



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE QUÍMICA

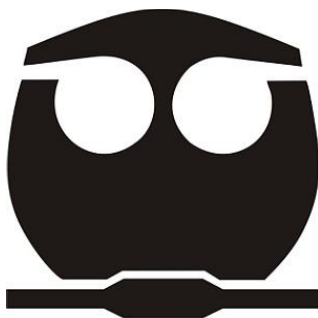
Estudio Hidrodinámico de un dispositivo
mezclador por vórtice mediante modelado
físico usando técnicas PIV

T E S I S

QUE PARA OBTENER EL TÍTULO DE:
INGENIERO QUÍMICO METALÚRGICO

P R E S E N T A:

CRISTIÁN GUADALUPE MALDONADO PINAL



MÉXICO D. F.

2015



Universidad Nacional
Autónoma de México



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. CARLOS GONZALEZ RIVERA
VOCAL: DR. MARCO AURELIO RAMIREZ ARGAEZ
SECRETARIO: M. EN I. ADRIÁN MANUEL AMARO VILLEDA
1ER SUPLENTE: M. EN I. AGUSTÍN GERARDO RUIZ TAMAYO
2DO SUPLENTE: M. EN M. EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO

LUGAR DONDE SE REALIZÓ LA TESIS:

DEPARTAMENTO DE INGENIERIA METALURGICA, FACULTAD DE QUÍMICA UNAM.

ASESOR DEL TEMA:

Dr. MARCO AURELIO RAMIREZ ARGAEZ

SUPERVISOR TÉCNICO:

M. en M. EUSEBIO CÁNDIDO ATLATENCO TLAPANCO

SUSTENTANTE:

CRISTIÁN GUADALUPE MALDONADO PINAL

Agradecimientos:

A la Universidad Nacional Autónoma de México cuyos principios son parte vital de la nación y de su futuro.

Al Dr. Marco Aurelio Ramírez Argáez, por el apoyo para concluir este trabajo.

Al M. en I. Agustín Gerardo Ruiz Tamayo, por el apoyo a lo largo de mi estancia en esta la máxima casa de estudios.

Al M. en M. Arturo Sánchez Santiago, por el apoyo concluir esta etapa de la vida.

Dedicatorias:

A mi Silvita:

Te quiero dar mi más humilde agradecimiento por estar ahí impulsándome a cada momento de la vida, espero estés orgullosa porque por eso he trabajado toda mi vida. Gracias.

A mi familia: hermanos, papá y sobrinos:

Julio Jair, Angélica, Gerardo, Papá, Jocelyn, Bruno, Daniel: Gracias.

A mis amigos

Yess, Miguel, Víctor, Roberto, Ariel, Itzel, Zule, Vickman, Adolfo, Jessica, Jacky y Ramses, Tlaca, Julio, Abril, Wiener, Juanito, Esperanza, gracias por compartir esos instantes de la vida alegres y de trabajo.

ÍNDICE

Página

	ÍNDICE.....	v
Capítulo 1	INTRODUCCIÓN.....	1
1.1	Antecedentes.....	1
1.1.1	Selección del dispositivo de mezclado.....	1
1.1.2	Velocimetría de partículas por imágenes.....	2
1.1.3	Propiedades de las partículas trazadoras y su movimiento en el fluido....	4
1.1.4	Fuente de iluminación.....	6
1.1.5	Imágenes y cámara.....	7
1.1.6	Procesamiento de imagen.....	7
1.1.7	Técnica estéreo PIV.....	9
1.2	Hipótesis.....	12
1.3	Objetivos.....	12
Capítulo 2	METODOLOGÍA DE TRABAJO	13
Capítulo 3	RESULTADOS Y DISCUSIÓN.....	19
3.1	Análisis resultados.....	30
Capítulo 4	Conclusiones.....	35
	Referencias.....	36

CAPÍTULO 1:

INTRODUCCIÓN

Desde el punto de vista tecnológico, la incorporación (fusión y disolución) de partículas sólidas en metales líquidos ha sido estudiada, dada su relevancia dentro de la cadena productora de piezas metálicas. Lograr un mezclado eficiente en metales líquidos determina la homogeneidad de éstos y la calidad de las piezas finales obtenidas, pero además debe garantizar el mejor aprovechamiento de los recursos económicos y tecnológicos de que se dispone. En este caso, las condiciones de operación y las características del equipo empleadas son determinantes para la optimización de tales procesos.

En este trabajo se realizó el estudio de la hidrodinámica mediante técnica estereo PIV (Particle Image Velocimetry) de tres modelos físicos de un dispositivo mezclador (tomado de la patente US 4191563) que usa un vórtice que se forma con la entrada tangencial de una corriente de fluido a alta velocidad. Se obtuvieron los patrones de flujo que se desarrollan durante la operación de los modelos, los cuales consisten en mapas vectoriales del campo de velocidad en 3D; además, se hace una descripción detallada del tamaño y forma de los vórtices, ya que estos influyen directamente en el proceso de mezclado.

La selección de las variables de diseño óptimas para el dispositivo se hizo previamente mediante el modelo matemático que describe el flujo dentro del mezclador, resuelto con un software comercial CFD (computational fluid dynamics) ANSYS FLUENT 14.5. La eficiencia de los reactores, también fue evaluada directamente y en un trabajo previo, en los modelos físicos a partir de curvas RTD (resident time distribution).

Comparando los resultados que se presentan en este trabajo con los estudios mencionados, se validó el modelo matemático con la modelación física del dispositivo mezclador y se obtuvo la descripción completa de la anatomía de flujo variando el diseño del dispositivo y variando el flujo de agua mediante el uso de un equipo PIV 3D.

1.1 Antecedentes

1.1.1 Selección del dispositivo mezclador

Tomado de la patente US 4191563 el dispositivo consiste en un cuerpo cilíndrico refractario que tiene una cámara de mezcla en forma de embudo con una entrada tangencial y un cilindro posicionado en la parte inferior de la base

truncocónica. La corriente de metal líquido se introduce de manera tangencial con el fin de que las paredes cilíndricas promuevan la formación del vórtice, lo que coadyuva a producir un flujo turbulento dentro de la cámara (Figura 1).

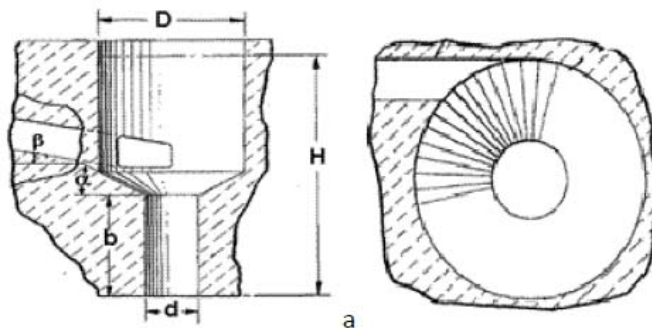


Figura 1. Dispositivo mezclador seleccionado y sus principales características geométricas. a) Vista lateral, b) Vista superior. D =diámetro del dispositivo, α =ángulo troncocónico, β =ángulo de entrada, d =diámetro salida, H = altura dispositivo, b =altura tubo salida.

Las variables de diseño y operación que afectan en mayor medida al funcionamiento, debido a que influyen directamente en el tiempo de residencia del soluto, la turbulencia y el tamaño y forma del vórtice dentro de la cámara de reacción son: diámetro de la cámara del reactor (D), diámetro del ducto de salida (d), altura (h) y ángulo de inclinación (β) de la entrada, ángulo de la base (α) que conecta la cámara con el ducto de salida, la presencia de deflectores y, finalmente, el flujo volumétrico (Q) a la entrada del reactor.

De acuerdo a trabajos previos [1,2], el mezclado óptimo se logra utilizando diámetros del dispositivo grandes, ángulos de la sección troncocónica bajos y ángulos de entrada de metal altos; respecto al flujo de entrada de metal líquido, este se debe ajustar a las necesidades de producción, considerando que el flujo volumétrico a la entrada debe resultar en un número de Reynolds tal que garantice la turbulencia del sistema.

A partir de estos resultados, se construyeron los modelos físicos del dispositivo mezclador, que se utilizan en este estudio.

1.1.2 Velocimetría de partículas por imágenes (PIV)

- Principios.

Velocimetría de partículas por imágenes (PIV por sus siglas en inglés *particle image velocimetry*) es un método óptico de visualización de fluidos que permite obtener información sobre la velocidad en una región de interés en sólo una fracción de segundo. El líquido se siembra con partículas trazadoras que deben ser arrastradas por el fluido y su movimiento se registra para calcular el campo de velocidad.

El principio de PIV se basa en la medición del desplazamiento de partículas trazadoras, que son lo suficientemente pequeñas para seguir el movimiento del fluido sin perturbarlo. Las partículas se iluminan con una pantalla delgada de luz láser y la luz dispersada por ellas se registra en cuadros de imágenes subsecuentes a un intervalo de tiempo conocido. Actualmente, las cámaras CCD (Dispositivo de carga acoplada), se utilizan para tal propósito. Con una sola cámara es posible obtener únicamente dos componentes de la velocidad (2D) de una partícula dada en el plano de medición. Para determinar las tres componentes de la velocidad (3D) es necesario implementar imágenes estereoscópicas [3]. Los esquemas del sistema típico de PIV para tomas 2D y 3D se muestran en las Figuras 2 y 3, en las cuales se muestra de manera esquemática el arreglo de cámaras y de luz láser en cada caso.

Para el procesamiento de datos, la imagen de la cámara se divide en ($M \times N$ píxeles) áreas de interrogación. Cada una de estas regiones se correlaciona (de cuadro_1 \rightarrow cuadro_2) para producir un vector de desplazamiento promedio de partículas. Al repetir la correlación cruzada en todas las áreas de interrogación se genera un mapa correlacionado vectorial (de los desplazamientos promedios de las partículas en cada área de interrogación). *La transformación de los desplazamientos registrados en la cámara (en píxeles) a las dimensiones físicas del modelo (en mm) y la división entre el intervalo de tiempo (en segundos) de los dos cuadros de imágenes, permite convertir los vectores de desplazamiento en un mapa de vectores de velocidad.* En la Figura 4 se muestra el esquema básico del procesamiento de datos descrito.

Posteriormente, diversos algoritmos de validación se pueden aplicar a estos vectores de velocidad para detectar vectores erróneos, retirarlos y posiblemente modificarlos de acuerdo a diversos enfoques numéricos, para mejorar la calidad del resultado PIV. El análisis de PIV típicamente genera 10^3 - 10^5 mediciones de velocidad por imagen (dependiendo del formato de la imagen y del área de interrogación, que restringen la resolución espacial y el rango de velocidad dinámico) con una precisión del 1% [3].

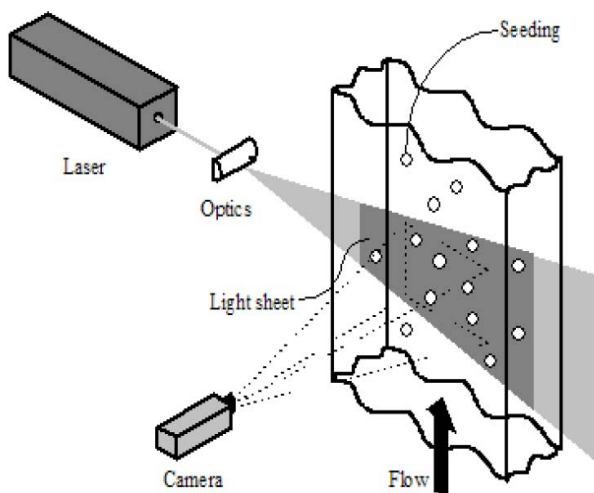


Figura 2. Esquema del sistema típico empleado para mediciones PIV en 2D.

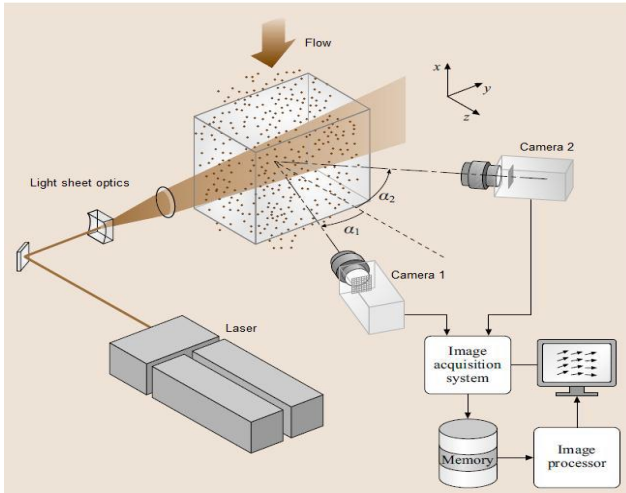
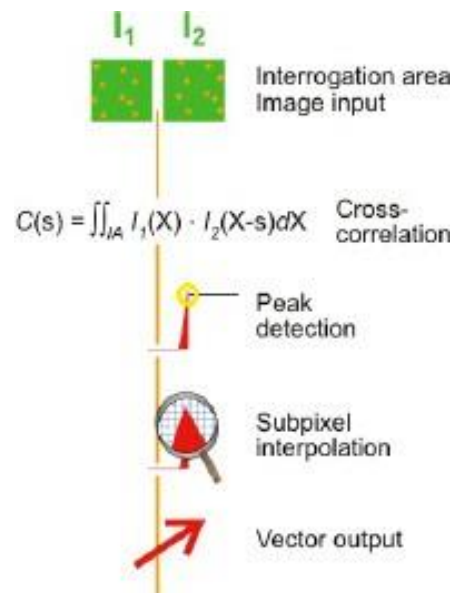


Figura 3. Esquema del sistema típico empleado en mediciones de PIV estereoscópico.

