, determined through trial and error.

The particle images are now hollow, and there are some with segmented circumferences. The tool Fill Holes (“ImageJ User Guide—IJ 1.46r | Process Menu,” n.d.) is used to fill holes that are connected by at least 4 lines in the bottom and creates solid objects. This eliminates even more particles that, although they were detected, do not meet this criterion. The next step was only applied to the images used to determine the DOD where two particles are in contact. In order to identify them as two separate elements, the Watershed tool is used (“ImageJ User Guide—IJ 1.46r | Process Menu,” n.d.). This tool basically segments a grayscale or white and black image, assuming that it is water, then where there is a minimum between two clear structures, all points on the surface at a given minimum constitute a water catchment basin associated with that minimum. Hydrographic basins are the areas that divide adjacent catchment basins or the frontier of the particles.

2.2.2 Max detection filter

The Brightness/Contrast filter is used to improve the brightness of the image, removing as far as possible the dark areas due to the curvature of the tube, and improving the contrast of the images.

For this, the Plane Brightness Adjustment plugin (Michálek et al. 2010) is used. The acquired images are distorted, with irregular variations of brightness, darkening of the edges, and brightness in the center of the images. These effects are mainly due to the non-homogeneous illumination that results from the curvature of the tube. This effect resembles what was observed in confocal laser scanning microscopy (CLSM) images. The method makes a quick correction based on the estimation of a lighting gain that varies spatially and in the multiplication of the images by the inverse of the estimated gain. The method does not require any special calibration since the gain estimate is extracted from the image being corrected. So, the filter works correctly for our images.

Then, next step is to use the tool Binary (“ImageJ User Guide—IJ 1.46r | Process Menu,” n.d.). It converts an image to black and white, analyzes the histogram of the entire image, and sets an automatic threshold level to create the binary image.

This produces images of the particles not always as uniform solids, so the Fill Holes and then Watershed are applied for the same reason explained above, the later only for the images used to obtain DOD.

3 Results

3.1 DOD calibration results

Figure 6a shows the results of the number of particles detected versus the distance in the x-direction (considering all the particles, see Fig. 3). We determine the distance of DOD when the number of detected particles is greater or equal to one. Figure 7 shows an example of particles detected by the software Xcitex ProAnalyst® Professional Edition V1.6.0.2 in two different positions, the same intervals of size and eccentricity filters were used for Min and Max Detection filters in all cases (Size: 0.0484 to 0.1452mm² Eccentricity: 1 to 1.3). To compare DOD in the different cases we normalized with DOF:

A method to determine the measurement volume

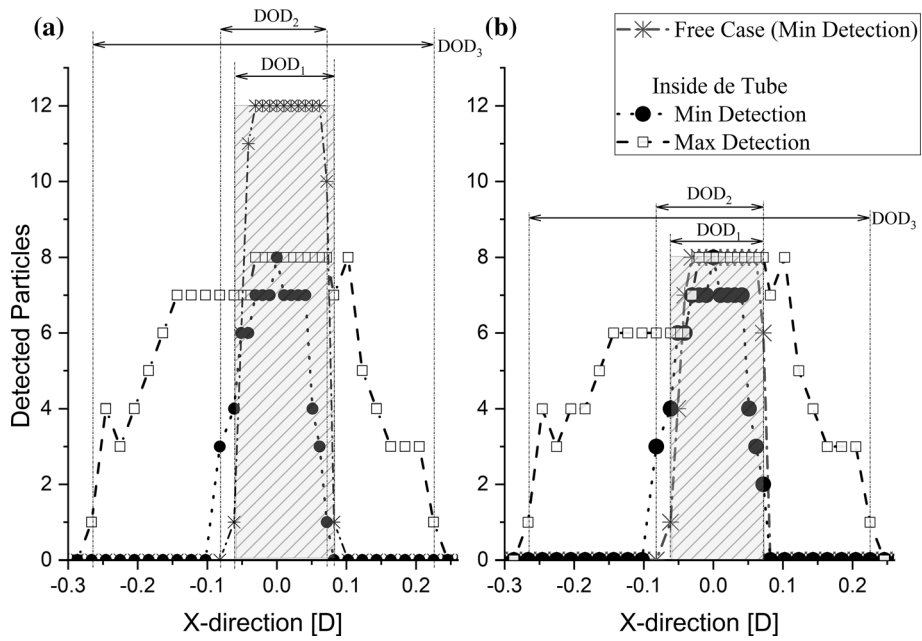


Fig.6 Number of detected particles as a function of the transversal position (i.e., along the x-direction, where 0.0D is the center of the tube and the positive values correspond to positions closest to the camera). The DOD's corresponding to Min Detection filters and Max Detection filters are indicated. **a** All the detected particles. **b** Particles detected in the center of the image (see Fig. 7 0D)

