

Desarrollo de un sistema de inyección de partículas en polvo fino para visualización de flujo en contenedores a altas temperaturas

Aguila Rodríguez Milan, Bedolla Hernández Marcos, Ortega Vivas Cesar Adolfo ⁽¹⁾,
Bedolla Hernández Jorge, Hernández Corona Francisco

Instituto Tecnológico de Apizaco, Av. Instituto Tecnológico s/n, Apizaco, Tlaxcala, México

⁽¹⁾mabe TyP, Av. 5 de Febrero Acceso B #406, Parque Ind. Júrica, Querétaro, México

Correo electrónico para contacto: aguila_rdgz@hotmail.com

Resumen

En el presente artículo se expone el desarrollo de un sistema de inyección de partículas de una mezcla de aire y polvos finos. La finalidad del dispositivo es la visualización de flujo de calor en contenedores a altas temperaturas, utilizando para ello la inyección a alta presión de partículas de TiO_2 en el interior del contenedor cuando este opera a una temperatura de 246 °C. La visualización del campo de movimiento del flujo en el interior del contenedor se realizó por medio del sistema PIV (velocimetría por imágenes de partículas). El sistema desarrollado fue diseñado para trabajar en ambientes de convección natural a bajas velocidades de flujo comprendidas en rangos de 0.3 m/s a 2 m/s, valores determinados mediante simulación numérica-computacional utilizando un modelo desarrollado y analizado mediante CFD. De forma análoga se verificó el comportamiento del sistema propuesto usando el software comercial ANSYS como paso previo al ensamble del prototipo. Las pruebas experimentales se realizaron con partículas de polvos finos de TiO_2 , las cuales fueron consideradas debido a las propiedades térmicas que poseen; las cuales presentaron una distribución uniforme dentro del contenedor durante las pruebas, facilitando un funcionamiento estable del sistema propuesto. Situación reflejada en la toma de imágenes con el equipo PIV donde se observa que el movimiento del flujo tiende a ir hacia las zonas más frías dentro del contenedor.

Palabras clave: Inyección de polvos finos, movimiento de flujo, sistema PIV

1. Introducción

Durante la última década las técnicas para la visualización de flujo han experimentado un rápido aumento en la aplicación de investigaciones diagnósticas no intrusivas en campos complejos de flujo [1]. Métodos como Velocimetría de Imágenes de Partículas (PIV por sus siglas en inglés) o Anemometría Laser Doppler (LDA) han sido desarrollados para la visualización de flujos. Estos métodos se basan en la dispersión de partículas suspendidas en el flujo para proporcionar la información de velocidad para el medio continuo (líquido o gas) [2]. La precisión de la determinación del campo de velocidad está finalmente limitada por la capacidad de las partículas de dispersión para seguir el movimiento instantáneo de la fase continua; por lo cual, es necesario establecer una relación entre el tamaño de la partícula, una disminución del tamaño favorece el seguimiento mientras que un aumento mejora la dispersión de la luz [1] [2].

Con el avance de las computadoras los métodos mencionados anteriormente han evolucionado, llegando a establecerse sistemas digitales realmente funcionales e importantes [3], en la actualidad los componentes principales de esta clase de sistemas son: 1) Cámara de alta resolución, 2) Fuente de luz láser para iluminar el medio, 3) Procesamiento digital de imágenes y 4) sistema de inyección de partículas [4]. Para estos sistemas el principio de operación consiste en iluminar el plano sobre el cual

se desea medir con un haz de luz láser, e inyectar un campo de partículas de igual densidad al fluido, ocasionando que la luz se refleje sobre ellas. Mediante la cámara se toman pares de imágenes de la región de interés; las cuales son procesadas posteriormente mediante software para determinar la dirección y velocidad del flujo [5]. En la actualidad existen sistemas para inyectar partículas, dispositivos como los sembradores tipo Laskin, de ciclón, de cepillo rotatorio y cama fluidizado son empleados con mayor frecuencia [2] [6]. Son principalmente aplicados a mediciones de velocidades de flujo en túneles de viento, sin embargo una desventaja que presentan son las altas velocidades de trabajo en rangos de 100 m/s o superior [7]. Cada uno de los componentes de los sistemas de visualización aportan un grado de exactitud durante las mediciones, sin embargo para obtener mediciones precisas, la inyección de partículas trazadoras en el medio se vuelve un compromiso crucial y que debe de ser altamente considerado para lograr mediciones viables al momento de realizar los análisis [8].

Por lo anterior, en el caso del trabajo reportado, se desarrolló un sistema de inyección de partículas en polvos finos, capaz de trabajar con velocidades de flujo en el orden de 0.2 m/s a 2 m/s en ambientes de convección natural para visualizar de manera correcta el flujo dentro de contenedores operando a temperaturas entre 246 y 260 °C.

2. Materiales y métodos

En el desarrollo del sistema de inyección de polvos finos para la visualización de flujos fue realizado en tres etapas: 1) conceptualización, análisis y desarrollo de las partes del sistema mediante software, 2) construcción del prototipo y 3) pruebas de funcionamiento y validación del sistema desarrollado.