Figura 4. Esquema de la secuencia de procesamiento de las imágenes.

Las zonas de interrogación de cada cuadro de imagen, I_1 y I_2 , se correlacionan entre sí, pixel por pixel, produciendo un pico de señal, identificado como el desplazamiento de partículas. Una medida exacta del desplazamiento, y por lo tanto también la velocidad, se consigue con la interpolación subpíxel.



1.1.3 Propiedades de las partículas trazadoras y su movimiento en el fluido.

Es claro que el principio de la técnica de PIV se trata de la determinación de las dos magnitudes fundamentales para el cálculo de la velocidad, es decir, las diferenciales tanto del tiempo como de la distancia. Sin embargo, la medición es indirecta, dado que se determina la velocidad de las partículas en lugar de la velocidad del fluido. Por lo tanto, las propiedades físicas de las partículas deben de estudiarse con el objeto de evitar que existan diferencias significativas entre su movimiento y el movimiento del fluido. Se ha asegurado que las partículas trazadoras neutralmente boyantes siguen con precisión el flujo [4].

Además, debe considerarse el comportamiento de dispersión de luz que presenten las partículas. Este aspecto, sumado a que las partículas deben ser lo más

pequeñas posible, conlleva a una complicación: partículas muy pequeñas generan menos distorsión del flujo que partículas grandes, mientras que partículas grandes dispersan la luz más eficientemente [4,5].

Dado que la intensidad de las imágenes de partículas y, por ende, el contraste de los cuadros utilizados en PIV, son directamente proporcionales a la intensidad de luz dispersada, es común que resulte más efectivo y económico incrementar la intensidad de la imagen mediante una adecuada selección del tamaño de partículas dispersantes, en lugar de aumentar la potencia de la luz láser.

La luz dispersada por las partículas es una función de la relación entre el índice de refracción de las partículas en el medio circundante, el tamaño de partícula, su forma y orientación. La dispersión también depende de la polarización de la luz y el ángulo de observación. Dado el índice de refracción del agua, deben utilizarse partículas relativamente grandes, lo cual es aceptable dado que es fácil empatar las densidades de las partículas y el líquido. En la mayoría de los experimentos se desea que las partículas de siembra sean no tóxicas, no corrosivas, no abrasivas, no volátiles y químicamente inertes. Una amplia variedad de materiales que cumplan tales características están disponibles. Ejemplos de partículas de siembra y sus propiedades para líquidos se muestran en la Tabla 1.

Tabla 1. Especificaciones de partículas trazadoras para PIV en fluidos líquidos.

	PSP Polymid Seeding Particles	HGS Hollow Glass Spheres	S-HGS Silver Coated Hollow Glass Spheres	FPP Fluorecent Polymer Particles
Mean diameter (μm)				
Size distribution	1-10 μm 5-35 μm 30-70 μm	2-20 μm	2-20 μm	1-20 μm 20-40 μm 50-100 μm
Particle shape	Non-spherical but round	spherical	spherical	spherical
Density (g/cm^3)	1.03	1.1	1.4	1.5
Melting point ($^{\circ}\text{C}$)	175	740	740	250
Refractive index	1.5	1.52	-	1.68
Material	Polymide 12	Borosilicate glass	Borosilicate glass	Melamine resin based polymer

Las partículas también pueden recubrirse con un metal (por ejemplo, plata) o colorante fluorescente (por ejemplo, rodamina), con el objetivo de mejorar su capacidad dispersante.

El colorante absorbe la luz que incide y vuelve a emitirla en longitudes de onda más largas. Por ejemplo, cuando luz verde (527nm) de un láser ilumina partículas cubiertas de rodamina, las partículas no sólo dispersan la luz del láser, sino que también emiten luz en un rango de onda mayor (550-680nm) con coloraciones

entre naranja y rojo. Existen filtros ópticos que hacen posible separar la luz emitida por las partículas trazadoras de la dispersión proveniente de otros cuerpos, tales como paredes, burbujas, gotas y otras partículas mediante el bloqueo de la luz con longitud de onda igual a la incidente y permitiendo el paso de la fluorescente [3].

Cabe mencionar que, una concentración óptima de partículas dispersantes es la parte más difícil en los experimentos de PIV, pero una vez que el fluido se siembra de manera uniforme con la concentración correcta, el experimento tiene una alta probabilidad de éxito. La mejor práctica es aumentar la concentración de siembra desde un nivel bajo hasta que se alcanza la deseada. Como regla general, de 10 a 25 imágenes de partículas deben ser vistas en cada área de interrogación. [6].

1.1.4 Fuente de iluminación.

El principio de medición de PIV se basa en el tiempo de observación finito utilizado para detectar el movimiento de las partículas. Las partículas deben ser iluminadas y observadas dos veces con una separación de tiempo entre las observaciones. Hay tres requisitos principales para que la fuente de luz sea adecuada en experimentos PIV:

- I. La corta duración de la iluminación. El criterio práctico para la elección de la duración máxima de la iluminación es que las imágenes de partículas no aparezcan como rayas sino más bien como puntos circulares en las imágenes;
- II. La distribución de partículas iluminadas dentro de la delgada hoja de luz debe ser tal que permita obtener imágenes en foco. Su posición en profundidad está dictada por el espesor de hoja de luz;
- III. La intensidad de la luz debe permitir que la luz dispersada por las partículas sea detectada por los dispositivos digitales de imágenes.

Es común utilizar láseres como fuentes de iluminación, ya que pueden producir un haz de luz pulsado y monocromático que pueden fácilmente deformarse como una hoja delgada. La energía de pulso requerida, es proporcional a las dimensiones lineales de la zona de interés. Típicamente, un pulso de 10mJ es suficiente para iluminar un plano cuadrado de 20cm de longitud lateral en flujos de agua. El dispositivo más común usado en los experimentos de PIV es el láser de Neodimio-Yag de doble frecuencia ($\lambda = 1064 \text{ nm}$ y $\lambda = 532 \text{ nm}$), que por lo general puede producir energías que van desde 10mJ hasta 1J con duración muy corta por pulso (5... 15 ns) [4].

La doble cavidad de los láseres Nd: YLF permite lograr pulsos en intervalos cada vez más cortos (hasta 1KHz) manteniendo una alta potencia, necesaria para visualización de flujos de agua [4].

1.1.5 Imágenes y cámara.

Una imagen de las partículas trazadoras en la hoja de luz se forma usando una lente delante del sensor de imagen. Hoy en día, se utiliza generalmente una cámara digital con sensor CCD o CMOS.

Al igual que con cualquier otro dispositivo electrónico, los sensores de imágenes digitales están sujetos a ruido electrónico. En caso de PIV, la luz dispersada por las partículas pequeñas idealmente debe ser capturada sobre un fondo de contraste negro. Debido a la limitada eficiencia de dispersión de luz de partículas pequeñas, la señal registrada a veces supera sólo ligeramente el nivel de ruido del fondo, lo que produce que la toma de partículas muy pequeñas siempre tenga altos niveles de ruido electrónico.

La principal fuente de ruido es el efecto térmico, que genera perturbaciones en los sensores de imagen que no se pueden distinguir de las generadas por la dispersión de la luz láser. La segunda fuente de ruido, es el ruido de disparo que es una consecuencia directa de la conversión de carga a tensión durante la secuencia de lectura (que se incrementa con la frecuencia de lectura). Una optimización cuidadosa de conversión electrónica, la reducción de la frecuencia de lectura, así como la refrigeración del sensor, puede limitar el ruido por píxel [3].

Las cámaras Speed Sense, utilizadas frecuentemente en aplicaciones PIV, permiten mediciones con alta *resolución de tiempo* en áreas muy grandes [4].

1.1.6 Procesamiento de imagen.

En principio, se requiere una alta densidad de datos en los mapas de vectores de PIV, especialmente cuando se pretende la comparación de los datos experimentales con los resultados de los cálculos numéricos. Esto requiere concentración media de las partículas trazadoras en las imágenes capturadas. Tal nivel de concentración se caracteriza por el hecho de que los pares coincidentes de las imágenes de partículas deben utilizar análisis estadísticos [3].

El principal objetivo de la evaluación estadística es determinar el desplazamiento entre dos patrones de imágenes de partículas, registradas como distribuciones 2D de escalas de grises. Esto se logra mediante la extracción de pequeñas áreas de interrogación y sus análisis sistemáticos.

En el procesamiento, la primera imagen será considerada como la entrada del sistema, cuya salida produce la segunda imagen del par capturado, como se muestra en el diagrama de la Figura 5. La función de transformación del sistema (función de desplazamiento y filtro de ruido adicional), convierte la imagen de entrada a la imagen de salida.

La función de interés es el cambio dado por el vector d , ya que este es la expresión del desplazamiento de partículas de una imagen a otra. Si la función es conocida, cada imagen siguiente puede ser calculada a partir de la anterior. En este caso, ambas imágenes I e I' son conocidas, por lo tanto, el objetivo es estimar el desplazamiento.

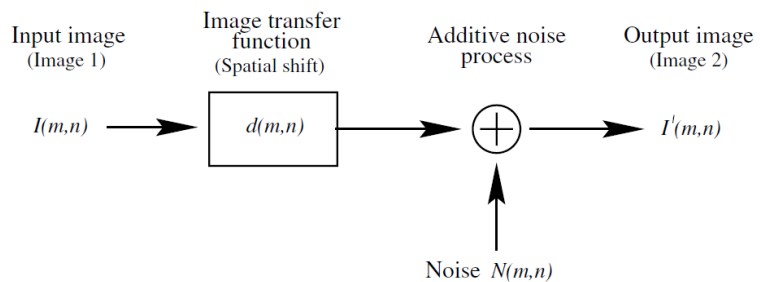
Debido a que la señal no es continua, se hace necesario estimar el desplazamiento d usando una aproximación estadística que se basa en la delimitación de áreas de interrogación.

La mejor relación entre las imágenes es encontrada utilizando una función de correlación cruzada discreta (Formula 1)

$$R_{II}(x, y) = \sum_{i=-K}^K \sum_{j=-L}^L I(i, j) I'(i + x, j + y), \quad (1)$$

Donde las variables I e I' son muestras (por ejemplo, matrices de valores de intensidad) extraídas de las imágenes, donde I' es mayor al arreglo I . La plantilla de I es linealmente desplazada dentro de la muestra I' sin que se pasen los límites. Para cada elección de desplazamiento de la muestra (x, y) , la suma de la suma de los productos de todas las intensidades de los píxeles superpuestos produce un valor de correlación cruzada $R_{II}(x, y)$. Mediante la aplicación de esta operación para todo el dominio, se forma un plano de correlación, como se muestra en la Figura 6. El valor más alto en el plano de correlación se utiliza como una estimación directa del desplazamiento de la imagen de la partícula. Usando el tiempo conocido entre las dos grabaciones de PIV y el desplazamiento de partículas por imágenes, se puede calcular la velocidad [7].

Figura 5. Procesamiento digital ideal, que describe la relación funcional de los cuadros de imágenes capturados.



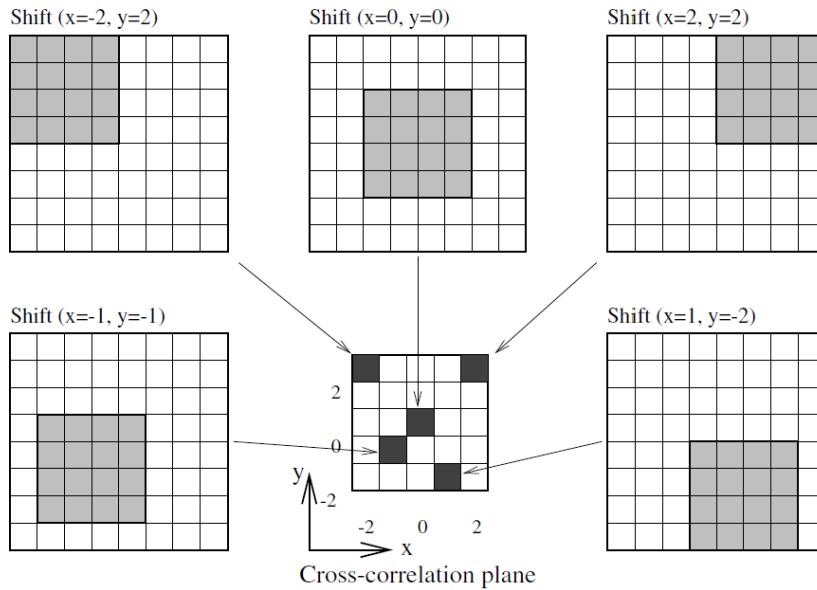


Figura 6. Formación del plano de correlación por correlación cruzada directa. Aquí, una plantilla de 4×4 píxeles se correlaciona con una muestra de 8×8 .

