



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO

Tecnológico Nacional de México

**Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico**

Tesis de Maestría

**Análisis y estudio de un sistema de aspersión
basado en el principio de efecto Venturi para
drones dedicados a la agricultura**

presentada por

Ing. Carlos Daniel Urbina Alonso

como requisito para la obtención del grado
de

Maestro en Ciencias de la Ingeniería

Director de tesis

Dr. Jarniel García Morales

Codirector de tesis

Dra. Marisol Cervantes Bobadilla

Cuernavaca, Morelos, México. Agosto de 2026.



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Subdirección Académica

Cuernavaca Mor, **19/junio/2026**

Oficio No. SAC/175/2026

Asunto: Autorización de impresión de tesis

CARLOS DANIEL URBINA ALONSO
CANDIDATO AL GRADO DE MAESTRO EN
CIENCIAS DE LA INGENIERÍA
P R E S E N T E

Por este conducto, tengo el agrado de comunicarle que el Comité Tutorial asignado a su trabajo de tesis titulado **"ANÁLISIS Y ESTUDIO DE UN SISTEMA DE ASPERSIÓN BASADO EN EL PRINCIPIO DE EFECTO VENTURI PARA DRONES DEDICADOS A LA AGRICULTURA"**, ha informado a esta Subdirección Académica, que están de acuerdo con el trabajo presentado. Por lo anterior, se le autoriza a que proceda con la impresión definitiva de su trabajo de tesis.

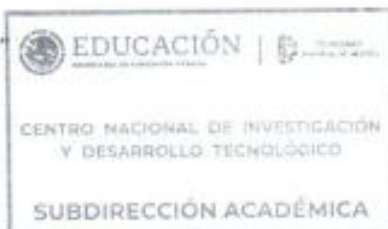
Esperando que el logro del mismo sea acorde con sus aspiraciones profesionales, reciba un cordial saludo.

ATENTAMENTE

Excelencia en Educación Tecnológica

"Conocimiento y Tecnología al servicio de México"

CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO



c.c.p. Coordinación de Ciencias de la Ingeniería
Departamento de Servicios Escolares

CMAZ/lmz



2026
año de
Margarita
Maza

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Interior Internado Palmira S/N, Col. Palmira,
C.P. 62490, Cuernavaca, Morelos Tel. 01 (777) 3627770, ext. 4106.
e-mail: acad_cenidet@tecnim.mx | cenidet.tecnim.mx



Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico
Coordinación de Ciencias de la Ingeniería

Cuernavaca, Mor., 16/06/2026

OFICIO No. MCI/055/2026
CENIDET-AC-004-M14-OFICIO

Asunto: Aceptación de documento de tesis

DR. CARLOS MANUEL ASTORGA ZARAGOZA
SUBDIRECTOR ACADÉMICO
PRESENTE

Por este conducto, los integrantes de Comité Tutorial de la estudiante **CARLOS DANIEL URBINA ALONSO**, con número de control M24CE104, de la Maestría en Ciencias de la Ingeniería, le informamos que hemos revisado el trabajo de tesis de grado titulado **"ANÁLISIS Y ESTUDIO DE UN SISTEMA DE ASPERSIÓN BASADO EN EL PRINCIPIO DE EFECTO VENTURI PARA DRONES DEDICADOS A LA AGRICULTURA"** y hemos encontrado que se han atendido todas las observaciones que se le indicaron, por lo que hemos acordado aceptar el documento de tesis y le solicitamos la autorización de impresión definitiva.


DR. JARNIEL GARCÍA MORALES
Director de tesis


DRA. MARISOL CERVANTES BOBADILLA
Codirector de Tesis


DR. HUGO ESTRADA ESQUIVEL
Revisor 1


DR. VITERVO LÓPEZ CABALLERO
Revisor 2

C.c.p. Depto. Servicios Escolares.
Expediente / Estudiante
RAVM/mbn



2026
100%
Margarita
Maza

cenidet
Centro Nacional de Investigación
y Desarrollo Tecnológico



Dedicatoria

A mis padres, Nicolasa y Santos, por ser el origen de mis sueños y enseñarme, con su amor y ejemplo, a perseverar ante cada desafío.

A mi hermano Marco Polo y a mis sobrinos, Jiady, Luna y Axel, por llenar mi vida de alegría y motivarme a seguir adelante.