La primera etapa consistió en realizar el modelado del sistema propuesto mediante el software de CAD *Creo Parametric*®; se elaboraron los modelos sólidos de la caja contenedora de los polvos finos la cual es de forma cuadrada, el elemento flexible de conexión y un tercer elemento de forma cuadrada que corresponde a la salida del sistema. Posterior a la elaboración de los modelos sólidos se procedió al ensamble del sistema dentro del módulo *Assembling* del software mencionado; en primera instancia se acoplo la caja contenedora al elemento flexible redondo mediante relaciones de concentricidad y coincidencia, en seguida en el otro extremo se le realizó el barrenado donde se colocó el ventilador, finalmente la salida fue conectada al ensamble por las relaciones de posición mencionadas anteriormente. Una vez terminado el ensamble, el diseño se exportó al software ANSYS® para realizar el análisis del comportamiento de flujo y observar la velocidad de salida, esto se realizó mediante dinámica computacional de fluidos (CFD). Las condiciones de frontera utilizadas para el análisis fueron 3100 rpm en la velocidad de giro del ventilador y 30 CFM de flujo volumétrico; los detalles del ensamble y condiciones de análisis se muestran en la figura 1.

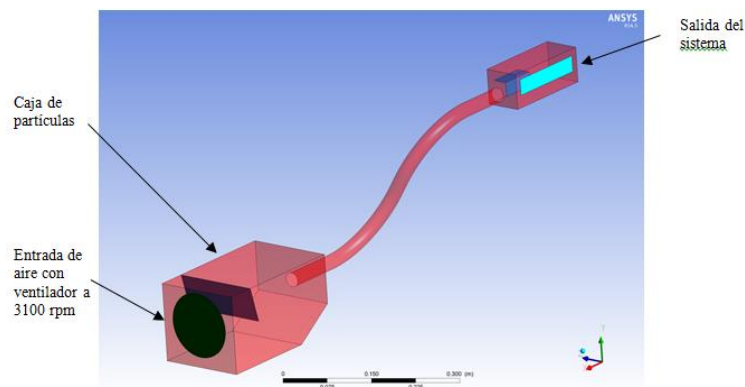


Figura 1. Sistema propuesto y condiciones de análisis.

Posterior al análisis, y a partir del modelo desarrollado, se elaboraron los modelos virtuales individuales de los componentes que integran el sistema, con la finalidad de proceder a su manufactura. Para ello se empleó el módulo *sheetmetal* del software *Creo Parametric*®, con el cual se realizaron los diseños de cada pieza. Las especificaciones para la elaboración de los componentes fueron los siguientes.

2.1 Especificaciones de diseño

Las partes de la caja contenedora de polvos finos consta de dos piezas: una base fabricada de lámina en forma de “U” y una tapa cuadrada que cierra completamente la caja, estas partes fueron diseñadas con lamina de espesor de 0.03 pulgadas. La base para montaje donde fueron colocadas las piezas que constituyen el sistemas fue diseñada con lámina de espesor de 0.045 pulgadas. La figura 2 muestra las piezas diseñadas.

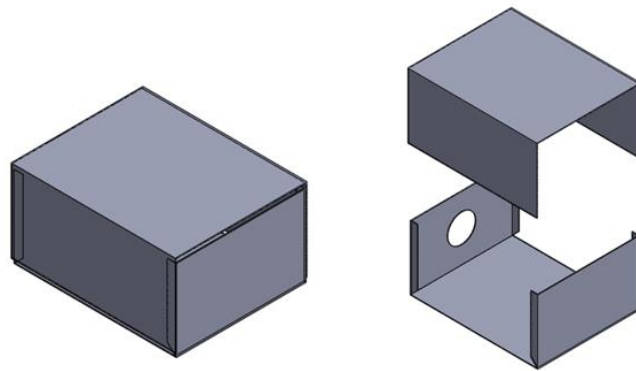


Figura 2. Caja contenedora de los polvos finos desarrollada en el módulo Sheetmetal ensamblada y vista explosionada.

Una vez ensamblado el diseño se verifico para asegurar que no exista interferencia entre componentes que puedan dificultar su armado y construcción como se muestra en la figura 3, donde se observa el sistema ensamblado dentro del software.

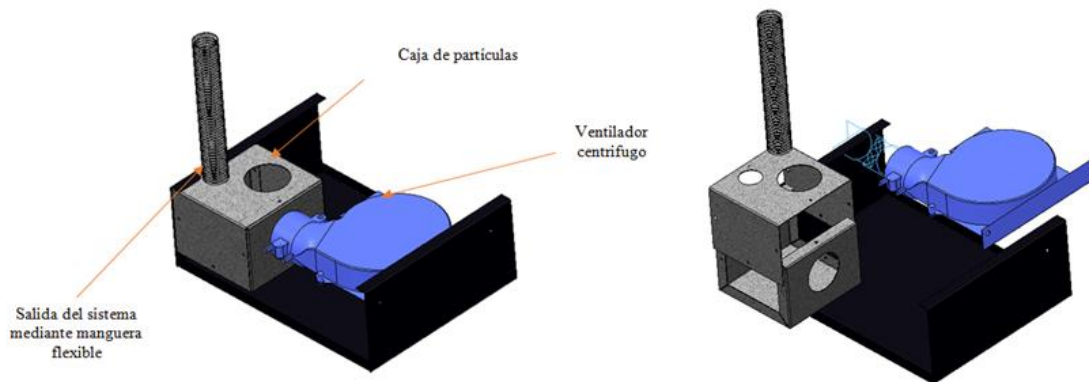


Figura 3. Sistema de inyección de polvos finos ensamblado dentro del software con sus principales componentes.

Por último, las piezas se exportaron al módulo de *Drawing* de *Creo Parametric*® para realizar los planos de cada componente y su posterior armado del sistema.