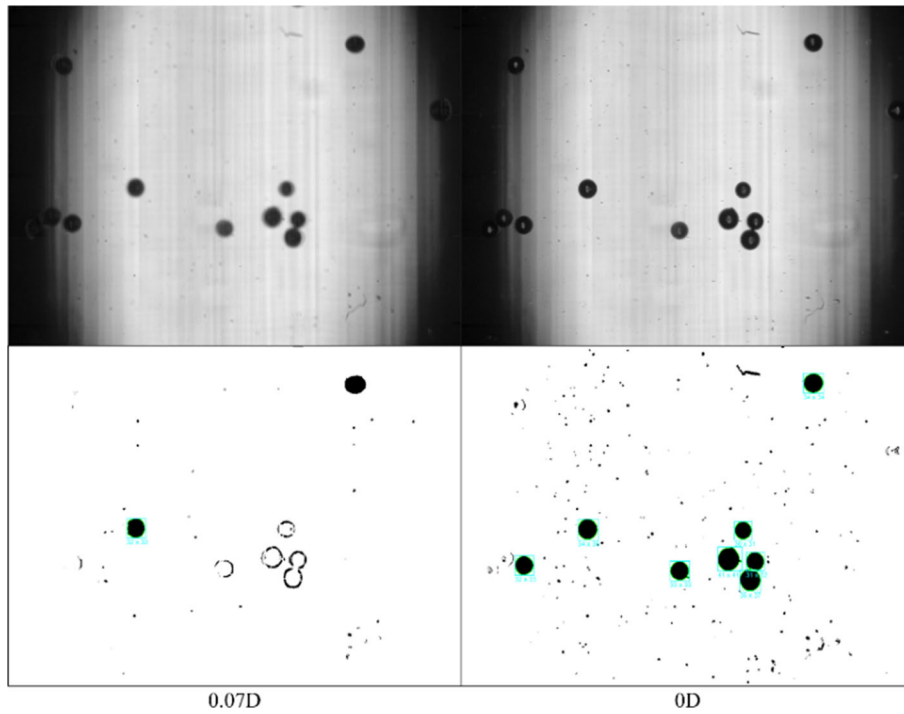


Fig.7 Example of the original photographs of the particles and after applying the Min Detection filter in the center of the tube (0D), and the first particle detected in 0.07D

$$DOD^* = \frac{DOD}{DOF} \quad (1)$$

The DOD's corresponding to the particles inside the tube and in the free case were, respectively, $DOD_2^* = 10.88$ (Min Detection), $DOD_1^* = 10.16$ (Min Detection) and $DOD_3^* = 34.83$ (Max Detection); $DOF = 0.35 \pm 0.06$ mm (see Echeverría 2015), as determined by the lenses used. The uncertainty associated with each DOD was solely determined by the uncertainty of the displacement of the calibration pattern, which was 0.01 mm in all cases. DOD_1 was used as a reference measurement, because it was obtained with the calibration pattern in the free case.

The fact that DOD_1^* and DOD_2^* are of the same order of magnitude (~ 10), confirms that the assumption of parallel light rays is a sound one (Fig. 2). This eliminates the need to make additional corrections to compensate for the tube's curvature. Note that, the extension of the DOD_2 was shifted 0.016D at the front edge and 0.02D at the rear edge, with respect to the DOD_1 . Thus, $DOD_1 < DOD_2$ with a total length difference of 0.12D. It is important to remark that this difference is due to the light refracted through the tube's wall.

In the free case, more particles are detected, which could mean that the DOD criterion is possibly biased. Hence, it cannot be ignored that one of the particles at the image edge is the "first" or "last" detected particle with respect to the shifted x-direction. Figure 6b) shows the 8 particles detected in the center of the image (see Fig. 7 OD). As can be seen, the results are consistent with Fig. 6a. The only change of the DOD corresponds to the particles in the free case, where $DOD_1^* = 9.43$. In this case, the first particle detected was the one in the upper right edge of the image; this particle is not detected inside the tube with either filter (Min and Max detection) mainly due to the lack of illumination near the edges of the images. This effect is attributed to the curvature of the tube and to the vertical stripes left by the manufacturing process. Clearly, the result indicates the limit of the Min detection filter inside the tube, which restricts the effective analysis area to approximately (~ 6.688 mm \times 6.336 mm). For this reason, it is safe to assume that the results are not biased.