A Andrea Alejandra, mi pareja, por su amor, paciencia y apoyo incondicional durante este camino.

Este logro también es de ustedes.

Agradecimientos

A la Secretaría de Ciencia, Humanidades, Tecnología e Innovación (SECIHTI) por el apoyo económico otorgado a través de la beca de maestría, que hizo posible la realización de mis estudios de posgrado y el desarrollo de la presente investigación.

Al Tecnológico Nacional de México (TecNM) y al Centro Nacional de Investigación y Desarrollo Tecnológico (CENIDET) por brindarme la oportunidad de cursar la Maestría en Ciencias de la Ingeniería y por contribuir a mi formación académica, científica y profesional. A mis directores de tesis, Dr. Jarniel García Morales y Dra. Marisol Cervantes Bobadilla, por su guía, paciencia y dedicación durante el desarrollo de esta investigación. Agradezco profundamente sus enseñanzas, observaciones, consejos, tiempo y la confianza que depositaron en mí, los cuales fueron fundamentales para fortalecer este trabajo y contribuir a mi crecimiento académico y profesional. Muchas gracias.

A los integrantes de mi comité revisor, Dr. Hugo Estrada Esquivel y Dr. Vitervo López Caballero, por sus comentarios, sugerencias y observaciones, que contribuyeron significativamente a enriquecer la calidad académica de esta investigación.

A mis queridos padres, Nicolasa A. D. y Santos U. C., por su amor, esfuerzo, sacrificio y apoyo incondicional a lo largo de mi vida. Gracias por creer siempre en mí y por inculcarme los valores que me han permitido superar cada desafío y alcanzar esta importante meta.

A mi hermano, Marco Polo U. A., por su compañía, confianza, apoyo constante y por alentarme a perseguir mis metas con perseverancia y dedicación.

A mis sobrinos, Jiady, Luna y Axel, cuya alegría, cariño e inocencia fueron una fuente de inspiración y motivación para continuar adelante y culminar esta importante etapa de mi vida.

A mi pareja, Andrea Alejandra L. B., por su invaluable apoyo moral, comprensión, paciencia y compañía durante todo este proceso. Gracias por estar presente en los momentos de mayor esfuerzo y por brindarme siempre palabras de aliento para seguir adelante.

A mis compañeros y amigos, Delvis, Alan, Elías y Ángel, por compartir conmigo esta etapa de formación, por su amistad, compañerismo y apoyo durante mi estancia en CENIDET, haciendo de esta experiencia un camino más enriquecedor y memorable.

A todos y cada uno de ustedes, mi más profundo agradecimiento por su apoyo, confianza y por formar parte de este logro, el cual también es suyo.

Resumen

Los sistemas de aspersión empleados en vehículos aéreos no tripulados para aplicaciones agrícolas suelen incorporar bombas eléctricas y otros componentes que incrementan el peso, la complejidad y la demanda energética del vehículo. Esta investigación tuvo como objetivo analizar y diseñar un sistema de aspersión pasivo basado en el efecto Venturi, capaz de aprovechar el flujo de aire disponible en un UAV agrícola para generar una disminución de presión que favorezca la succión de líquido desde un depósito. La metodología comprendió la identificación de variables físicas y parámetros operativos, el diseño asistido por computadora de siete configuraciones geométricas, su evaluación preliminar y la verificación numérica del diseño seleccionado mediante dinámica de fluidos computacional. El Diseño 7, constituido por un ducto convergente-divergente, una constricción de 64 mm, un ducto de succión inclinado y un depósito lateral, presentó la mejor correspondencia entre la región de presión reducida y la conexión del conducto de succión. Su comportamiento se evaluó mediante quince simulaciones monofásicas en SolidWorks Flow Simulation, con velocidades de entrada de entre 20 y 60 m/s, y un análisis multifásico complementario en ANSYS Fluent. Los resultados permitieron identificar un intervalo operativo favorable de 39.45 a 45 m/s. La mayor disminución de presión se obtuvo con una velocidad de entrada de 43.9 m/s, condición en la que se registró una presión estática mínima de 60 131.36 Pa y una velocidad máxima de 268.924 m/s en la constricción. El análisis a 40 m/s mostró la concentración y aceleración del flujo en la garganta, además de estructuras vorticosas y zonas de recirculación posteriores a esta región. Por encima de 45 m/s, el incremento de la presión en la constricción redujo las condiciones favorables para la succión. Se concluye que la geometría propuesta presenta viabilidad numérica para generar el gradiente de presión requerido y podría disminuir la dependencia de bombas eléctricas; sin embargo, es necesaria la construcción de un prototipo y su validación experimental para cuantificar el caudal succionado, la atomización y el desempeño real del sistema.