Para la construcción del prototipo, etapa dos del proyecto, las partes fueron manufacturadas por procesos de corte y doblado empleando lámina galvanizada con los espesores mencionados anteriormente. El armado de la caja contenedora de polvos finos fue a base de sujeción mediante tornillos de 1/8 de pulgada, mientras que el método de acoplamiento del ventilador a la caja fue a presión, la salida del sistema fue a través de una manguera flexible de 1 pulgada de diámetro con una longitud de 16 pulgadas situada en la parte superior de la caja de polvos finos. Después el sistema fue sellado para evitar pérdidas de flujo de aire y se montó sobre la base metálica como se observa en la figura 4.



Figura 4. Sistema de inyección de polvos finos armado.

Para la tercera etapa, una vez finalizada la construcción del prototipo, se realizaron pruebas de funcionamiento del sistema; las cuales fueron 1) de funcionamiento, es decir que las partículas sean expulsadas de manera uniforme y 2) de visualización para observar el flujo de calor en el interior del contenedor.

Para realizar las pruebas de funcionamiento, las partículas en forma de polvos finos fueron depositadas en la caja contenedora, se encendió el dispositivo y se verificó de manera visual la expulsión de partículas hacia el interior del contenedor; para las pruebas de visualización primero se instrumentó el contenedor a ser analizado, colocando en la parte frontal del contenedor un vidrio templado para resistir la temperatura del interior y fue sellado para evitar fugas, este tiene la función de permitir a la cámara de alta resolución captar las imágenes del movimiento del flujo de calor interno, de igual manera, a un costado se realizó un corte por todo hasta llegar a la cavidad y se colocó otro vidrio templado de la misma manera que el anterior, por este lado el haz de luz láser es introducido para iluminar el ambiente dentro del contenedor que contiene las partículas inyectadas en forma de polvos finos que siguen el flujo de calor interno. Posteriormente, se encendió el quemador del contenedor y se estableció a una temperatura de 246 °C durante un lapso de tiempo de una hora, el combustible utilizado es gas natural. Después de transcurrido el tiempo de calentamiento y estabilización de la temperatura dentro del contenedor, se procedió a la captura de las imágenes del

flujo en movimiento, esto se realizó mediante el equipo PIV colocado en la posición de acuerdo a la figura 5.

A continuación se realizó la inyección de los polvos finos por debajo del contenedor, a un lado de donde está localizado el quemador y se tomaron las imágenes del flujo en movimiento.



Figura 5. Disposición del equipo PIV para toma de imágenes

Para el control de la velocidad del ventilador se empleó un circuito de control, el cual consta de un dispositivo de potencia SCR que permite variar su ángulo de disparo mediante una resistencia variable, de esta manera se hace una variación del voltaje entregado en el ventilador y por lo tanto se obtiene una regulación de la velocidad. El sistema se activa de manera manual mediante el botón pulsador normalmente abierto de encendido del ventilador.

Una vez concluidas las etapas de desarrollo del prototipo y las pruebas de funcionamiento se analizaron los resultados obtenidos para el comportamiento del flujo en el interior del contenedor.

3. Resultados

A partir de la simulación desarrollada, con los modelos CAD elaborados, se observó el comportamiento del flujo de aire dentro del sistema y las velocidades que se tienen a la salida, los resultados muestran una velocidad de salida en rangos de 0 a 4 m/s, lo que indica que es viable de implementar como inyector de partículas, tomando como base los datos de simulaciones previas realizadas [9], las cuales indican, que la velocidad máxima del flujo en el interior del contenedor es de 2 m/s por lo tanto la velocidad de inyección de las partículas en forma de polvos finos debería ser de igual magnitud o menor, al introducirlas con una velocidad superior a la establecida existe una distorsión del flujo y esto trae como consecuencia mediciones erróneas de la velocidad, la salida del sistema se diseñó para realizar un efecto similar al de un tubo de Venturi, lo que se busca es disminuir la velocidad de la salida con el aumento del diámetro, en este caso, la salida es similar a un ducto con un diámetro más grande que el de la manguera de salida, esta configuración se analizó de dos maneras: con un deflector interno y sin este, como se muestra en la figura 6, del lado izquierdo de la figura, la salida sin el deflector interno muestra rangos de velocidad de 0 a 2.5 m/s, un rango de velocidad factible sin embargo los vectores de velocidad muestran un sentido contrario, es decir en lugar de salir el flujo, este entra nuevamente haciendo un efecto de succión, mientras que en la imagen de la derecha se observa la salida del sistema con el deflector interno, los rangos de velocidades son iguales que el anterior, sin embargo en esta configuración el flujo se observó de manera más uniforme que el anterior, hacia una sola dirección y sin una tendencia a crear turbulencias debido al choque y direccionamiento del flujo de aire con las paredes del deflector.

Los resultados muestran que la configuración de la salida del sistema con la adición del deflector interno presenta un mejor comportamiento del flujo, esto por causa de producir una distribución más uniforme del flujo de aire y en una sola dirección.