1.1.7 Técnica estéreo PIV

PIV estéreo es un método para la medición de tres componentes de la velocidad en un plano (2D3C), basado en el principio de paralaje. Mediante la colocación de dos cámaras de manera que cada una observe el plano-hoja luz desde dos ángulos diferentes, se obtienen mapas vectoriales 2D de la velocidad del mismo objeto, pero diferentes debido al efecto del paralaje. Las diferencias entre los dos mapas se calculan y derivan en el tercer componente de la velocidad, que está fuera del plano de la hoja de luz láser, en función de la configuración geométrica del montaje de las cámaras (Figura 7).

Se debe realizar un ajuste preciso del ángulo entre el sensor CCD (o CMOS) y la lente de la cámara con el fin de enfocar correctamente. Para ello, la llamada condición Scheimpflug debe cumplirse, que permite tener en foco planos que no son paralelos a la imagen. En tal montaje se consigue que tanto el plano del objeto como el plano de la lente y de la imagen (sensor) se corten en un mismo punto, permitiendo que todo el plano del objeto este en foco. Por lo tanto, enfocar fuera del plano de la cámara requiere una ligera inclinación del sensor, que se refiere al ajuste del ángulo entre éste y la lente de la cámara. En la Figura 8 se muestra un esquema de la manera en que se registra la geometría del objeto gracias al montaje Scheimpflug.

La evaluación estereoscópica requiere un algoritmo numérico, que describa como los objetos en el espacio están siendo mapeados en cada cámara. Los parámetros de este algoritmo se determinan a través de la calibración del equipo.

La tarjeta de calibración tiene puntos ubicados en posiciones conocidas, que se comparan con posiciones en la imagen, para obtener la resolución espacial de las partículas. Las tarjetas de calibración deben de capturarse por ambas cámaras (Figura 9) con una delicada iluminación, que permita generar el contraste óptimo para la ubicación del punto de origen. A partir de la perspectiva de cada cámara, se calculan los parámetros intrínsecos (longitud focal, punto principal, el parámetro de distorsión) y su respectiva orientación; la identificación exacta de estos parámetros logra mediciones de calidad.

Como se aprecia en la Figura 9, las cámaras no logran observar la tarjeta completa debido a la distorsión de la perspectiva, sino que abarcan una sección tipo trapecoide de ésta. La evaluación de estéreo PIV es posible solo en el área de la tarjeta que comparten las dos cámaras, es decir, en el área traslapada de los dos trapecios. Cuando se visualiza el flujo, el área de estudio corresponde al área de traslape entre ambos cuadros, que capturan solo una parte de la cortina de luz láser en el área de interés. Es decir la reconstrucción estereoscópica sólo se hace dentro del área de traslape (Figura 10). La forma en que se consigue maximizar esta área de traslape es mediante un alineación cuidadosa de la cortina láser con la arista de la tarjeta durante la calibración. Además, es necesario colocar la tarjeta alineada sobre la arista con la hoja de luz láser, ya que de ello depende que las partículas distribuidas en el ancho de la hoja de luz (4mm) estén en foco durante las mediciones.

Finalmente, se debe construir la malla de interrogación, que define por completo la *resolución espacial* de la medición, que es función del tamaño de la imagen (en pixeles), tamaño del área de interrogación y el traslape que se proponga entre las área de interrogación.

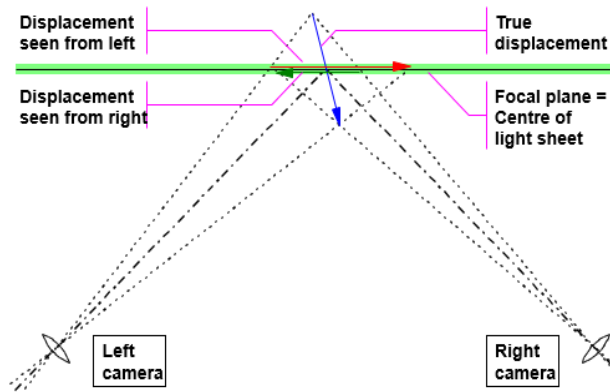


Figura 7. Fundamentos de la visión estereoscópica. El desplazamiento en 3D ($\Delta X, \Delta Y, \Delta Z$) se estima a partir de los desplazamientos 2D ($\Delta X, \Delta Y$) capturados independientemente en cada cámara.

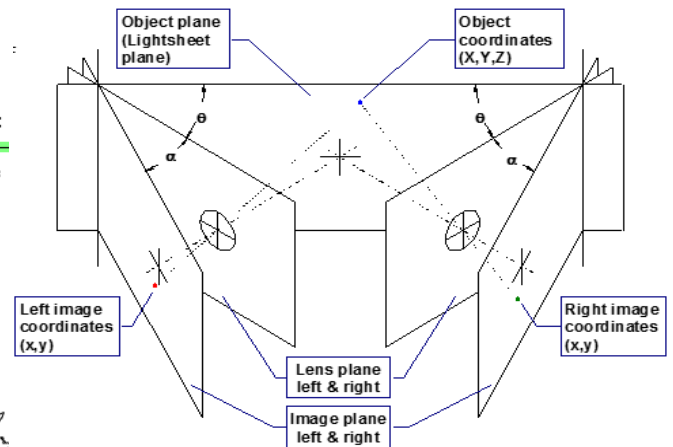


Figura 8. Condición Scheimflug del montaje para mediciones de estereo PIV. Donde θ es el ángulo entre objeto y lente, y α es el ángulo entre imagen (sensor) y lente.

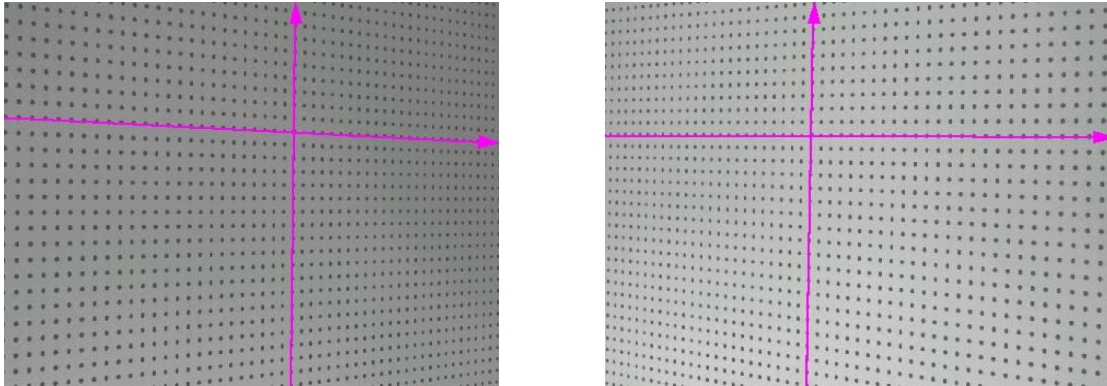


Figura 9. Imágenes de la tarjeta de calibración, tomadas simultáneamente por las cámaras derecha e izquierda. Sobre cada imagen se presenta un plano cartesiano 2D cuyo origen está ubicado en el centro de la tarjeta. La rutina de calibración de cámaras mide y dan cuenta de la distorsión de perspectiva que surge de la orientación sesgada de las cámaras.

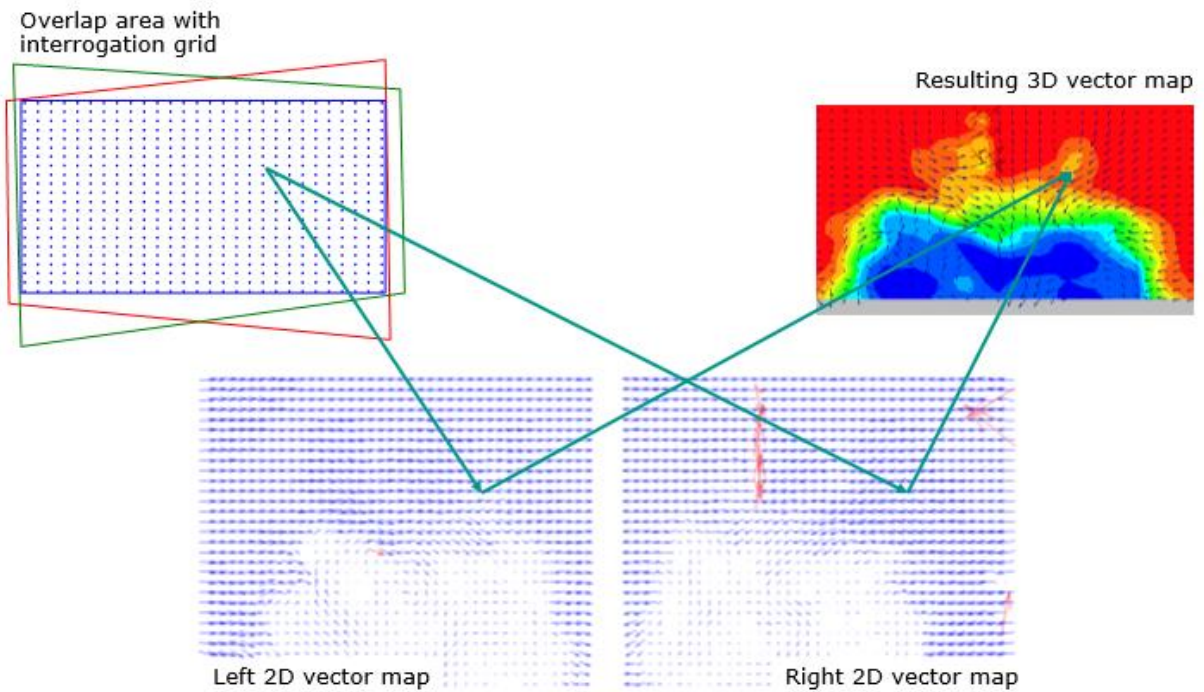


Figura 10. Esquema de la reconstrucción estereoscópica. Se producen mapas de vectores 2D que representan la visión de una cámara. Ambos mapas se ensamblan en el área de visión compartida, donde se genera la malla de interrogación. Es en esta región donde se calcula el tercer componente de velocidad del sistema.

1.2 Hipótesis

La técnica estéreo PIV sería factible para la visualización del fluido dentro de un dispositivo tipo vórtice de aleación rápida en operación, lo que permitiría obtener el patrón de flujo y campo de velocidades del mismo, describiendo la hidrodinámica del sistema.

De este modo, las mediciones estéreo PIV servirían para estimar la eficiencia del dispositivo, dado que la hidrodinámica del sistema indica la habilidad de éste a fabricar aleaciones de manera rápida.

La forma y tamaño del vórtice desarrollado dependen directamente del flujo volumétrico que ingresa a la cámara, por tanto, se observaría una modificación de la estructura del mismo variando los niveles de flujo a la entrada.

Se espera que el dispositivo con fondo troncocónico presente el patrón de flujo y estructura de vórtice que se asocian al mezclado más eficiente del dispositivo, lo que validaría el modelo matemático que describe el comportamiento del fluido en el dispositivo.

1.3 Objetivos

Estudiar la hidrodinámica en un dispositivo de aleación rápida a través de la visualización del fluido con un modelo físico transparente y usando la técnica estéreo PIV:

- Determinar los patrones de flujo en 3D.
- Resolver el campo de velocidades en el sistema.
- Caracterizar la forma y tamaño del vórtice.

CAPÍTULO 2:

METODOLOGÍA DE TRABAJO

El objetivo del trabajo experimental fue la visualización del movimiento del fluido dentro de los tres modelos físicos durante su operación, a partir de la cual se obtuvo la información de los patrones de flujo y campo de velocidades.

Las características geométricas de los modelos utilizados se resumen en la Tabla 2. Cada modelo está a escala completa (1:1) con el prototipo del dispositivo y cumple con criterios de similitud estrictos, los cuales se presentan en la Tabla 3.

Dispositivo	Diámetro del dispositivo (D) en cm	Ángulo troncocónico (α) en °	Ángulo entrada (β) en °
A	30	15	45
B	30	0	45
C	30	0	45 (con altura de ingreso aumentada con respecto a la base)

Tabla 2. Características geométricas de los dispositivos propuestos.

Tabla 3. Criterios de similitud empleados para la construcción de los modelos

Dispositivo/Similitud	Geométrica	Cinemática	Dinámica
Prototipo real	1:1 (modelo a escala completa)	$1.062 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (hierro líquido a 1200°C)	$\text{Re}=5.56 \times 10^4$
Modelo físico		$1 \times 10^{-6} \text{ m}^2/\text{s}$ (agua)	$\text{Re}=5.56 \times 10^4$

físicos de los dispositivos bajo estudio.