Three particles were identified without and inside the tube as shown in Fig. 8. Figure 9 shows the results of the detection for this particular set of particles (Fig. 8). Max detection produces distributions of smaller sizes than Min detection. Figure 9 also shows symmetry between sizes far and near the lens, a behavior similar to the halo areas of the defocused particles obtained by Kashdan et al. (2007). The reason for this apparent discrepancy is that far from the lens the particles seem to have smaller sizes with respect to those located on the focal plane (Fig. 4a), while particles closer to the lens have bigger sizes (although they are blurred). It is important to note that the Max detection filter considers only a region in the center of the particles free of blurriness (the center has no intensity gradients) and, therefore, detects smaller particles. This also happens with the particles far from the lens, but with additional effect that the particles are perceived to be smaller.

Interestingly, for the same particle set, the Max Detection filter detects sizes smaller than those detected with the Min Detection filter. This is because the former highlights the diffuse edges of the particles, while the latter highlights only the edges with the largest intensities (Fig. 10).

The difference in sizes obtained with Min and Max detection corresponds on average, to a difference of 0.01 mm in the equivalent diameter of a circle. Min detection overestimates the size of the particles, while Max detection seems to overestimate the eccentricity (Fig. 11). Interestingly, if particle sizes are measured

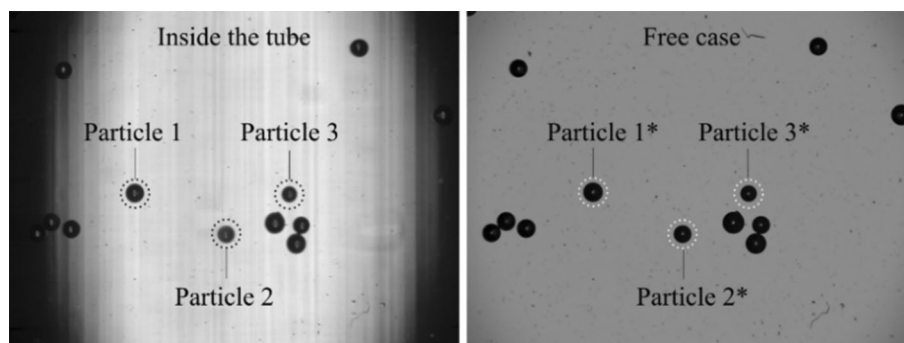


Fig.8 Particles used for the size comparison

A method to determine the measurement volume

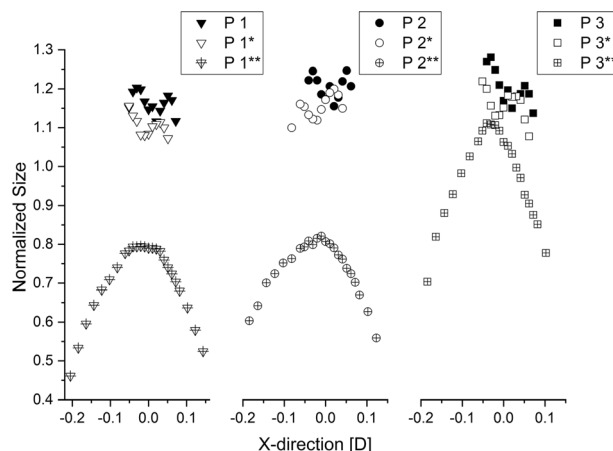


Fig.9 Comparison of sizes (particle size is the projected particle area), of the test particles (Fig. 8). The super scripts * and ** denote particles detected inside the tube with Min and Max Detection and none super script denote the free case with Min Detection. The normalized size is calculated with respect to each real size of the particles

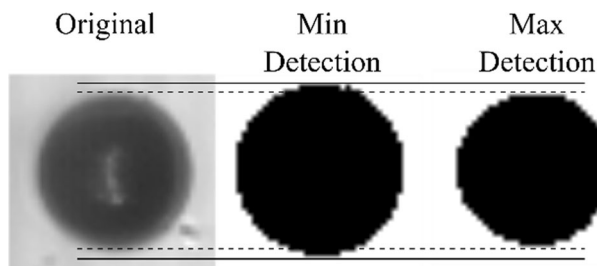


Fig.10 Measurement differences. Depending on the type of filter used, the apparent size of a given particle may differ substantially. This difference is clearly indicated by the continuous and dashed lines

manually, the corresponding uncertainty is of the same order of magnitude as the difference between the sizes measured with both filters. This indicates that the values produced by the filters fall within the uncertainty band of the manual measurement.

The mean and standard deviation values for the sizes and eccentricities of the selected particles are plotted in Fig. 11. It can be seen that the standard deviation of the average particle size corresponding to the Min Detection filter is relatively small in comparison with the one obtained with the Max Detection filter. On the other hand, the Min Deviation filter tends to preserve the size as it was mentioned above.

3.2 Example of use

The processes of interest in the present paper concern turbulent, compressible, solid-air flow in a long riser tube. The solid phase is constituted by a polydisperse granular material made of glass beads. Figure 12 illustrates a model representation of such system. The particle-laden flow takes place in a diluted regime.