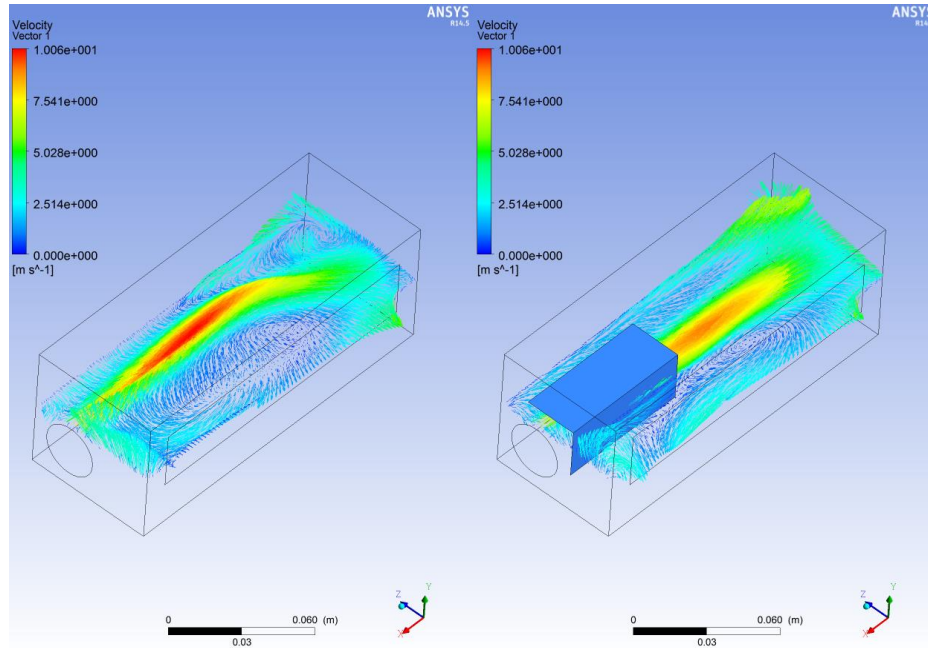


Figura 6. Velocidades de salida del sistema, sin deflector interno (izquierda) y con un deflector interno a modo de frenar un poco el flujo.

De forma análoga se realizó un análisis del interior de la caja que contiene los polvos finos para observar el comportamiento interno del flujo de aire mediante líneas de trayectoria. A partir de los resultados de las simulaciones, se observó que los polvos finos no son arrastrados hacia el exterior del sistema por medio del flujo de aire que genera el ventilador, debido a que el flujo desarrollado no llega al fondo de la caja, ocasionando que los polvos queden depositados; por lo tanto, se direcciono el flujo hacia abajo por medio de un deflector interno como se muestra en la figura 7, con esta condición plantada, el flujo de aire es desvaído y llevado hacia el piso donde se encuentran las partículas en polvos finos, de esta manera se obtuvo un buen arrastre de los polvos hacia el exterior para finalmente ser depositados donde se desea medir.

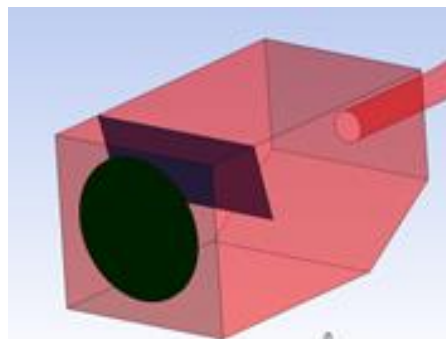


Figura 7. Posición del deflector interno.

A partir de los resultados de las simulaciones se construyó el sistema y se realizaron una serie de pruebas de funcionamiento; para las cuales, una consideración importante fue la selección del tipo de partículas en polvo fino a emplear, condiciones como resistencia a alta temperatura, baja densidad y el tamaño [4] se tomaron en cuenta para su elección; el contenedor trabaja mediante convección natural y debido al aumento de temperatura en el interior de este, la densidad del aire tiende a decrecer lo que dificulta la elección de las partículas, el tamaño de estas se definió mediante la siguiente ecuación [10].

$$\frac{F_D}{F_I} \gg 1 \quad \therefore \quad \frac{u \cdot v \cdot \rho_f}{\rho_p \cdot \alpha \cdot D^2} \gg 1 \quad (1)$$

Donde u es la viscosidad cinemática del fluido, v es la velocidad de la partícula, ρ_f es la densidad del fluido, ρ_p es la densidad de la partícula, α es la aceleración y D su diámetro de la partícula. La ecuación establece que las partículas pueden seguir fielmente el flujo al que van inmersas siempre y cuando la fuerza del fluido F_D sea mayor a la inercia que presenta la misma partícula (F_I).

En base a las consideraciones anteriores y mediante la ecuación 1 se establecen tres tipos de partículas en polvos finos. Sus características se muestran en la tabla 1

Tabla 1. Partículas consideradas para inyectarlas en ambientes a altas temperaturas

	Óxidos de titanio TiO₂	Óxidos de silicio SiO₂	Óxidos de aluminio AlO₂
Densidad	4.23 g/cm ³	2.65 g/cm ³	3.95 g/cm ³
Color	Blanco	Blanco	Blanco
Tamaño	100 nm	180 nm	165 nm
Forma	Semi-esférica	Semi-esférica	Semi-esférica

De los tres tipos de polvos finos considerados se eligió al TiO₂, esto a causa de tener un tiempo de respuesta más corto respecto a la velocidad de flujo en comparación con los otros [11] y una tendencia a no aglomerarse en el interior de la caja contenedora de las partículas, situación que sucede con los óxidos de silicio repercutiendo en una baja inyección de estos dentro del contenedor. Respecto a los AlO₂, estos tienden a degradarse cuando son introducidos en el contenedor.

Aunado a lo anterior el TiO₂ posee una mayor densidad y por ende el tamaño es más pequeño, estos muestran un buen comportamiento como partículas trazadoras dentro del flujo analizado.