El diseño final del modelo C (Tabla 4) se muestra en la Figura 11. Los modelos A y B son variantes del modelo C, dado que en la práctica es mucho más sencillo fabricar la base plana. Además, el dispositivo A tiene la entrada tangencial a una altura mayor desde la base.

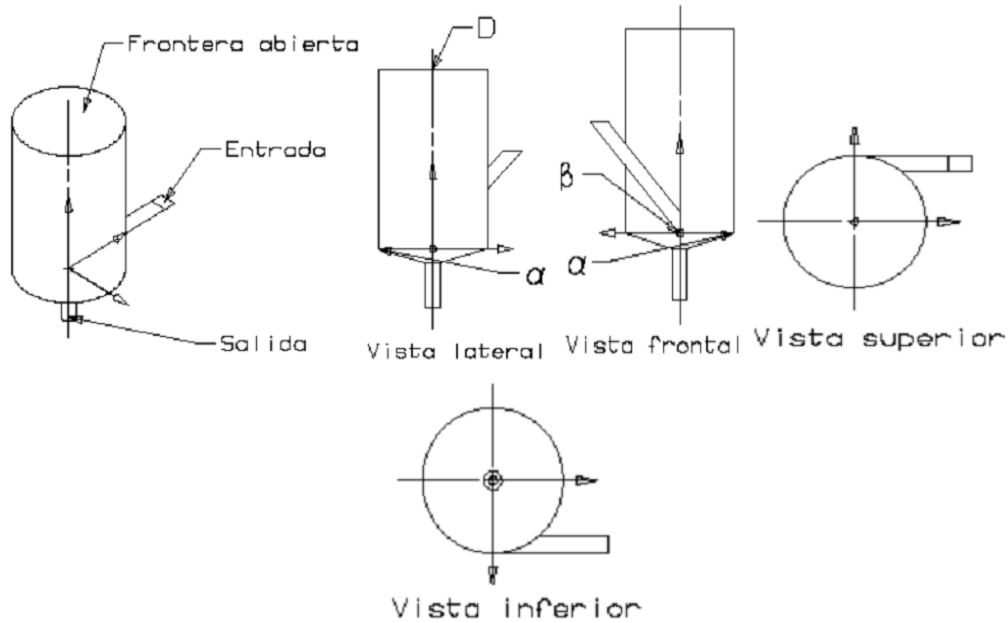


Figura 11. Diseño final de un dispositivo sin barrera (D =Diámetro del dispositivo, β =Ángulo de la entrada y α =Ángulo de la sección troncocónica).

Para hacer un análisis óptimo de las variables de diseño de los tres modelos de estudio, se realizó un diseño factorial 3K que busca comportamientos no lineales en la variable respuesta, extrayendo la mayor cantidad de información con la menor cantidad de recursos [8]. En este caso, se utilizaron tres valores de flujo volumétrico a la entrada, que en conjunto con las diferencias geométricas de cada modelo, constituyen los factores variables del arreglo experimental. La matriz experimental se muestra en la Tabla 4.

Para la caracterización del tamaño y forma de los vórtices, se tomaron fotografías de cada modelo en operación después de 20 segundos de iniciada la circulación de líquido. La técnica empleada en la medición de los vórtices consiste en el trazado de conos sucesivos desde la parte más alta y con el máximo diámetro, hacía la región más angosta, cerca de la base del modelo, sobre una imagen del vórtice. Los triángulos se traslapan uno sobre otro, con el objetivo de abarcar toda el área posible. El volumen de cada cono se suma para obtener el volumen final del vórtice, y los traslapes se restan del total.

Obteniendo la escala que relaciona la imagen sobre la cual se está evaluando el volumen del vórtice y el dispositivo real, se van transformando las dimensiones de cada cono en la imagen, a la estructura real y, de este modo, el volumen calculado corresponde al volumen real del vórtice dentro del modelo físico, de una manera bastante aproximada.

Tabla 4. Matriz experimental: diseño factorial 3k.

No.	FLUJO (LPM)	DISPOSITIVO
1	40	Base plana y entrada a 5cm desde el fondo [A].
2	50	Base plana y entrada a 5cm desde el fondo [A].
3	60	Base plana y entrada a 5cm desde el fondo [A].
4	40	Base plana y entrada a 20cm desde el fondo [B].
5	50	Base plana y entrada a 20cm desde el fondo [B].
6	60	Base plana y entrada a 20cm desde el fondo [B].
7	40	Con sección troncocónica y entrada a 5cm desde el fondo [C].
8	50	Con sección troncocónica y entrada a 5cm desde el fondo [C].
9	60	Con sección troncocónica y entrada a 5cm desde el fondo [C].

Para el estudio de la hidrodinámica del sistema se visualizaron los planos paralelos y perpendiculares al eje simétrico de la entrada de fluido (planos que cortan en la vista superior e inferior de la Figura 11) en cada modelo físico, repitiendo las condiciones experimentales descritas en la Tabla 4, por lo que al final se obtuvo un total de 18 pruebas.

Los planos elegidos se localizan un centímetro desplazados del centro, ya que la generación del vórtice prominente ocasiona que en el plano central, la hoja de luz láser se disipe al atravesar la segunda fase (aire contenido en el vórtice), por lo que los niveles de ruido se elevan y hacen imposible el procesamiento numérico de los datos.

Al desplazarse un centímetro del centro, la sección que corta el vórtice por la hoja de luz láser disminuye y se puede extraer información numérica de al menos una parte del campo visualizado, que corresponde a la primer mitad del plano (antes de que se atravesase el vórtice).

Asumiendo que la configuración geométrica de los modelos, permite esperar cierta simetría de los patrones de flujo, teniendo como eje simétrico al vórtice, la información extraída de la mitad de los planos visualizados puede servir para estimar el comportamiento completo del sistema. Solo cabe considerar, que las secciones analizadas de cada plano corresponden a la mitad donde se localiza el inlet del dispositivo, por lo que, específicamente a la altura de la entrada, la turbulencia es considerablemente mayor respecto a la otra mitad del mismo plano.

La manera en que se elimina la información de la mitad descartada para el procesamiento de datos es mediante máscaras, que consisten en figuras rectangulares que cubren una porción específica de la imagen.

Para lograr la reproducción de cada plano, se realizó un mapeo con tres mediciones PIV desde la base del dispositivo hacia la altura máxima del líquido, debido a que el área que abarcan las cámaras posicionadas a un metro de distancia del modelo físico, solo sirven para analizar una tercera parte de la altura, así, sucesivas elevaciones tanto de la cabeza láser, como de las cámaras, fueron necesarias para recorrer cada plano longitudinalmente.

Antes de iniciar las mediciones en cada plano, se realizó una calibración meticulosa cuyo objetivo es registrar los parámetros numéricos para obtener la posición espacial de las partículas en la imagen. Para tal propósito se empleó una tarjeta con puntos marcadores de 200mm X 200mm como la que se muestra en la Figura 9, iluminada por lámparas independientes (Figura 11), para generar el contraste necesario en las imágenes. La tarjeta se colocaba, tal que la superficie quedará exactamente en el plano de interés dentro de cada modelo, cuidando que la hoja de luz láser estuviera alineada en el canto de la superficie marcada, finalmente la hoja láser se engrosa a 4mm (2mm sobre el canto de la tarjeta y 2mm desde la superficie de la misma), definiendo así la profundidad del espacio donde se realizan las reconstrucciones estereoscópicas para el cálculo de la velocidad del fluido.

El equipo empleado en la experimentación se muestra en la Figura 11 mediante una foto (Figura 11a) y a través de un diagrama esquemático (Figura 11b), en donde se observan los componentes involucrados en dicho arreglo. Este incluye dos tinacos de 1100 litros de capacidad, dos bombas de 3/4 de caballos de fuerza, y válvulas y tuberías rígidas y flexibles de 1.5" de diámetro interno. Tanto los tanques, las bombas y las cédulas de las mangueras se diseñaron para garantizar gastos de agua elevados que están en el rango de 20 litros/min a 120 l/min que se regulan a la entrada del dispositivo con un rotámetro marca Blue White rango 30-150LPM. La cantidad de agua circulando entre el dispositivo y los tinacos es de aproximadamente 630cm^3 .

EL equipo de PIV es fabricado por la compañía danesa Dantec Dynamics. La cabeza láser modelo LDY302 se constituye por dos cavidades CW Q-switched Nd: YLF que emiten una longitud de onda infrarroja de 1053nm, transformada a luz visible verde de 527nm. Se utilizó un tiempo entre pulsos de 100 μs independientemente en cada cavidad, con un intervalo entre par igual a 200Hz después de un análisis experimental exhaustivo de estos importantes parámetros. El controlador del láser trabaja con un voltaje de 200-250V y corriente de 32A. En los experimentos siempre se utilizó el 55% de la potencia máxima (1KHz), lo que deriva en potencias independientes de cada cavidad del láser de alrededor de 10mJ a la frecuencia de 0.2KHz.

Las cámaras modelo SpeedsenseM320 tienen un sensor de refrigeración termoeléctrico, amplio rango en resolución (1920px X 1200px), amplio rango de frecuencia de cuadro (1380fps en completa resolución), tamaño de pixel $10\mu\text{m}$ y rápida transferencia de datos. Las cámaras se montan sobre un dispositivo mecánico que permite movimientos exactos en dirección X, Y y Z con precisión de milímetros.

Finalmente los datos se transfieren de los sensores de las cámaras directamente al equipo de cómputo que opera con el software DynamicStudio 4.0, en donde los datos son procesados con los valores default sugeridos por el fabricante para aplicaciones de PIV en flujos de agua de elevada velocidad.

Las partículas seleccionadas para la siembra del fluido son de poliamida recubiertas de rodamina de $20\mu\text{m}$ de diámetro. La cantidad de partículas en el sistema se estableció cualitativamente mediante ensayos de prueba y error, en los que se fue incrementando la concentración de dichas partículas en agua hasta observar una buena calidad de imagen, desde el punto de vista de intensidad de luz y saturación de partículas en los cuadros.

La potencia del láser al 55% y la apertura del obturador de las cámaras, así como el uso de filtros en ambos lentes también fueron contempladas para la siembra de partículas, pues son factores que influyen en la cantidad de luz dispersada y percibida por los sensores de las cámaras.



Figura 11a. Fotografía del arreglo experimental. 1)Controlador del láser, 2)Cabeza láser, 3)Cámaras de alta velocidad (2), 4)Soporte mecánico, 5)Lámparas de luz neón (2), 6) Tanque de agua (2), 7)Bomba de $\frac{3}{4}$ de caballo de fuerza (2), 8)Rotámetro, 9)Modelo físico.

La operación del dispositivo se realizó tal que, cada medición de PIV fuera a los 20 segundos después de haber iniciado la circulación de flujo con el gasto volumétrico deseado, con el objeto de que el vórtice generado fuera estable en toda su extensión. Para las pruebas con flujos volumétricos de 50 y 60 LPM se utilizó un deflector de aluminio en forma de escuadra colocado en el límite superior de los dispositivos, con lo que se evita que se derrame el líquido por el continuo ascenso del nivel de agua. Cada modelo físico se cubrió con papel negro opaco durante las pruebas para disminuir lo más posible el ruido debido reflejos provenientes de superficies externas.

CAPÍTULO 3:

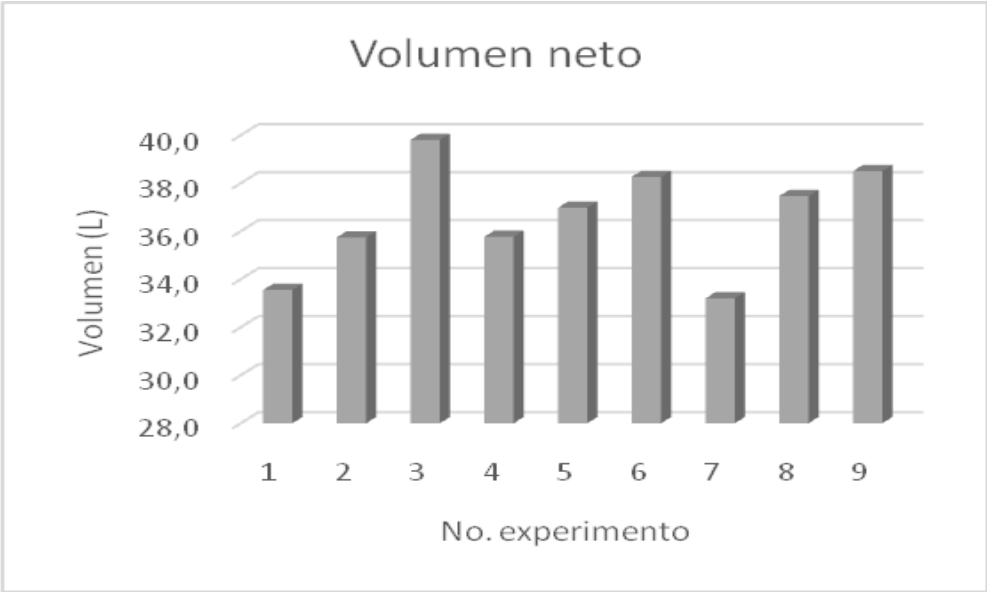
RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Tamaño y forma del vórtice.