Palabras clave: efecto Venturi, aspersión pasiva, vehículos aéreos no tripulados, agricultura de precisión, dinámica de fluidos computacional.

Abstract

Spray systems used in unmanned aerial vehicles for agricultural applications typically incorporate electric pumps and other components that increase the vehicle's weight, complexity, and energy consumption. The objective of this research was to analyze and design a passive spraying system based on the Venturi effect, capable of harnessing the airflow available in an agricultural UAV to generate a pressure drop that facilitates the suction of liquid from a tank. The methodology included the identification of physical variables and operational parameters, computer-aided design of seven geometric configurations, their preliminary evaluation, and numerical verification of the selected design using computational fluid dynamics. Design 7, consisting of a convergent-divergent duct, a 64-mm constriction, an inclined suction duct, and a lateral tank, exhibited the best alignment between the reduced-pressure region and the suction duct connection. Its performance was evaluated using fifteen single-phase simulations in SolidWorks Flow Simulation, with inlet velocities ranging from 20 to 60 m/s, and a complementary multiphase analysis in ANSYS Fluent. The results identified a favorable operating range of 39.45 to 45 m/s. The greatest pressure drop was obtained at an inlet velocity of 43.9 m/s, a condition under which a minimum static pressure of 60,131.36 was recorded.

The analysis at 40 m/s revealed flow concentration and acceleration in the throat, as well as vortical structures and recirculation zones downstream of this region. Above 45 m/s, the increase in pressure at the constriction reduced the conditions favorable for suction. It is concluded that the proposed geometry is numerically viable for generating the required pressure gradient and could reduce reliance on electric pumps; however, a prototype must be built and experimentally validated to quantify the suction flow rate, atomization, and the system's actual performance.

Keywords: Venturi effect, passive spraying, unmanned aerial vehicles, precision agriculture, computational fluid dynamics.

Índice

Dedicatoria	I
Agradecimientos	II
Resumen	III
Abstract	IV
Lista de Tablas	VII
Lista de Figuras	VII
Capítulo 1. Introducción	1
1.1 Antecedentes del uso del efecto Venturi en sistemas de aspersión.....	2
1.2 Objetivos	3
1.2.1 General.....	3
1.2.2 Específicos	3
1.3 Metas	3
1.4 Justificación.....	3
1.5 Descripción del problema	4
1.6 Pregunta de investigación	5
1.7 Alcance	5
1.8 Organización del documento	5
Capítulo 2. Marco teórico	7
2.1 Agricultura de precisión	7
2.2 Vehículos aéreos no tripulados	7
2.2.1 Aplicaciones de los UAVs	8
2.2.2 Ventajas y limitaciones de los UAVs	8
2.3 Sistemas de aspersión en UAV agrícolas.....	9
2.4 Fundamentos de dinámica de fluidos	11
2.4.1 Principio de continuidad	11
2.4.2 Principio de Bernoulli	11
2.4.3 Presión estática, presión dinámica y presión total.....	12
2.4.4 Número de Reynolds	13
2.5 Principio del efecto Venturi	14
2.6 Relación aire-líquido en sistemas de aspersión.....	15
Capítulo 3. Estado del arte.....	16
3.1 UAVs en la agricultura de precisión.....	16
3.2 Sistemas de aspersión en UAVs	17
3.3 Consumo energético de los sistemas de aspersión en UAVs	19
3.4 Aplicación del principio del efecto Venturi en diferentes dispositivos	20
3.5 Modelado y simulación CFD de sistemas Venturi y flujos de aire-líquido.....	22
3.6 Discusión del estado del arte.....	24
Capítulo 4. Diseño del sistema de aspersión	30
4.1 Caracterización del caso de estudio	30