Con base a las partículas seleccionadas se decidió implementar un sistema de control de velocidad del ventilador para disminuir la velocidad que se tiene a la salida y obtener valores de 2 m/s o inferiores.

Durante el proceso de inyección de los polvos finos es necesario un flujo continuo de la mezcla de aire y partículas de TiO₂; sin embargo, se observó que si la velocidad es menor de 1 m/s, el arrastre de las partículas era nulo y por consiguiente la visualización del flujo era deficiente. Para contrarrestar esto se implementó al circuito de regulación de velocidad del ventilador, mediante un botón pulsador normalmente abierto entre la entrada de voltaje y el control permitiendo la activación manual del sistema, logrando inyectar las partículas por periodos intermitentes y no de forma continua. Con ellos se logró que las partículas entren al interior del contenedor con una velocidad relativamente alta por un corto periodo de tiempo, lo que repercute en una rápida desaceleración, de este modo

cuando las partículas llegaban a la zona de estudio, el flujo analizado no presenta distorsiones. El arreglo completo se muestra en la figura 8.

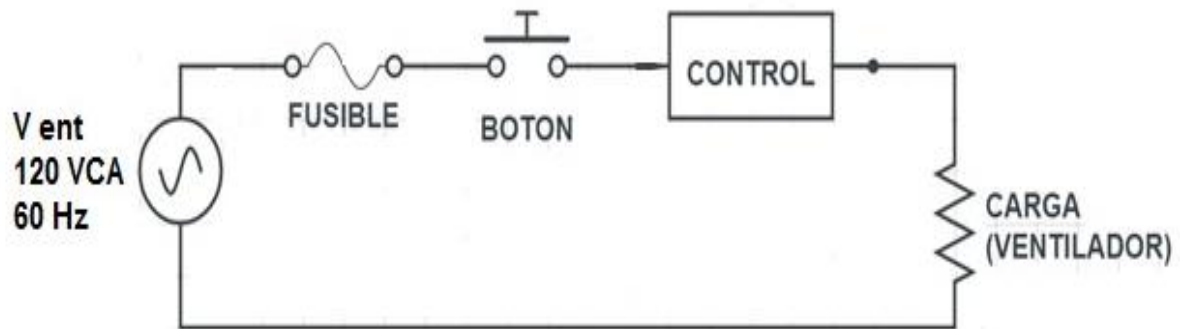


Figura 8. Circuito de control del sistema.

El sistema final completamente armado se muestra en la figura 9 y 10.

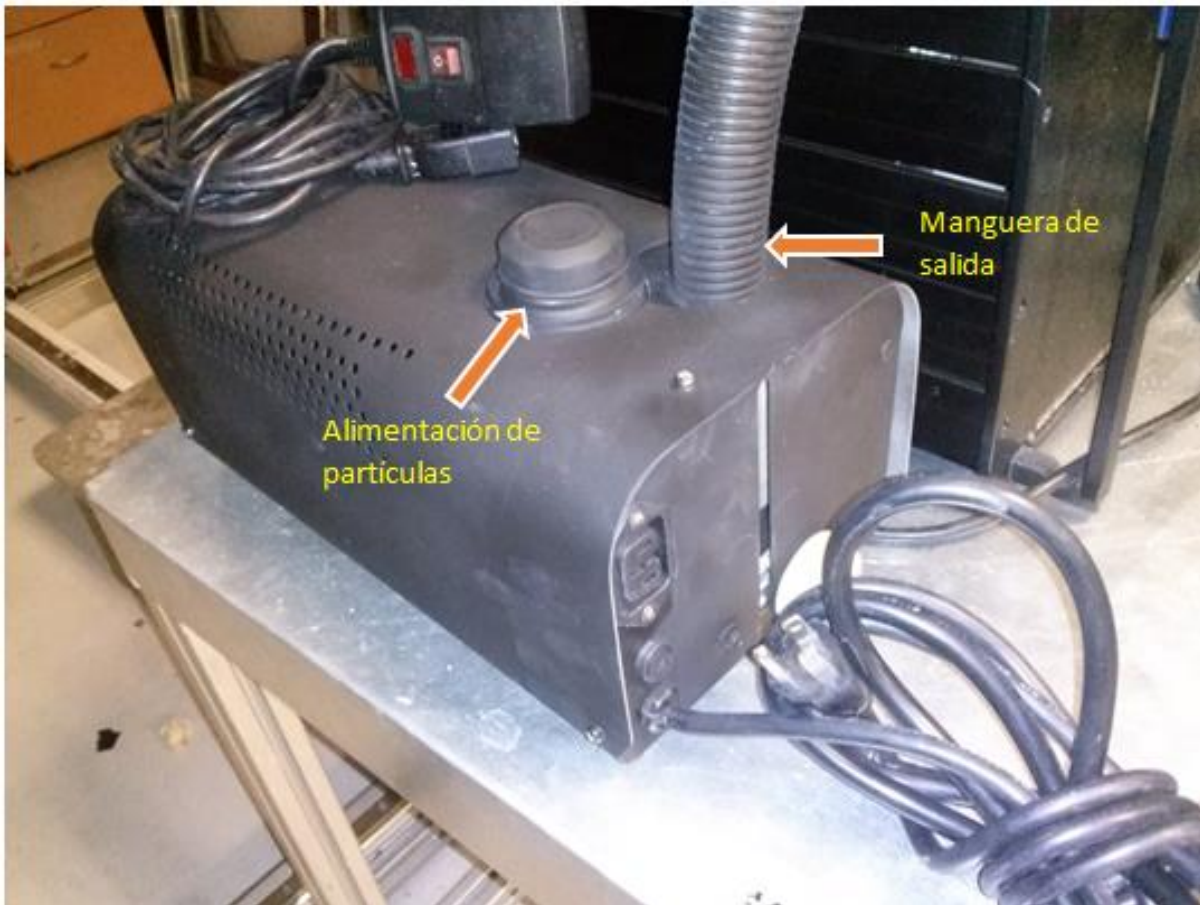


Figura 9. Sistema de inyección completo.