A continuación se presentan las fotografías del vórtice desarrollado en cada modelo, bajo las tres condiciones de operación (tres niveles de flujo volumétrico). Los resultados de las dimensiones finales para cada vórtice y volumen neto de cada modelo se enlistan en la Tabla 5.

Tabla 5. Dimensiones de los vórtices y volumen neto para cada modelo analizado.

Exp. No.	1	2	3	4	5	6	7	8	9
Modelo	A	A	A	B	B	B	C	C	C
Flujo (LPM)	40	50	60	40	50	60	40	50	60
ϕ máximo (cm)	15.1	16.7	18.6	14.8	15.5	18.7	14.2	16.8	17.8
ϕ mínimo (cm)	1.7	1.3	1.1	1.9	1.2	1.1	1.7	1.5	1.5
Altura (cm)	45.1	48.7	53.8	47.1	50.0	52.8	45.3	49.4	52.9
Volumen vórtice (cm³)	680.8	944.0	1010.7	745.6	848.4	1290.5	719.7	918.2	1164.3
Volumen vórtice (L)	0.7	0.9	1.0	0.7	0.8	1.3	0.7	0.9	1.2
Volumen neto de agua (L)	33.5	35.7	39.8	35.8	37.0	38.3	33.2	37.5	38.5



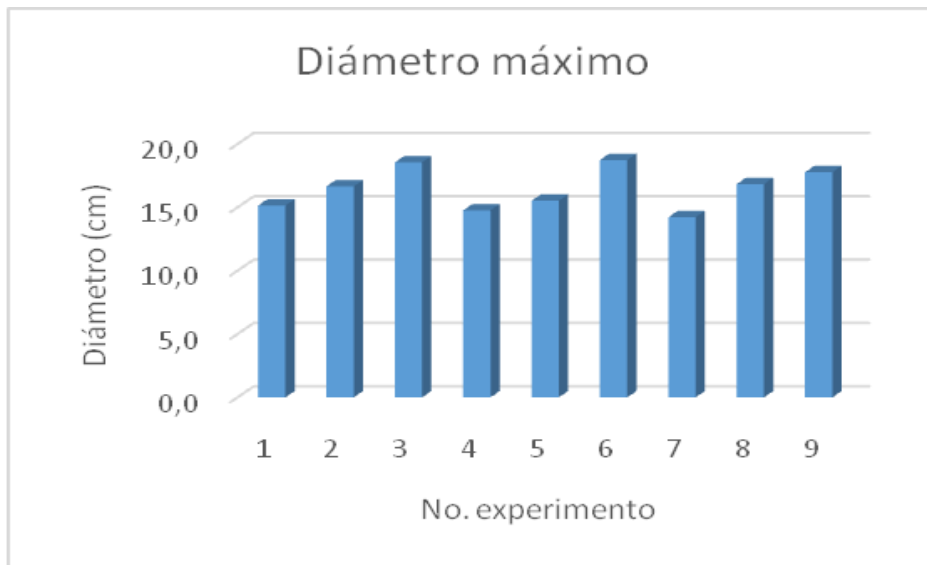
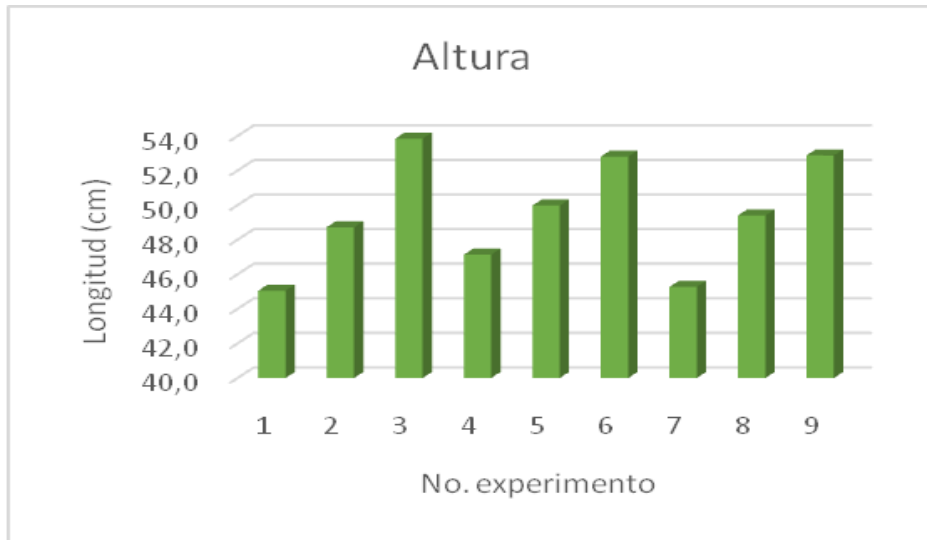


Figura 12. Dimensiones de los vórtices y volumen neto en cada modelo.

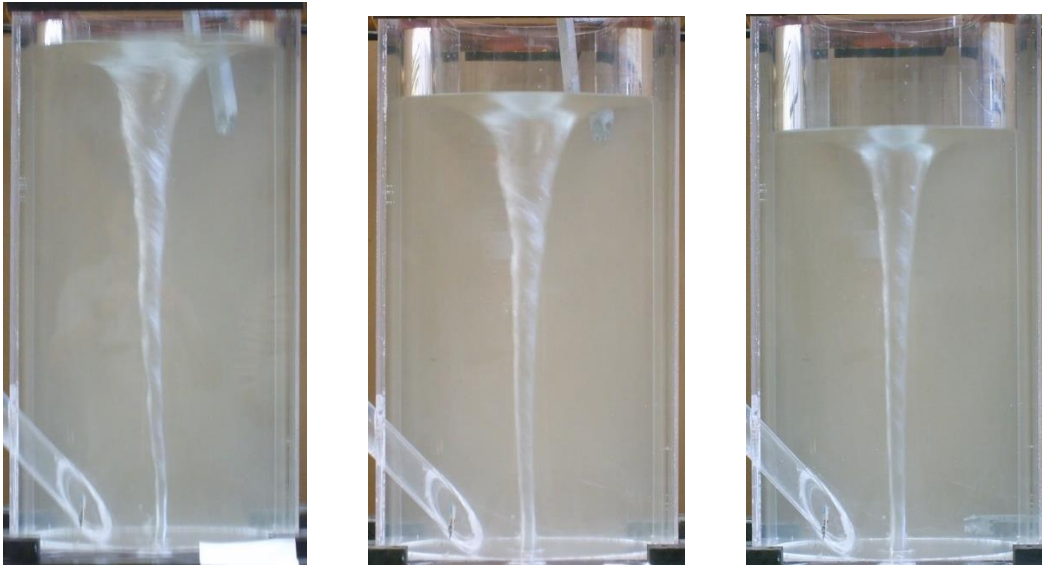


Figura 13. Modelo A, a) Flujo 60LPM, b) Flujo 50LPM y c) Flujo 40 LPM

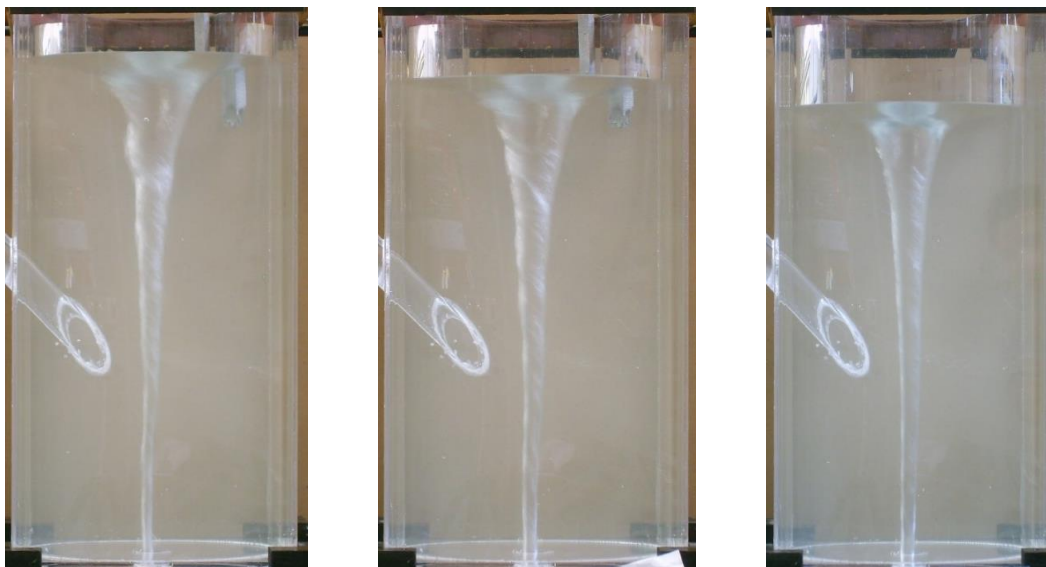


Figura 14. Modelo B, a) Flujo 60LPM, b) Flujo 50LPM y c) Flujo 40 LPM

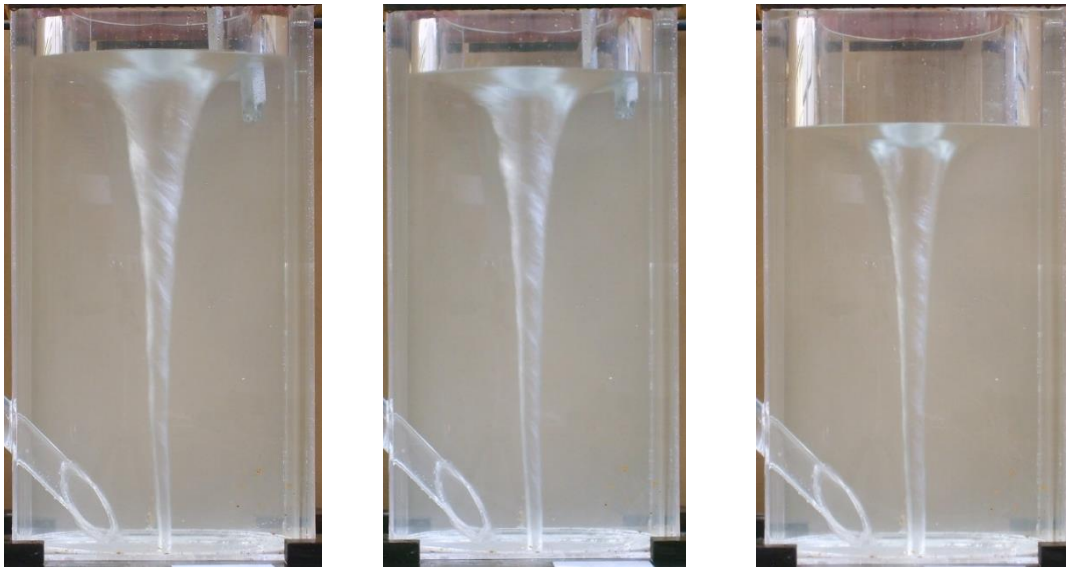
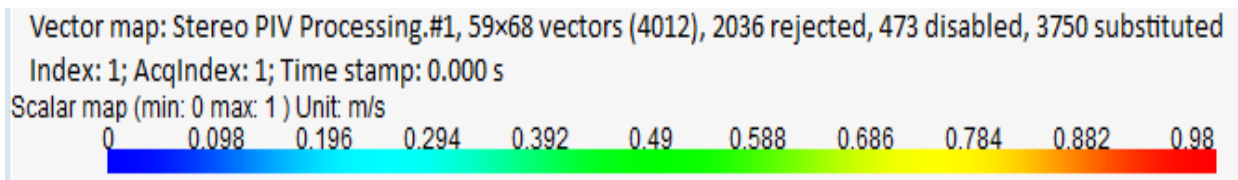


Figura 15. Modelo C, a) Flujo 60LPM, b) Flujo 50LPM y c) Flujo 40 LPM

A continuación se presentan los patrones de flujo, sobre el plano perpendicular.