4.1.1 Particularización del caso de estudio	31
4.1.2 Variables, propiedades y parámetros considerados en el diseño	32
4.1.3 Condiciones físicas y operativas del sistema	33
4.2 Metodología de solución.....	35
4.3 Desarrollo y evaluación preliminar de las configuraciones geométricas propuestas	37
4.4 Selección del diseño adecuado	40
Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados del sistema de aspersión.....	43
5.1 Condiciones generales de simulación	43
5.1.1 Condiciones del análisis monofásico en SolidWorks Flow Simulation	43
5.1.2 Condiciones del análisis multifásico en ANSYS Fluent	46
5.2 Resultados generales de las simulaciones monofásicas y determinación de los rangos operativos.....	46
5.2.1 Comportamiento de la velocidad en la constricción.....	47
5.2.2 Comportamiento de la presión estática en la constricción.....	48
5.2.3 Determinación de los rangos operativos	49
5.3 Análisis de casos representativos en SolidWorks Flow Simulation	51
5.3.1 Caso a baja velocidad del flujo de aire: 20 m/s	51
5.3.2 Caso dentro del intervalo favorable: 40 m/s	53
5.3.3 Caso dentro del intervalo favorable: 43.9 m/s	56
5.3.4 Caso a alta velocidad del flujo de aire: 60 m/s	58
5.4 Resultados del análisis multifásico en ANSYS Fluent.....	60
5.4.1 Justificación del caso multifásico seleccionado	60
5.4.2 Comportamiento aire-líquido a 40 m/s	61
Capítulo 6. Conclusiones	64
Capítulo 7. Bibliografía.....	67
Capítulo 8. Anexos	76
Anexo A. Evaluación preliminar de los diseños	76
Anexo B. Especificaciones técnicas del sistema de aspersión	83

Lista de Tablas

Tabla 1. Características energéticas de sistemas de pulverización aérea no tripulados..	10
Tabla 2. Síntesis comparativa de los trabajos revisados y su relación con la presente investigación.....	26
Tabla 3. Variables, propiedades y parámetros considerados en el diseño del sistema de aspersión.....	32
Tabla 4. Características físicas del líquido a asperjar.....	33
Tabla 5. Condiciones físicas y operativas del sistema de aspersión.....	34
Tabla 6. Resumen de las etapas metodología de solución.....	36
Tabla 7. Comparación geométrica y evaluación preliminar de los diseños propuestos....	39
Tabla 8. Características principales del diseño seleccionado.....	41
Tabla 9. Condiciones generales para realizar simulaciones CFD.....	43
Tabla 10. Parámetros de velocidades del flujo de aire de las toberas del fuselaje del UAV obtenidos en simulaciones CFD.....	44
Tabla 11. Resultados de parámetros obtenidos en el ducto de aspersión a partir de simulaciones CFD.....	47
Tabla 12. Clasificación de los rangos operativos del sistema de aspersión.....	49

Lista de Figuras

Figura 1. Empleo de un dron en labores de fumigación, (Ríos Hernández, 2021).....	1
Figura 2. Línea del tiempo de patentes relacionadas con el uso del efecto Venturi en sistemas de aspersión.....	2
Figura 3. Dron Yamaha RMAX desempeñando tareas de fumigación, (del Cerro, 2021)..	7
Figura 4. Tipos de aplicación de los UAVs, (Hassanalian y Abdelkefi, 2017).....	8
Figura 5. Representación esquemática del principio del efecto Venturi.....	15
Figura 6. Sistema de aspersión pasivo acoplado en tobera de fuselaje especial de un UAV.....	31
Figura 7. Metodología de solución para el diseño y evaluación del sistema de aspersión.....	35
Figura 8. Partes geométricas de los seis diseños preliminares del sistema de aspersión.....	¡Error! Marcador no definido.
Figura 9. Configuración geométrica correspondiente al Diseño 7.....	41
Figura 10. Regiones de análisis para la obtención de parámetros aerodinámicos en el ducto de tipo Venturi.....	45
Figura 11. Gráfica de dispersión de la velocidad máxima del flujo de aire en la constricción del ducto Venturi en función de la velocidad de entrada.....	48
Figura 12. Gráfica de dispersión de la presión estática mínima generada en la constricción del ducto Venturi en función de la velocidad de entrada.....	49
Figura 13. Distribución de velocidades del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 20 m/s. a) Campo de velocidades (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de velocidad.....	52