Figura 10. Vista frontal del sistema desarrollado con sus conexiones correspondientes.

Se llevaron a cabo una serie de pruebas para verificar el correcto funcionamiento del dispositivo, con el equipo PIV colocado en posición como se muestra en la figura 11 para que se tomaran las imágenes del flujo en movimiento dentro del contenedor. Para obtener buenas visualizaciones con el equipo es necesario que el láser pueda proveer un potente haz de luz, el láser trabaja en rangos de 0 a 5 V en corriente directa (cd), es por ello que se ajustó a su máximo valor de 5 V con el que se obtuvieron las imágenes, el tiempo de duración de las pruebas fue de 1 minuto, desde que se realiza la inyección de partículas en polvos finos dentro del contenedor hasta que estos llegan a la zona de visualización y se distribuyen en toda la cavidad

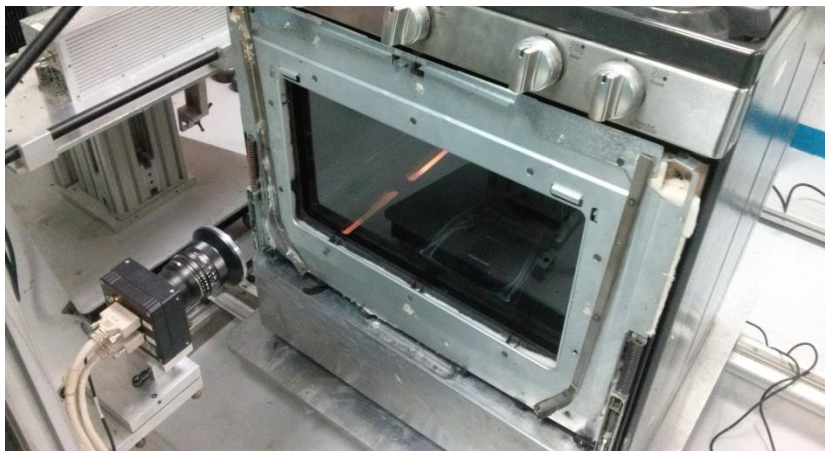


Figura 11. Colocación del equipo PIV para la adquisición de imágenes.

Las imágenes obtenidas mediante el equipo PIV muestran que el flujo tiende a moverse de las zonas más calientes hacia las más frías en el interior de la cavidad del contenedor, es decir el flujo sale por las ranuras situadas en el piso de la cavidad y se direcciona hacia arriba por los laterales, al llegar al techo, este baja hacia el centro formando vórtices como se muestra en la figura 12 a) y 12 b) ,

esta situación se observó cuando la cámara está localizada en el frente del contenedor y el láser ilumina por el lateral.