These particles are advected by the air flowing inside an acrylic tube with the same characteristics mentioned before with an internal diameter. Furthermore, since the particles are distinguishable, PSTV renders a computed velocity field whose only sources of error are those associated with the pixel size, frame rate frequency, and effective volume.

The interactions taking place between the gas and the granular phase are of central importance to the investigation. Therefore, the depicted model constitutes the baseline concept of an experimental setup conceived to develop (and test) particle shadow tracking velocimetry (PSTV) for this particular flow. Figure 1b shows the optical setup.

A high-speed video of the solid particle flow was made. Figure 13 shows a schematic of the experimental apparatus. A particular trial point was selected to test the PSTV technique. For convenience, it was located 10 cm below the first measuring port.

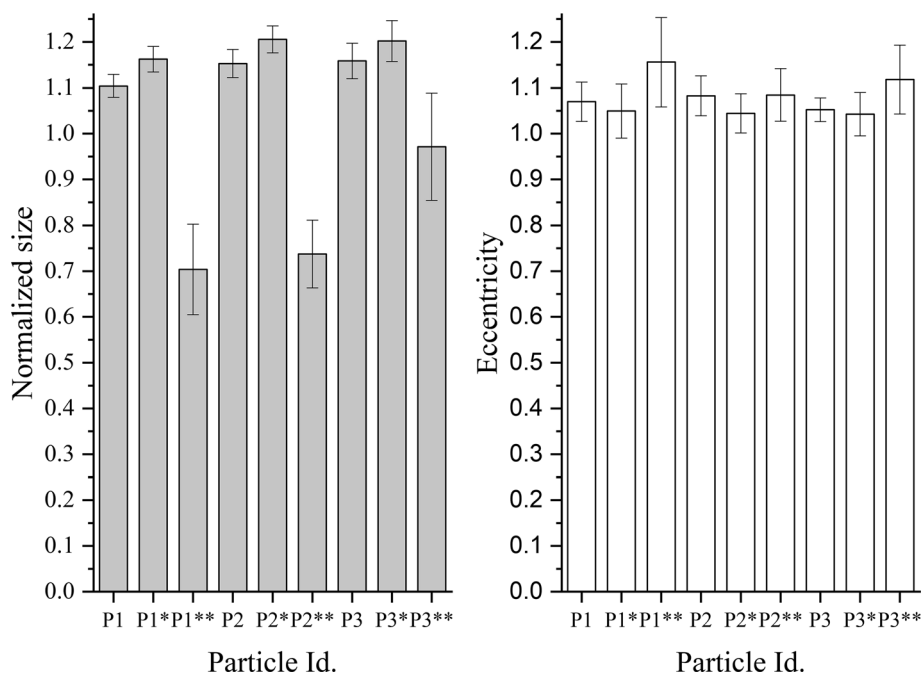


Fig.11 Particle sizes and eccentricities. The plot on the left depicts the mean sizes and their corresponding standard deviations for the test particles. The plot on the right provides the same information for the eccentricities

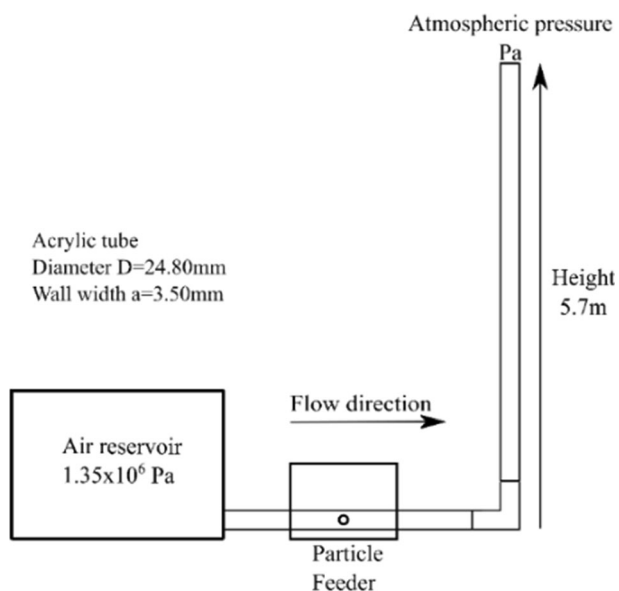


Fig.12 Gas–solid flow system

The optical system was mounted on a platform specially designed to keep the alignment between the camera, the light source and the tube, which was used also in the calibration process. The camera and the LED source were placed such that the focal plane was at the center of the tube. This optical system was capable of producing paired images with a 400 ns time separation, at a sampling frequency of 7200fps for a time lapse of 2.671 s. The details of the pulsed LED circuit design can be found in Echeverría (2015).