Figura 14. Distribución de presiones del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 20 m/s. a) Campo de presiones (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de presiones.	53
Figura 15. Distribución de velocidades del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 40 m/s. a) Campo de velocidades (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de velocidad.....	54
Figura 16. Distribución de presiones del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 40 m/s. a) Campo de presiones (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de presiones.	55
Figura 17. Distribución de velocidades del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 43.9 m/s. a) Campo de velocidades (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de velocidad.....	57
Figura 18. Distribución de presiones del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 43.9 m/s. a) Campo de presiones (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de presiones.	58
Figura 19. Distribución de velocidades del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 60 m/s. a) Campo de velocidades (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de velocidad.....	59
Figura 20. Distribución de presiones del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 60 m/s. a) Campo de presiones (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de presiones.	60
Figura 21. Distribución general de líneas de corriente coloreadas por magnitud de velocidad del flujo de aire en el ducto Venturi para una velocidad de entrada de 40 m/s.	61
Figura 22. Incremento de la velocidad del flujo en la garganta del ducto Venturi evidenciado mediante líneas de corriente a 40 m/s.	62
Figura 23. Desarrollo de estructuras vorticosas en la cámara inferior del sistema de aspersión inducidas por la expansión del flujo a 40 m/s.....	62
Figura 24. Distribución del flujo de aire en el conducto lateral del sistema con presencia de zonas de baja velocidad a 40 m/s.	63
Figura 25. Patrón global del flujo de aire dentro del sistema de aspersión mostrando la interacción entre el flujo principal y las zonas de recirculación a 40 m/s.	63
Figura 26. Distribución de velocidades y presiones del flujo de aire en el ducto Venturi correspondiente al Diseño 1.	77
Figura 27. Distribución de velocidades y presiones del flujo de aire en el ducto Venturi correspondiente al Diseño 2.	78
Figura 28. Distribución de velocidades y presiones del flujo de aire en el ducto Venturi correspondiente al Diseño 3.	79
Figura 29. Distribución de velocidades y presiones del flujo de aire en el ducto Venturi correspondiente al Diseño 4.	80
Figura 30. Distribución de velocidades y presiones del flujo de aire en el ducto Venturi correspondiente al Diseño 5.	81
Figura 31. Distribución de velocidades y presiones del flujo de aire en el ducto Venturi correspondiente al Diseño 6.	82
Figura 32. Vista de trayectorias del flujo de aire.....	83

Figura 33. Vista de corte del flujo de aire.	83
Figura 34. Vista de trayectorias de la presión estática.	83
Figura 35. Vista de corte de la presión estática.	83
Figura 36. Dibujo técnico 1 del sistema de aspersión.	84
Figura 37. Dibujo técnico 2 del sistema de aspersión.	84

Capítulo 1. Introducción

El uso de Vehículos Aéreos no Tripulados (UAV, del inglés: Unmanned Aerial Vehicle) en la agricultura de precisión ha demostrado ser una herramienta para mejorar diversas tareas relacionadas con el monitoreo de cultivos y la aplicación de insumos agrícolas, como se muestra en la Figura 1. Los Sistemas de Pulverización Aérea no Tripulados (UASS, del inglés: Unmanned Aerial Spraying Systems) se han convertido en una herramienta tecnológica para realizar la aplicación de fertilizantes, herbicidas y pesticidas en campos agrícolas, reduciendo así la exposición directa del agricultor y favoreciendo una aplicación más controlada. Sin embargo, aún presentan limitaciones asociadas a la autonomía de vuelo, la carga útil, el volumen del depósito y la demanda energética de los subsistemas incorporados, como es el caso del sistema de aspersión convencional, debido a que incorpora bombas eléctricas, inyectores, tuberías, boquillas y elementos de control que incrementan la complejidad electromecánica, los cuales influyen en la eficiencia global del UAV.

Este problema reduce la productividad y aumenta los costos operativos, al requerir recargas frecuentes o drones de mayor tamaño. En este trabajo se analiza una alternativa de aspersión pasiva basada en el principio del efecto Venturi, la cual consiste en estudiar si el flujo de aire disponible en un UAV agrícola puede ser aprovechado para generar una disminución de presión en un ducto de tipo Venturi el cual se caracteriza por tener una sección convergente-divergente, capaz de inducir la succión de un líquido desde un depósito. El trabajo se enfoca en el análisis físico del diseño geométrico y la evaluación numérica del sistema mediante simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD, del inglés: Computational Fluid Dynamics), con el propósito de determinar si la geometría propuesta genera condiciones favorables para la succión y aspersión del líquido en particular un agroquímico.