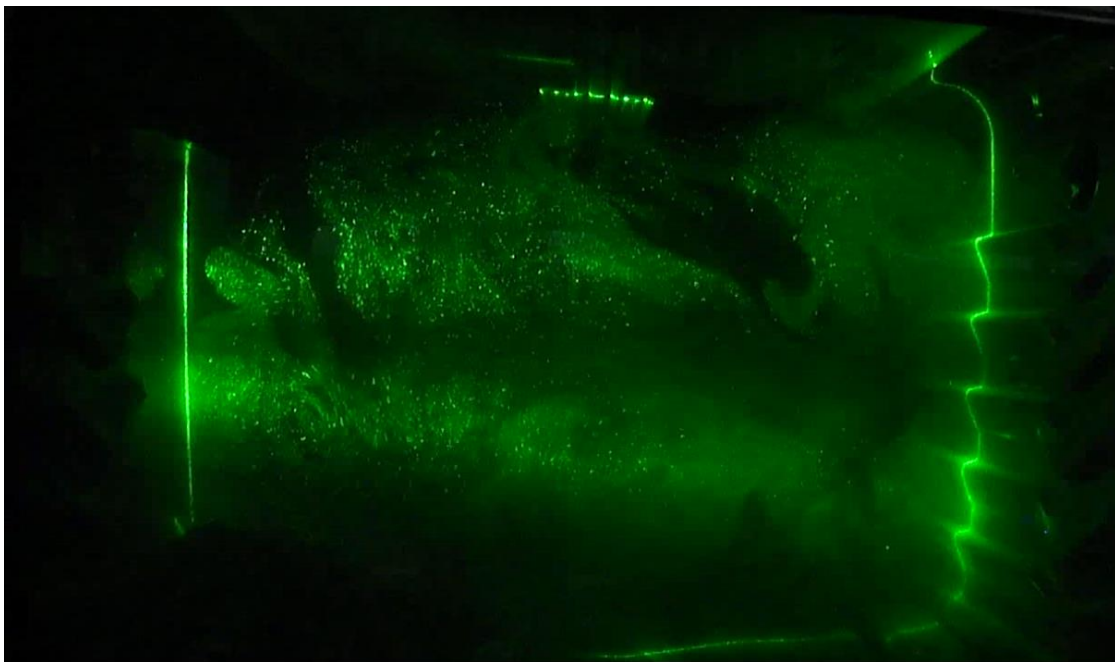
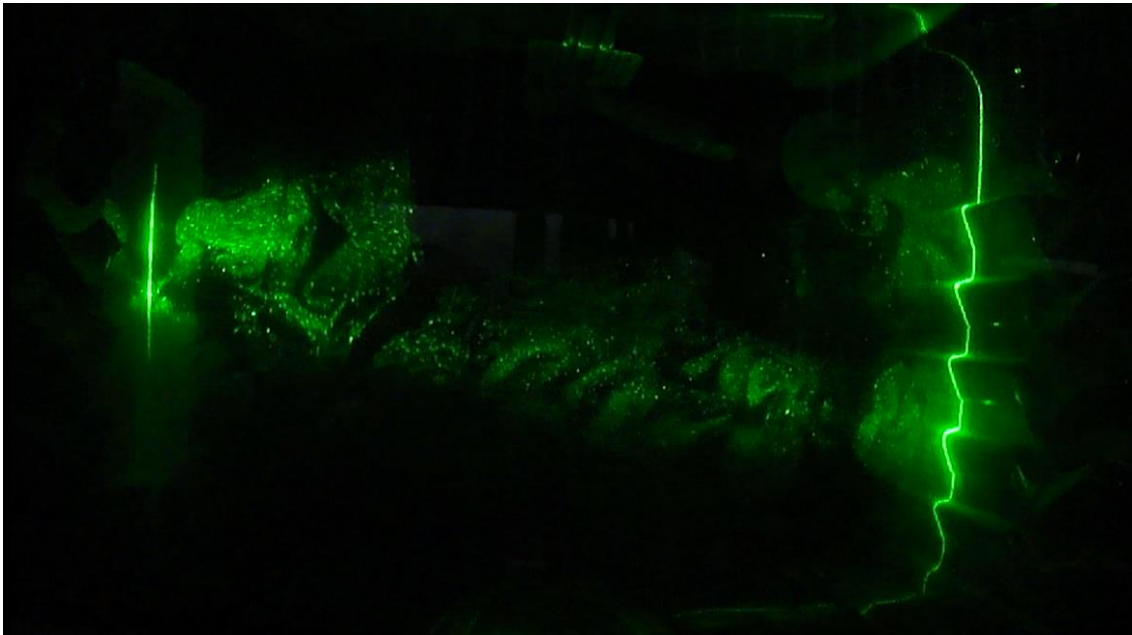


Figura 12. a) Visualización del flujo del contenedor visto de frente, se ve el flujo saliendo por las ranuras del piso del contenedor (arriba) y b) se observa cuando comienza a saturarse la cavidad del contenedor de partículas de TiO_2 (abajo)

Para la obtención de las imágenes, la cámara se colocó a un costado del contenedor y un haz de luz láser se hizo incidir por el frente donde está localizada la puerta; como resultado de esto se

observó que el flujo de aire caliente sube desde el piso, mostrando una tendencia de movimiento desde la parte trasera del contenedor hacia el frente. Se observó también durante el movimiento del flujo la formación de vórtices como se muestra en la figura 13.