Dry air was drawn from a large storage tank connected to a compressor. The internal pressure was kept constant at 1.35×10^6 Pa. Once the flow of air attained a steady state, a predefined amount of solid particles were injected at the base of the pipe. The injection was carried out with a specially designed screw-feeder.

A method to determine the measurement volume

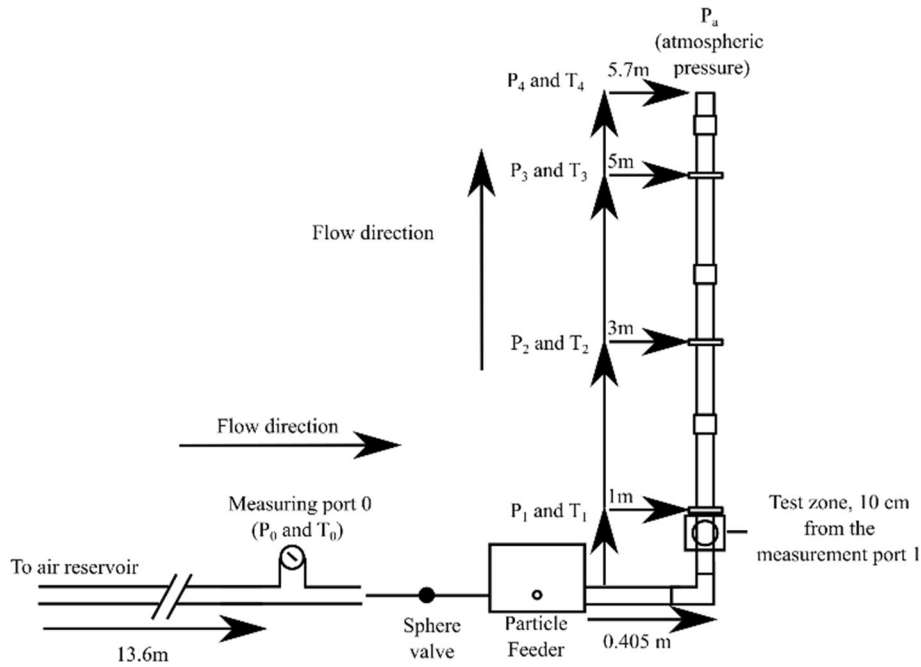


Fig.13 Experiment setup and optic measurement zone

The obtained results are condensed in Table 1. The corresponding effective sampling volumes yield two noticeably different correlated particles and mean velocities.

It is clear that the filters work correctly since for Min detection particles that are in planes away from the focal plane are removed, and for Max Detection more particles are detected (Fig. 14).

This result has a direct impact on the measured displacements and therefore in the velocities, as it is illustrated by the particle histograms obtained with each filter (Fig. 15). The average speeds obtained with Max Detection are greater than those obtained with Min Detection. We may stress the relevance of this result, because the expected velocity distribution would entail a higher dispersion. In turn, this means that lower speeds are due to the detection of smaller displacements of particles further apart from the lens (i.e., in

Table 1 Mean velocities, and found particles

Filter	Mean velocity (m/s)	Standard deviation (m/s)	Correlated particles
Min detection	127	24	524
Max detection	143	16	5420

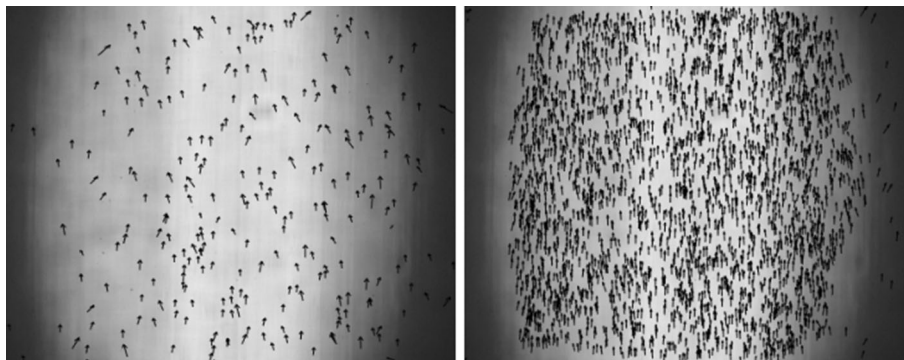


Fig.14 Velocity fields. The field shown on the left was obtained with the Min Detection filter, while the one on the right was obtained with the Max Detection filter