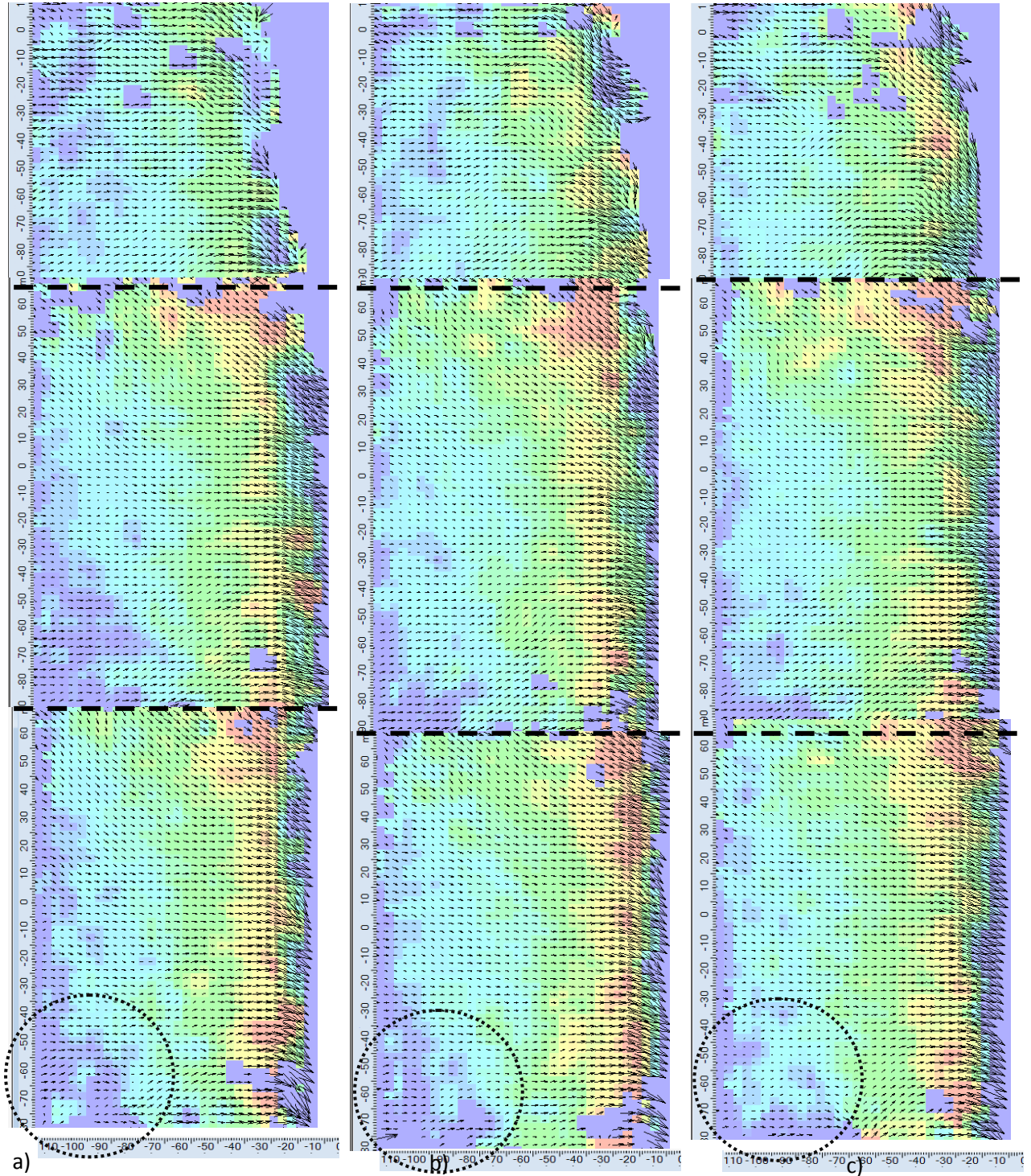


- Figura 16. Modelo A.