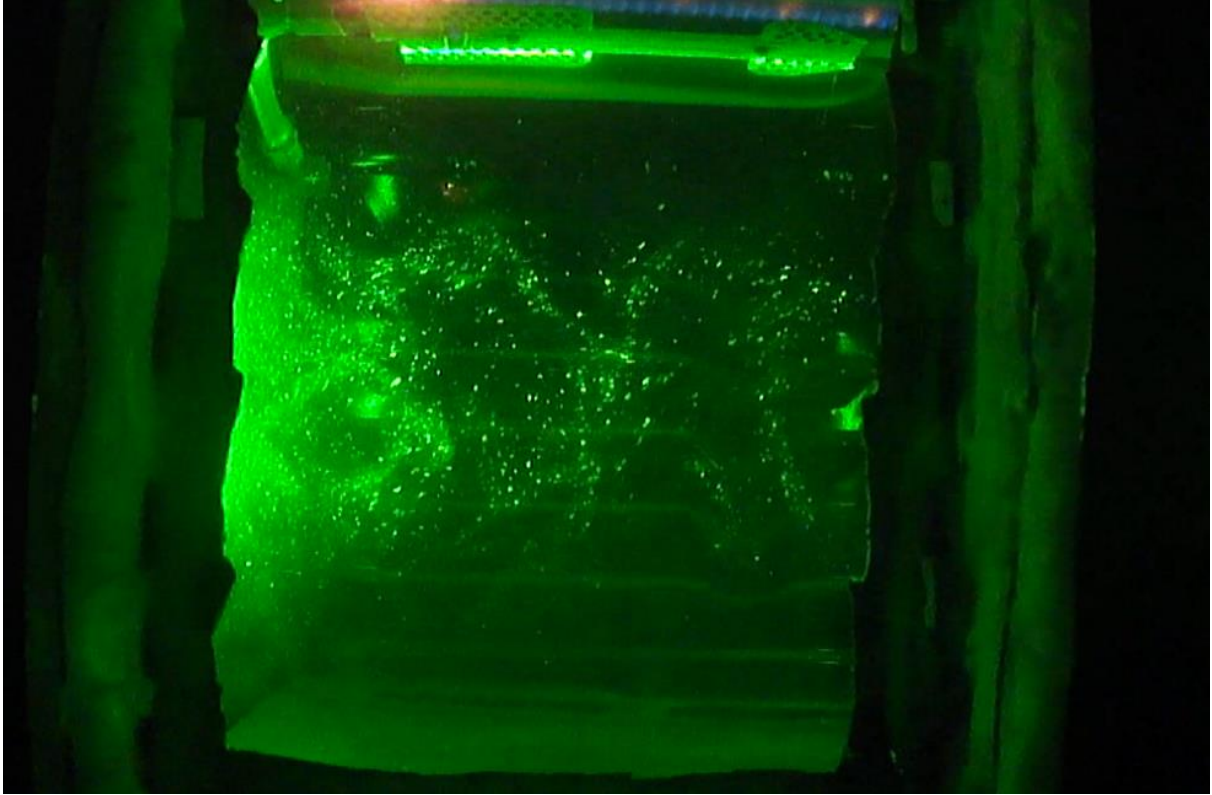


Figura 13. Flujo interno visto desde el lateral en movimiento.

El movimiento generado demuestra que se obtiene una distribución uniforme de flujo dentro del contenedor con lo cual se concluye que la distribución de las partículas en el interior será uniforme en un lapso de tiempo de 17 segundos aproximadamente. En el caso de los vórtices encontrados, estos podrían atribuirse a la geometría del contenedor; lo cual será evaluado con modificaciones futuras de esta.

4. Conclusiones

El equipo desarrollado muestra un buen comportamiento en la inyección de partículas en forma de polvos finos ante ambientes de convección natural, lo cual se atribuye a que la inyección de partículas no excede la velocidad de 2 m/s al momento de que estas se incorporan, logrando una distribución uniforme dentro del contenedor y sin distorsiones del flujo.

Después del proceso iterativo de diseño del sistema se encontró que para evitar una distorsión del flujo estudiado, la geometría necesaria de la salida del sistema desarrollado presenta una forma rectangular y un deflector interno con una inclinación de 7 grados.

Se encontró que el tamaño promedio de partículas de TiO_2 , para la visualización de flujo dentro de contenedores trabajando en ambientes de convección natural y un rango de velocidad de inyección de 1 a 2 m/s, es de 100 nm.

Las visualizaciones de flujo obtenidas, sirven para corroborar el comportamiento de flujo de calor dentro de los contenedores operando en un rango de temperaturas de 246 a 260 °C, ya que solo se había observado esa condición mediante análisis térmicos de software CAE, corroborando que el flujo tiende a moverse de las zonas frías hacia las de mayor temperatura.

En trabajos futuros el sistema desarrollado puede ser viable de implementar no solo en ambientes de altas temperaturas, si bien es cierto que fue desarrollado específicamente para cumplir con esta condición, también a bajas temperaturas puede ser trabajado mediante la elección adecuada de las partículas a inyectar, ya que cada ambiente de trabajo muestra condiciones físicas distintas.

Referencias

- [1] S. T. Wereley y C. D. Meinhart. "Recent advances in micro-particle image velocimetry." *Annu. Rev. Fluid Mech*, vol. 42, pp. 557–76, sep. 2010.
- [2] A. Melling. "Tracer particles and seeding for particle image velocimetry." *Meas. Sci. Technol*, vol. 8, pp. 1406–1416, 1997.
- [3] J. D. Martínez y F. J. González. "Velocimetría de imágenes de partículas basado en imágenes digitales," [online]. Mexico: Instituto de Investigación en Comunicación Óptica. Disponible en: <https://www.cenam.mx/memsimp06/Trabajos%20Aceptados%20para%20CD/Posters/P-15.pdf>
- [4] X. Cao, J. Liu, N. Jiang y Q.Chen. "Particle image velocimetry measurement of indoor airflow field: A review of the technologies and applications." *Energy and Buildings*, vol. 69, pp. 367–380, 2014.
- [5] O. Duran. "Introducción a la técnica P.I.V. para la medición de flujo." 2015. Disponible en: <http://www.redicces.org.sv/jspui/bitstream/10972/2124/1/2.%20Introduccion%20a%20la%20tecnica%20piv%20para%20la%20mediacion%20de%20flujo.pdf>.
- [6] S. Gallarini. "Design and commissioning of a Laser Doppler Velocimetry seeding system for non-ideal fluid flows." Tesis de maestría en ciencias. Departamento de ingeniería, Politécnico de Milano. 2015.
- [7] M. B. Frish y V. G. Pierce. "High temperature LDV seed particle development." Physical Sciences, Inc. Andover, Massachusetts. 1989.
- [8] G. N. Hernández. "Adquisición, almacenamiento y procesamiento de imágenes obtenidas con un sistema velocimetría por imágenes de partículas de dimensiones reducidas para el estudio de la convección natural en cilindros pequeños." Tesis de maestría en ingeniería, Centro de ciencias aplicadas y desarrollo tecnológico, UNAM, 2012.
- [9] Resultados de simulaciones termicas. mabe TyP. 2016
- [10] A. P. García. "Estudio de las inestabilidades de combustión en un quemador estabilizado por giro mediante velocimetría por imagen de partículas (piv)." Proyecto de fin de carrera. Departamento de ingeniería técnica y de fluidos, Universidad carlos III de Madrid, 2010.
- [11] C. Fang, L. Hong, Y. Zifeng y H. Hui. "Tracking characteristics of tracer particles for PIV measurements in supersonic flows." [online] *Chin J Aeronaut*, 2017. Disponible en: <http://dx.doi.org/10.1016/j.cja.2016.12.033>