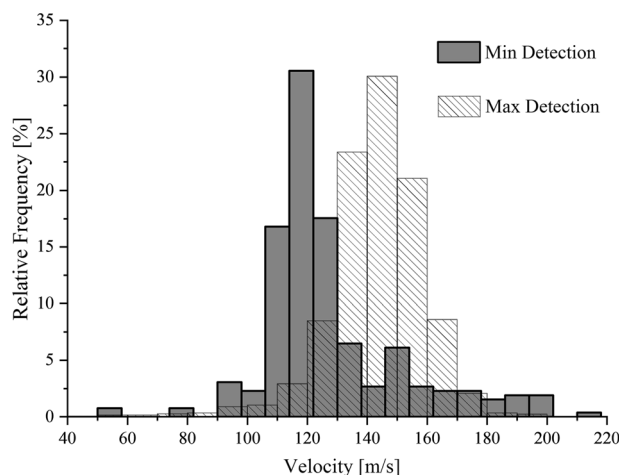


Fig.15 Speed distributions for Min and Max Detection filters. A total of 19,230 frames were processed

the negative x -direction), while higher speeds are due to larger displacements closer to the lens (i.e., in the positive x -direction). Such relative effects take place because a single scale, defined from an area within the focal plane, is used throughout. It is noted that the mean values remain essentially unaltered despite the widening of the distributions.

This kind of result may depend on the flow properties. In the present case, the measuring port was located 1 m downstream from a 90° elbow (Fig. 13). According to Schallert and Levy (2000), an elbow of this type would induce a high density distribution of particles near the wall closest to the camera (Fig. 16). Further downstream, the flow structure gradually disperses and mixes over the pipe's cross section due to turbulence and secondary flows.

Although this effect could, in principle, explain the velocities thus obtained, further experiments must be conducted in order to fully characterize the flow properties. In other words, a specialized study to determine the spatial distribution of the granular medium in the cross section along the pipe is required. Nevertheless, the result clearly emphasizes the importance of a reliable definition of the volume of study.

Figure 17a shows the histogram of the particle sizes detected with Min Detection compared with the original histogram of particle sizes. As shown, Min Detection shifts the histogram to larger sizes. However, the difference in sizes for all intervals is in average 0.0291 mm^2 . In figure (Fig. 17b), a displaced histogram shows that the only effect of the Min Detection filter is a shift in size distribution and not a size bias, as exposed by Castanet et al. (2013), when a single threshold value is used. In these case of study the size distribution is narrow so the problem of using one unique threshold those not miss detect smaller particles.

4 Conclusions

In this work, we present a methodology that allows the measurement of the volume of study inside a small tube, and due to the optics used, the result may be considered the same as the one that would be obtained for a volume of study in a free case.

The technique was successfully tested with a compressible, turbulent flow of air conveying a solid polydisperse granular phase in a diluted regime.

A methodology to determine the effective measurement distance was designed around the depth of detection (DOD) concept. This distance defines the volume in which the particles will be detected. For the case here discussed, the size of the minimum effective volume was determined by the area of the camera vision $\sim 6.688 \text{ mm} \times 6.336 \text{ mm}$ and $\text{DOD}_2^* = 10.14(3.55 \text{ mm})$. It is remarked that the determination of this effective volume is crucial to the correct implementation of any optical technique, and, in particular, for PSTV. In turn, the DOD directly depends on the digital process applied to the images, which was tested using two kinds of filters: Min and Max Detection.

As it was noted in the results section, inadequate filtering and DOD determination will certainly lead to erroneous measurements of the velocity field. This may be easily understood in the following terms: larger volumes imply a greater number of particles detected far away from the focal plane and, consequently,

A method to determine the measurement volume

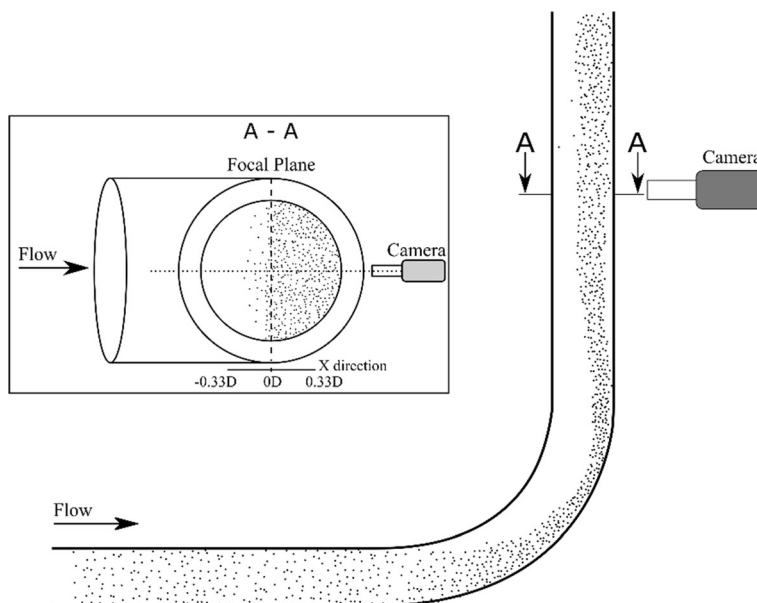


Fig. 16 Sketch of rope formed after 90° elbow. More particles are seen by the camera in the positive x-direction