a) Flujo volumétrico 40LPM

b) Flujo volumétrico 50LPM

c) Flujo volumétrico 60LPM



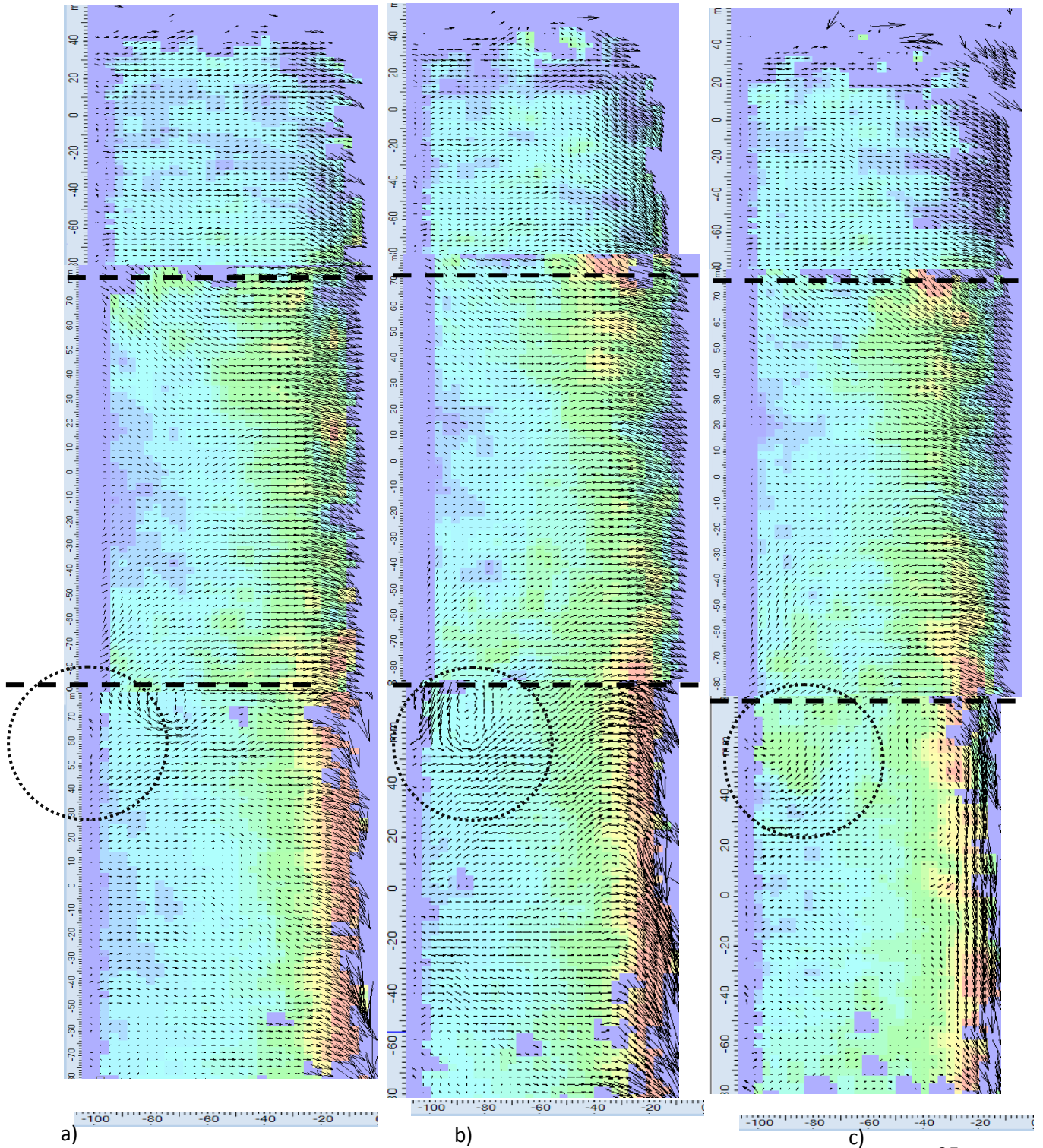
• Figura 17

Modelo B

a) *Flujovolumétrico*
40LPM

b) *Flujo volumétrico*
50LPM

c) *Flujo volumétrico*
60LPM



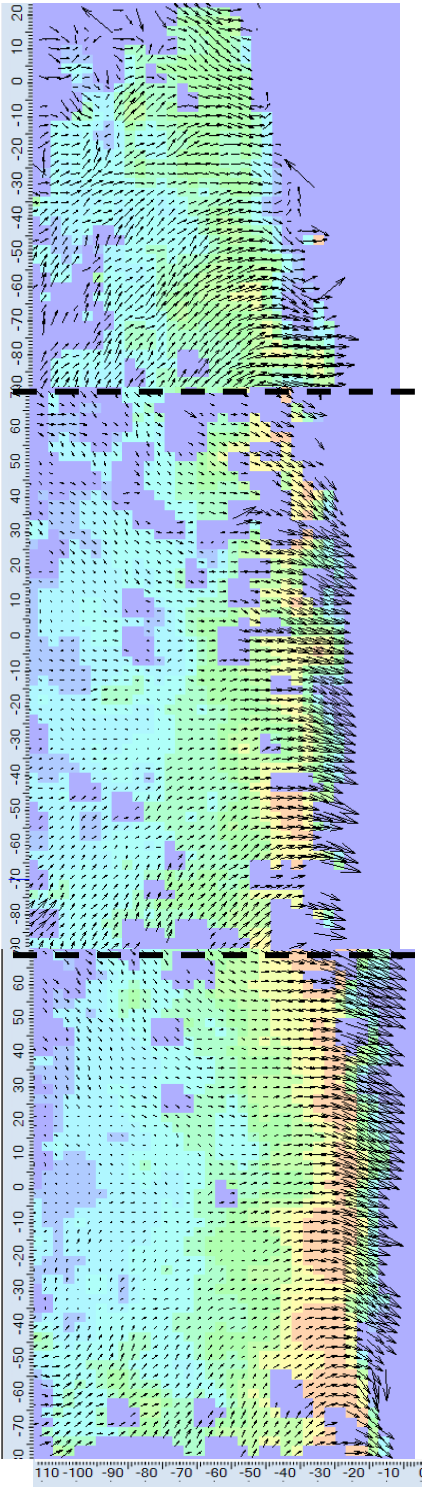
• *Figura 18*

Modelo C

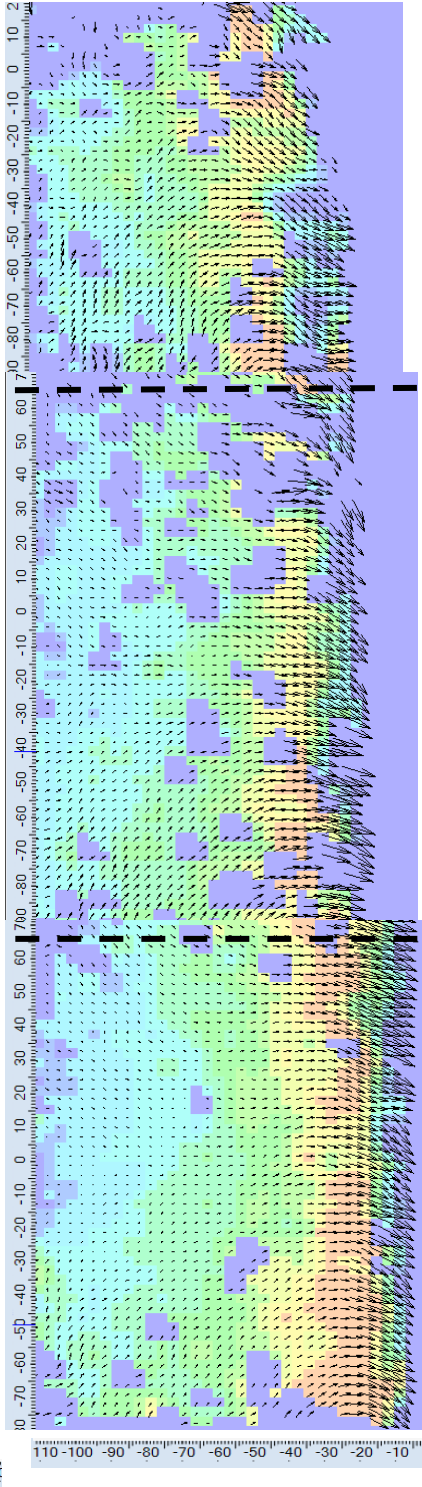
a) *Flujovolumétrico
40LPM*

b) *Flujo volumétrico
50LPM*

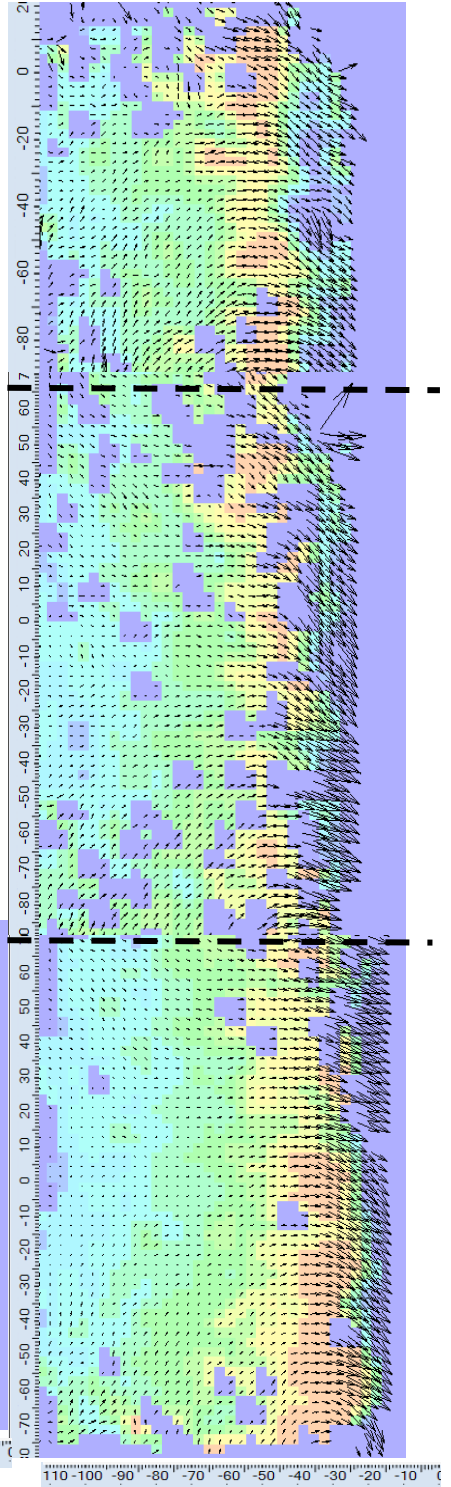
c) *Flujo volumétrico
60LPM*



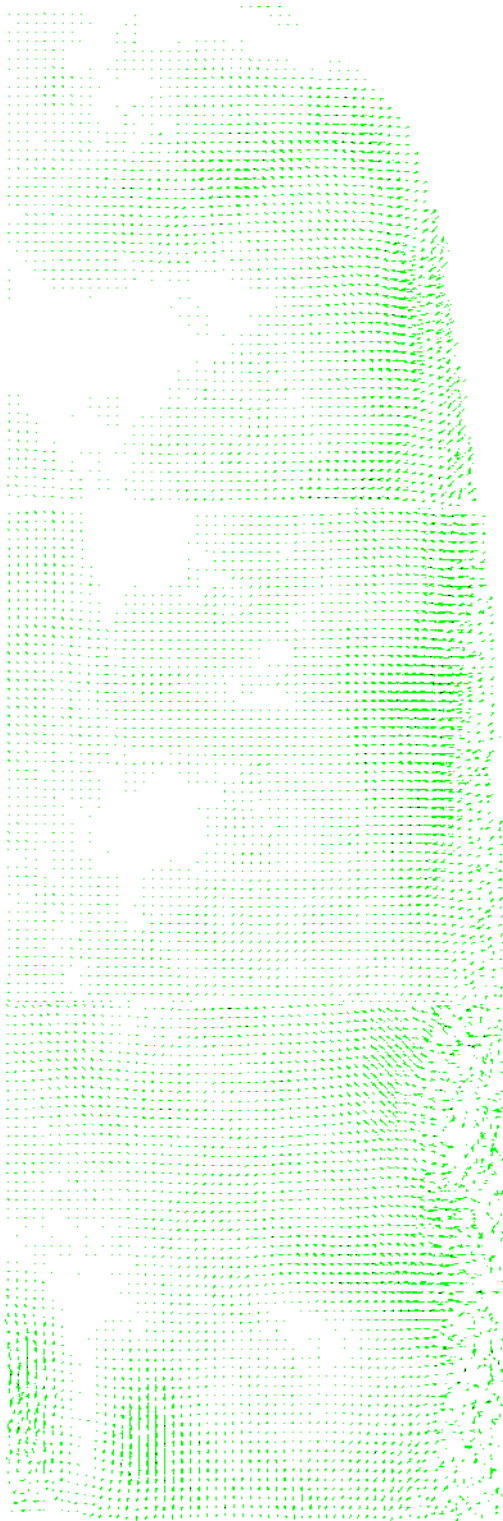
a)



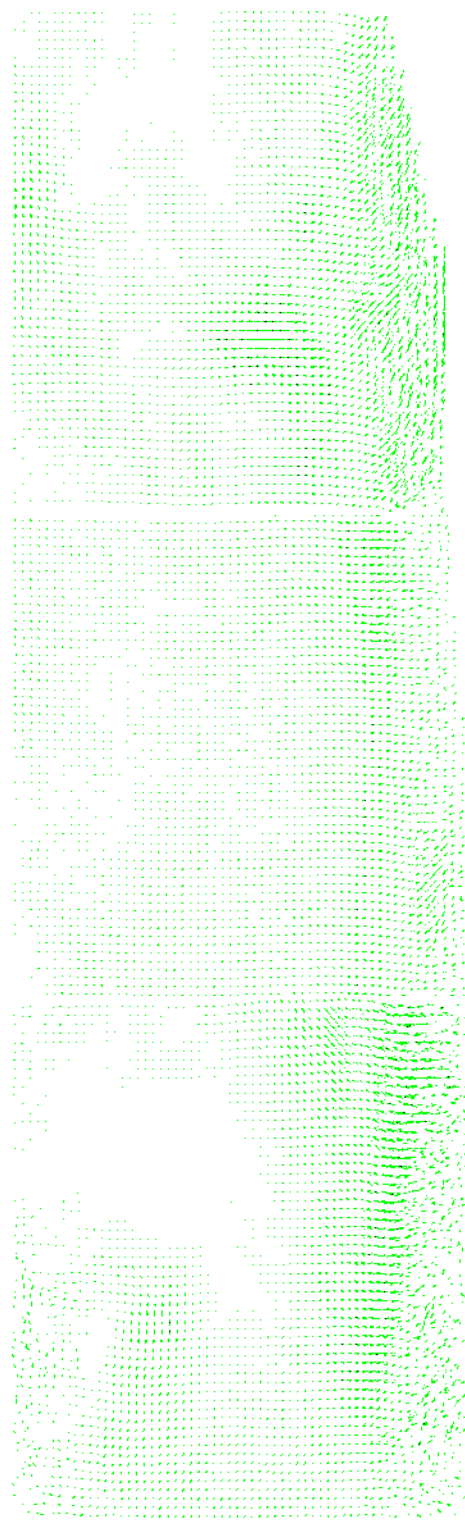
b)



c)

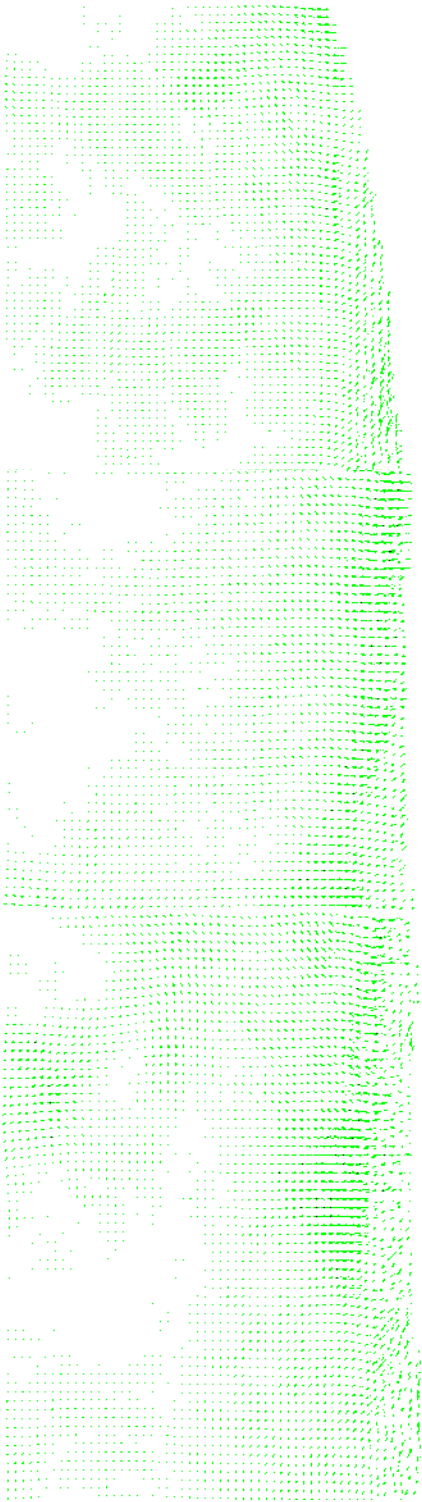


(a)



(b)

Figura 19. Patrones de flujo en el plano longitudinal paralelo a la entrada medidos con la técnica PIV 2D para el Modelo 1. a) 40 LPM y b) 60 LPM.



(a)

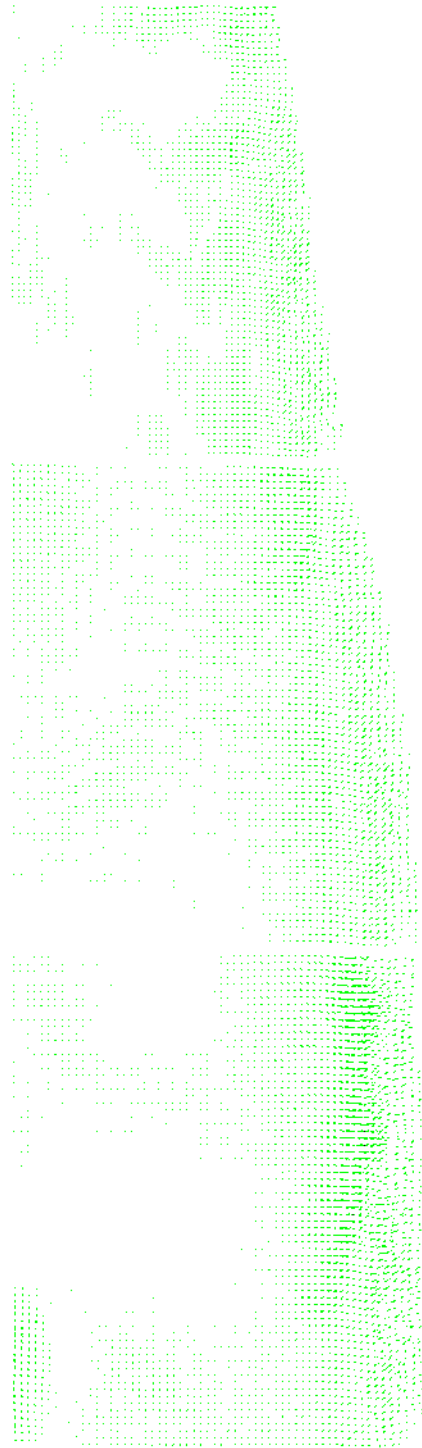


(b)

Figura 20. Patrones de flujo en el plano longitudinal paralelo a la entrada medidos con la técnica PIV 2D para el Modelo 2. a) 40 LPM y b) 60 LPM.



(a)



(b)

Figura 21. Patrones de flujo en el plano longitudinal paralelo a la entrada medidos con la técnica PIV 2D para el Modelo 3. a) 40 LPM y b) 60 LPM

En las Figuras 19 a la 21 se presentan los patrones de flujo en la mitad del plano longitudinal paralelo a la entrada de fluido de los dispositivos referenciados como Modelo 1 (Figura 19), Modelo 2 (Figura 20) y Modelo 3 (Figura 21) obtenidos mediante mediciones con la técnica PIV 2D.

3.1 Análisis de resultados.

Tamaño y forma del vórtice.

De la Tabla 5 y gráficos de la Figura 12, en los cuales se muestran las dimensiones de los vórtices en cada modelo, se nota claramente que el factor más importante en la forma y dimensiones de los mismos es el flujo volumétrico en la entrada.

La posición y diámetro del ducto de salida, así como la entrada tangencial permiten que el desalojo del fluido evolucione con una forma de vórtice, sin embargo, la rapidez con la que el flujo entra al sistema aporta la fuerza necesaria para que este vórtice crezca de manera estable hasta el nivel máximo del líquido, favoreciendo el desarrollo de corrientes angulares importantes, aún en la zona más alta del modelo, lo que garantiza que durante el mezclado, el volumen neto se mantenga en movimiento, favoreciendo la homogenización del metal líquido en todo el reactor.

Respecto al volumen neto que es ocupado por líquido y el nivel máximo de altura, ambos presentan valores similares para los tres modelos, en función únicamente de la rapidez de entrada. El volumen ocupado por el vórtice, también crece con la rapidez de entrada, por lo que finalmente, la razón volumen de vórtice/volumen neto es un valor constante en todas las condiciones experimentales. Por lo tanto, el tamaño del vórtice no es una característica que afecte de manera importante el mezclado, dado que la relación antes mencionada se mantiene constante al incrementar el flujo a la entrada.

Sin embargo, la forma del vórtice sí varía de un flujo a otro, como se observa en las Figuras 13-15, donde se presentan las fotografías de los vórtices, desarrollados para cada nivel de flujo volumétrico a la entrada, en los tres modelos físicos.

Al incrementar el flujo, la altura máxima del líquido aumenta, de modo tal, que para los flujos de 50 y 60LPM es necesario el uso de un deflector que rompa el movimiento en ascenso, impidiendo que el nivel suba hasta desbordarse. La presencia del deflector afecta el *ojo* del vórtice, evitando que éste se forme concéntrico al eje principal, como una circunferencia perfecta, lo que produce un aumento del movimiento caótico en la superficie del líquido. Al usar un flujo de 40LPM, el *ojo* del vórtice se expande completamente tomando la configuración de circunferencia, permitiendo que las corrientes angulares sigan un patrón bien

definido al avanzar en la dirección radial, es decir, existe menos turbulencia en la superficie del líquido.