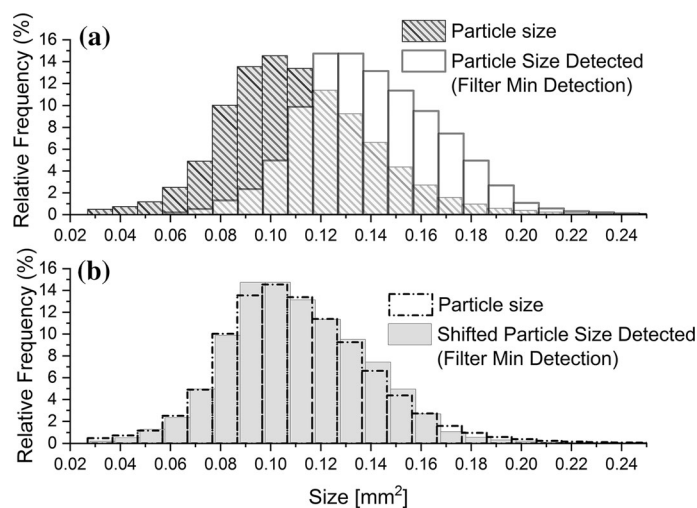


Fig.17 a Size histograms, comparison between detected sizes from video and size distributions. **b** Size histograms, comparison between shifted detected

smaller displacements are obtained for distant particles. Due to the characteristics of the flow produced in this study, more particles were detected near the lens and the obtained velocity estimates shifted toward higher values. Finally, it should be noted that the Min Detection filter merely shifts the distribution of sizes without introducing any bias. In aerosol research, for example, an observation of this kind may be relevant, although the technique must be tested with larger particle size distributions.

The results obtained are in agreement with manual measurements that would be impossible to achieve for thousands of images.

It is important to remark that PSTV allows the experimenter to measure the properties of individual particles, so a much more detailed analysis could be carried out. This kind of treatment is the basis of an ongoing investigation.

Acknowledgements This investigation was conducted at the Laboratorio de Flujos Multifásicos of the Instituto de Ingeniería (UNAM), and at the Taller de Hidrodinámica y Turbulencia of the Facultad de Ciencias (UNAM). The authors thank Jordi Esteveordal and Roberto Zenit for the helpful discussions, and the reviewer of this article for meaningful comments.

Funding This work was supported by Consejo Nacional de Ciencia y Tecnología (CONACYT) under Grant No. 429446.

Availability of data and material The data that support the findings of this study are available from the corresponding author upon reasonable request.

Compliance with ethical standards

Conflict of interest The authors declare that they have no conflict of interest.

Code availability Not applicable.