En general, la mitad superior del vórtice, es más gruesa en cualquier punto a mayor flujo, ya que a flujos de 40LPM, el cuello se prolonga muy angosto hasta llegar casi a la superficie, en donde abre bruscamente hasta alcanzar el diámetro máximo en la superficie del líquido. Sin embargo, el cuello inferior cerca de la base de cada dispositivo, es de mayor diámetro en flujos bajos, mientras que cuando el flujo aumenta, esta última sección se observa muy delgada y sinuosa, como se observa en la Figuras 13 (a) y 14 (a).

La estabilidad de la superficie del vórtice es mayor en flujos bajos, entendida esta como la menor cantidad de niveles abruptos en el ascenso del vórtice. Esto permite que el borde quede bien definido en toda la extensión, como se aprecia en las Figuras 13(c), 14(c) y 15(c). Para flujos de 60 LPM el borde del vórtice es sinuoso e incluso el eje del cuello no se observa perfectamente recto de la base a la superficie, es decir, se presentan ciertas curvaturas, como se ve en las Figuras 13 (a) y 14 (a); sin embargo, el eje del vórtice se mantiene recto aún en flujos altos en el modelo C (Figura 15(c)), en el cual la base troncocónica ayuda a que el vórtice evolucione bien definido y con suficiente fuerza para mantener el eje derecho de la base a la superficie.

En cuanto a la diferencia en la altura de la entrada, ésta no presenta un efecto significativo para la definición del vórtice.

De lo anterior se deduce que el mayor grado de turbulencia en el fluido ocurre a mayores flujos de entrada, lo que calificaría al modelo C, como el más óptimo para la mezcla del metal líquido. Sin embargo, no debe perderse de vista que al incrementar el flujo de entrada, también se incrementa la rapidez a la salida dada la condición de reactor continuo, lo que significa que las partículas de soluto adicionadas permanecerían menor tiempo dentro del reactor, lo que reduce el tiempo disponible para que ocurra la efectiva fusión y disolución en el metal líquido.

De modo que, aunque un mayor flujo signifique mayor grado de turbulencia, y por tanto, de movimiento del fluido dentro de la cámara de mezclado, dada la naturaleza del proceso de homogenización de la composición química, conviene tiempo de residencia largos.

Finalmente, el flujo intermedio en el modelo C, combinaría las mejores cualidades de mezclado para el proceso de estudio.

Patrones de flujo 3D.

Como se explicó en la metodología experimental, tres mediciones independientes fueron necesarias para abarcar la altura de líquido dentro de los modelos. Por lo

tanto, en las Figuras 16-18, que corresponden a los patrones de flujo obtenidos en los planos perpendiculares al eje simétrico de la entrada, se unieron tres mapas vectoriales independientes, con el propósito de ensamblar éstos para construir el plano completo. Es por ello, que las escalas en el margen izquierdo de las figuras están seccionadas en tres segmentos, que representan cada uno, la porción de un solo mapa vectorial.

Se observa que los segmentos superiores miden alrededor de 10cm, los intermedios 16cm, y los inferiores 16cm. Por lo cual, se muestran las mediciones efectivas de aproximadamente 42 cm del total de la altura del líquido.

La escala inferior va de cero a -110cm, lo que indica que solo se está presentando la mitad del plano, cuyo origen coincide con el centro del vórtice.

No se reportan las mediciones sobre los planos paralelos a la entrada, debido a que tales mediciones resultaron con muy baja calidad debido a un excesivo nivel de ruido. Dado que los planos paralelos fueron visualizados, enseguida de haberse realizado las mediciones de los planos perpendiculares, el nivel de ruido obtenido en estos puede atribuirse al uso continuo y prolongado de los sensores CCD que son afectados térmicamente en función de la frecuencia entre cuadros y repetición de capturas. De este modo, un sobrecalentamiento de los sensores afecta en los datos guardados, incrementando el nivel de ruido.

De la misma manera, factores de error que pudieron intervenir son un mal enfoque de las partículas o bien, la degradación del agua circulante, en la cual las partículas de siembra se aglomeran después de un cierto periodo de operación. Estas situaciones no se controlaron estrictamente, por lo que dichas mediciones deberán ser repetidas en una segunda etapa de trabajo.

Las mediciones estereo PIV permiten obtener los tres componentes de la velocidad a partir de la reconstrucción estereoscópica en un plano (3D2D). En los mapas vectoriales procesados por el software DinamicStudio 4.0, el tercer componente de la velocidad está representado por el signo negativo de la velocidad, por lo que un mapa completo del plano, tendría valores de velocidad de 1.0 a -1.0 m/s por ejemplo, siendo los valores positivos los que salen del plano y los valores negativos los que entran al plano, respecto a la posición del observador.

En las Figuras 16-18, no se observa ningún valor negativo dado que el mapa corresponde únicamente a la mitad del plano de interés, en la que las líneas de corriente atraviesan en el sentido positivo de la dirección Z (dirigiéndose al observador).

Además, es importante notar que a medida que se desplaza del centro, avanzando en la dirección radial, la componente angular de las líneas de corriente se hacen más prominente, por lo que intersectan al plano de interés tangencialmente. Únicamente el plano central, haría un corte propiamente

perpendicular (a 90°) respecto a los vectores que describen la dirección de las líneas de corriente del fluido.

Sin embargo, es importante obtener el patrón de flujo del centro del modelo, o lo más cerca posible, ya que es en tal posición donde deben existir recirculaciones en la dirección axial que expliquen la habilidad para mezclar, debido a que distribuirían el soluto en la dirección axial de la cámara, lo que incrementa directamente el tiempo de residencia de las partículas sólidas de aleantes, permitiendo que se complete la fusión y disolución de éstas en el baño líquido. Además, participan en el ascenso del líquido y la formación del vórtice desde la base hasta el nivel máximo.

En los patrones de flujo resueltos para los tres modelos, en cada variante de flujo volumétrico, se aprecian vectores que toman una dirección de giro en sentido de las manecillas del reloj, es decir, apuntan a la derecha y hacia abajo, sobre el borde del vórtice. Sobre la pared de la cámara, de manera general se aprecian los vectores de velocidad apuntando hacia arriba y a la derecha. Por lo que, la asociación de estos patrones, conforman las recirculaciones axiales buscadas.

En la Figura 16, se aprecia un mayor grado de desorden en el patrón en la base inferior izquierda del modelo, que corresponde a la posición que coincide exactamente con la entrada del fluido, lo que explica tal grado de turbulencia.

En la Figura 17, esta recirculación cerrada y caótica se observa aproximadamente a los 17cm de altura, cuya posición es la de la entrada del fluido. En la periferia de esta región, se aprecia como los vectores ascienden y comienzan a rotar hacia la derecha, constituyendo la siguiente recirculación del fluido.

En la Figura 18, el grado de desorden en el fluido y huecos debidos a falta de información, hacen difícil la interpretación del patrón de flujo. Sin embargo, se mantiene la característica principal que se aprecia en los tres modelos: los vectores que bordean el vórtice y la pared del dispositivo, tienen dirección de giro en el sentido de las manecillas del reloj, lo que de nuevo corrobora las recirculaciones axiales de que se habla.

La escala en colores indica que las velocidades dentro de los modelos se acercan a cero a medida que se avanza a la pared del modelo, debido a la condición de no deslizamiento, hasta los 0.9m/s en las vecindades del vórtice, donde se generan las regiones más turbulentas del fluido. Aproximadamente, una mayor área del plano está ocupada por velocidades de entre 0.3 y 0.8m/s, lo que es bastante cercano a lo calculado a partir del modelo matemático de este dispositivo.

Las velocidades se incrementan al aproximarse a la base de la cámara en el ducto de salida, así como al incrementar el flujo volumétrico de entrada, lo que se puede apreciar comparando la escala de colores predominante entre las Figuras (a), (b) y (c) de cada modelo, en donde, para un flujo de 40LPM el color azul claro penetra a

mayor distancia en la dirección radial, mientras que con un flujo de 60LPM, se tiene una mayor área de tonalidad verde y amarillo, lo que significa un incremento de la velocidad promedio.

Patrones de flujo 2D.

Analizando los patrones de flujo en 2D del plano longitudinal paralelo a la entrada de fluido para cada dispositivo, en donde se presentan solamente componentes radiales y axiales de velocidad, se aprecian similitudes entre los patrones de flujo del Modelo 1 y del Modelo 3. En ambos casos y sin importar el flujo de entrada, se presentan dos recirculaciones definidas: una pequeña en el sentido de las manecillas del reloj localizada en la esquina inferior izquierda y la otra recirculación más amplia en contra de las manecillas del reloj y localizada en la parte media del dispositivo a la mitad de la distancia radial entre el vórtice y la pared lateral. El Modelo 2 presenta un patrón 2D de flujo distinto a los otros dos dispositivos y como característica se aprecia una recirculación pegada a la pared lateral izquierda a la altura de la entrada del fluido y que seguramente es causada por esa misma entrada. El resto del Modelo 2 presenta un movimiento desde el vórtice hacia las paredes hacia abajo en la parte inferior del modelo y hacia arriba en la parte superior del modelo.

En los tres dispositivos, las mayores velocidades se presentan cerca del vórtice y la magnitud de la velocidad del fluido disminuye conforme se aproxima la pared lateral.

Sin importar el modelo, la parte inferior de cada dispositivo presenta mayores magnitudes de velocidad que la parte superior y también se aprecia que cerca del vórtice la componente radial de la velocidad predomina, mientras que cerca de la pared hay zonas en donde la componente axial predomina.

El aumento en el flujo de agua provoca un lógico aumento en la magnitud de las velocidades y en la turbulencia debido al incremento en el número de Reynolds que incrementa las fuerzas inerciales.

Finalmente, se puede resumir que el patrón de flujo en 2D con las componentes radial y axial es sumamente complejo en cada uno de los modelos analizados.

CAPÍTULO 4:

CONCLUSIONES

- Las variantes de diseño entre los modelos estudiados no producen diferencias significativas en la habilidad del mezclado, aunque hay un aligera superioridad del modelo con la base troncocónica, entendida como el mayor grado de turbulencia desarrollado.
- La relación volumen del vórtice/volumen neto es constante al incrementar el flujo a la entrada, por lo cual el tamaño del vórtice no es una variable que afecte la capacidad de mezclado.
- Al incrementar el flujo de entrada, se genera una mayor inestabilidad en el contorno del vórtice, lo que desarrolla mayor grado de turbulencia.
- Debido a que se requieren tiempos altos de residencia del soluto, se propone el modelo C con un flujo de 50LPM, como la opción que eficiente mezclado y producción.
- Los movimientos de fluido son predominantemente angulares y hay pocas componentes axiales, pero aunque estas componentes sean pequeñas, dictan el grado de turbulencia y propician el mezclado.
- De las mediciones estereoscópicas con PIV se corrobora que existen recirculaciones axiales en el sentido de las manecillas del reloj, que favorecen la mejor distribución del soluto.
- Las velocidades del fluido dentro de los modelos van de 0.3m/s a 0.8m/s, lo que valida el resultado del modelo numérico del dispositivo mezclador.
- El patrón de flujo medido en 2D en un plano longitudinal paralelo a la entrada, mostró una enorme complejidad y para los Modelos 1 y 3 presentan dos recirculaciones definidas, mientras que para el Modelo 2 una sola recirculación a la altura de la entrada. La magnitud de la velocidad y la turbulencia aumentan cerca del vórtice y en la parte inferior para cualquier dispositivo y con un aumento en el flujo de agua.

Referencias

- [1] Delgado Álvarez, J. Alfredo, **Modelado matemático de un dispositivo mezclador de aleaciones**, Tesis que para obtener el título de Maestro en Ciencia e Ingeniería de Materiales, Universidad Nacional Autónoma de México, Instituto de Materiales, México, 2014.
- [2] Morales Antonio, Arturo, **Optimización de un dispositivo de aleación rápida a través de modelado matemático**, Tesis que para obtener el título de licenciatura, Universidad Nacional Autónoma de México, Facultad de Química, México, 2014.
- [3] M. Raffael, C. Willert, S. Wereley, J. Kompenhans, **Particle Image Velocimetry: A Practical Guide**, Second Edition, (Springer-Verlag Berlin Heidelberg 2007).
- [4] **Manual práctico 2D**, Dantec Dynamics Studio
- [5] GionavaCabazzini, **Particle Image Velocimetry: characteristics, limits and possible applications** (InTech, Croatia, 2012)
- [6] A. Melling, **Tracer particles and seeding for particle image velocimetry**, Meas. Sci. Technol. 8 1406, doi: 10.1088/0957-0233/8/12/005 (1997).
- [7] R. D. Keane, R. J. Adrian, **Theory of cross-correlation analysis of PIV images**, Applied Scientific Research 49: 191-215 (1992).
- [8] Montgomery, Douglas C., **Diseño y análisis de experimentos**, Segunda Edición (Limusa, Universidad de Arizona, 2004)
- [9] Patente US 4034970