References

- Abràmoff MD, Magalhães PJ, Ram SJ (2004) Image processing with imageJ. *Biophoton Int* 11(7):36–41. <https://doi.org/10.1201/9781420005615.ax4>
- Adamczyk AA, Rimai L (1988) 2-Dimensional particle tracking velocimetry (PTV): technique and image processing algorithms. *Exp Fluids* 6(6):373–380. <https://doi.org/10.1007/BF00196482>
- Adrian RJ, Westerweel J (2011) Particle image velocimetry. Cambridge University Press, New York
- Ahmadi F, Ebrahimian M, Sanders RS, Ghaemi S (2019) Particle image and tracking velocimetry of solid-liquid turbulence in a horizontal channel flow. *Int J Multiph Flow* 112:83–99. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.12.007>
- Čapek M, Janáček J, Kubínová L (2006) Methods for Compensation of the light attenuation with depth of images captured by a confocal microscope. *Microscopy Res Tech* 69:624–635
- Castanet G, Dunand P, Caballina O, Lemoine F (2013) High-speed shadow imagery to characterize the size and velocity of the secondary droplets produced by drop impacts onto a heated surface. *Exp Fluids*. <https://doi.org/10.1007/s00348-013-1489-3>
- Cerqueira RFL, Paladino EE, Ynumaru BK, Maliska CR (2018) Image processing techniques for the measurement of two-phase bubbly pipe flows using particle image and tracking velocimetry (PIV/PTV). *Chem Eng Sci* 189:1–23. <https://doi.org/10.1016/j.ces.2018.05.029>
- Echeverría CA (2015) Implementación de la técnica Velocimetría por Sombras de Partículas (PSV) para el estudio de las interfaces de un flujo supersónico. Universidad Nacional Autónoma de México. <https://132.248.9.195/ptd2015/septiembre/0735148/Index.html>
- Estevadeordal J, Goss L (2005) PIV with LED: particle shadow velocimetry (PSV) technique. In: 43rd AIAA aerospace sciences meeting and exhibit. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp 1–10. <https://doi.org/10.2514/6.2005-37>
- Hagemeyer T, Roloff C, Bück A, Tsotsas E (2015) Estimation of particle dynamics in 2-D fluidized beds using particle tracking velocimetry. *Particuology* 22:39–51. <https://doi.org/10.1016/j.partic.2014.08.004>
- Hessenkemper H, Ziegenhein T (2018) Particle shadow velocimetry (PSV) in bubbly flows. *Int J Multiph Flow* 106:268–279. <https://doi.org/10.1016/j.ijmultiphaseflow.2018.04.015cle>
- Huck P, Machicoane N, Volk R (2017) A cost-efficient shadow particle tracking velocimetry setup suitable for tracking small objects in a large volume. *Procedia IUTAM* 20:175–182. <https://doi.org/10.1016/j.piutam.2017.03.024>
- ImageJ User Guide-IJ 1.46r | Image Menu. (n.d.). Retrieved December 12, 2019, from <https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/146-28.html>
- ImageJ User Guide-IJ 1.46r | Process Menu. (n.d.). Retrieved December 12, 2019, from <https://imagej.nih.gov/ij/docs/guide/146-29.html>
- Kashdan JT, Shrimpton JS, Whybrew A (2007) A digital image analysis technique for quantitative characterisation of high-speed sprays. *Opt Lasers Eng* 45(1):106–115. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2006.03.006>
- Michálek J, Čapek M, Kubínová L (2010) Biosignal 2010 application of morphology filters to compensation of lateral illumination inhomogeneities in confocal microscopy images. In: 20th International EURASIP conference (BIOSIGNAL). Brno, Czech Republic, pp 49–54. <https://hdl.handle.net/11104/0187897>
- Minov SV, Cointault F, Vangeyte J, Pieters JG, Nuytens D (2016) Spray droplet characterization from a single nozzle by high speed image analysis using an in-Focus droplet criterion. *Sensors (Switzerland)*. <https://doi.org/10.3390/s16020218>
- Raffel M, Willert CE, Wereley ST, Kompenhans J (2007) Particle image velocimetry. *Curr Sci*. <https://doi.org/10.1007/978-3-540-72308-0>
- Schallert R, Levy E (2000) Effect of a combination of two elbows on particle roping in pneumatic conveying. *Powder Technol* 107(3):226–233. [https://doi.org/10.1016/S0032-5910\(99\)00189-8](https://doi.org/10.1016/S0032-5910(99)00189-8)
- Truong C, Harris J, McPhail MJ (2018) The effect of out-of-plane shear within the depth of correlation in macroscopic planar particle shadow velocimetry. In: 2018 AIAA aerospace sciences meeting. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, pp 1–10. <https://doi.org/10.2514/6.2018-2035>
- Unser M (1999) Splines: a perfect fit for signal and image processing. *IEEE Signal Process Mag* 16(6):22–38
- Van Mieghem B, Ivens J, Van Bael A (2017) Benchmarking of depth of field for large out-of-plane deformations with single camera digital image correlation. *Opt Lasers Eng* 91(2016):134–143. <https://doi.org/10.1016/j.optlaseng.2016.11.019>

Publisher's Note Springer Nature remains neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations.

10.6. Apéndice 6

Código para el pulsado del LED el cual se programó en un microcontrolador MSP430G2553 se programó con el programa MPyEditor® 1.0.

```
# Función de interrupción para sincronizar el pulso de la cámara con el LED.
def toggle_led():
# La primera operación es reiniciar la bandera de interrupción para el puerto P1_3, para
# permitir una nueva interrupción.
wait_cycles(714)           # Función de retraso pulso cámara, unidades en
                           # ciclos de reloj
out(P1_6,1)                # Prende el LED
wait_cycles(1)
out(P1_6,0)                # Apaga el LED
wait_cycles(1)
out(P1_6,1)                # Prende el LED
wait_cycles(1)
out(P1_6,0)                # Apaga el LED
interrupt_clear(P1_3)

# Código principal
BCSCTL1 = CALBC1_16MHZ     # Se activa el reloj de 16 MHZ
DCOCTL = CALDCO_16MHZ
dirout(P1_6)               # Se indica como salida el puerto P1_6
dirinpu(P1_3)              # Se define el puerto 1.3 como entrada
interrupt_setup( P1_3, FALL, toggle_led) # Se configura el puerto P1_3 para ser activado
                                     # con una interrupción con transición de bajada
                                     # del pulso
eint()                     # Activa el swich de manera global.
```