Figura 1. Empleo de un dron en labores de fumigación, (Ríos Hernández, 2021).

1.1 Antecedentes del uso del efecto Venturi en sistemas de aspersión

El efecto Venturi ha sido utilizado en diversos sistemas de aspersión y mezcla de fluidos debido a que la reducción del área transversal en un ducto provoca un incremento en la velocidad del fluido y una disminución de la presión estática, permitiendo inducir la entrada de un segundo fluido. Su aplicación se ha extendido a sistemas de aspersión aérea, equipos agrícolas, dispositivos de limpieza, pulverizadores cosméticos, boquillas electrostáticas y dispositivos de mezcla para vehículos aéreos no tripulados.

Con el propósito de identificar la evolución tecnológica del uso del efecto Venturi en sistemas de aspersión, se realizó una revisión de patentes relacionadas con mecanismos de succión, atomización, mezcla y aplicación de líquidos. En la Figura 2, se presenta una línea del tiempo con las patentes consultadas, ordenadas cronológicamente.

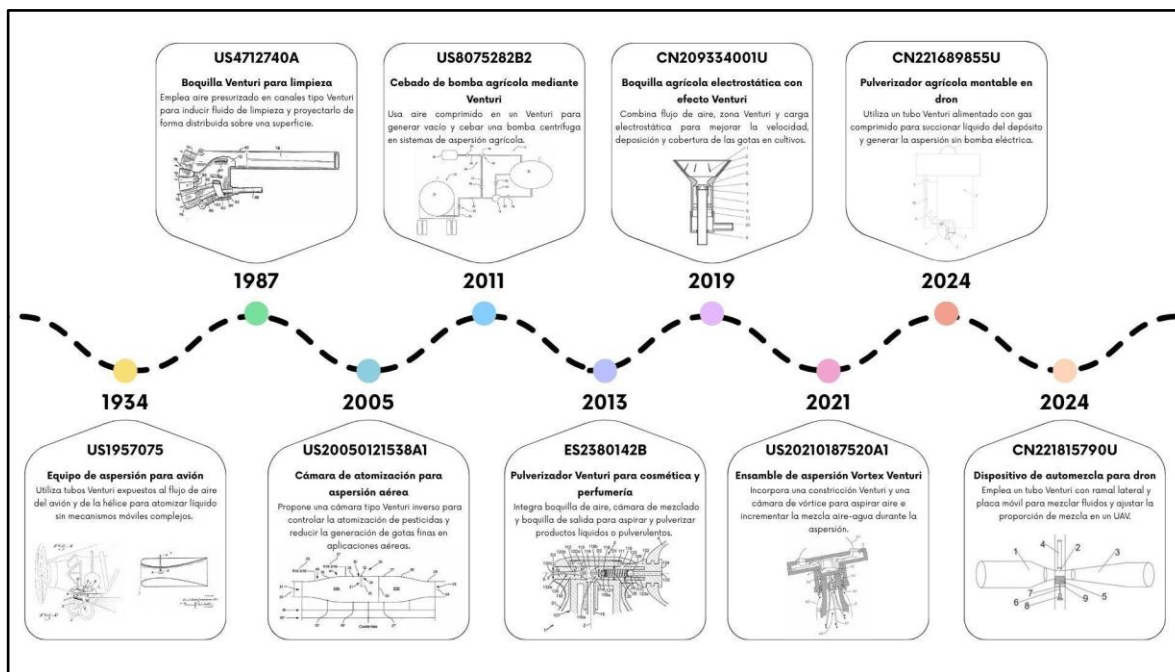


Figura 2. Línea del tiempo de patentes relacionadas con el uso del efecto Venturi en sistemas de aspersión.

A partir de la línea del tiempo se observa que el efecto Venturi ha evolucionado desde aplicaciones de aspersión aérea y dispositivos de limpieza hasta sistemas agrícolas, boquillas electrostáticas, cámaras de vórtice y soluciones orientadas a drones.

Las patentes revisadas muestran que este principio puede emplearse para aspirar, atomizar, mezclar y dispersar fluidos, sin embargo, la mayoría de los desarrollos dependen de fuentes externas de energía o de suministro, tales como aire comprimido, bombas eléctricas, tanques presurizados o subsistemas adicionales.

De acuerdo a los sistemas identificados no se encontró un desarrollo orientado a un dron agrícola que aproveche directamente el flujo de aire disponible en el UAV para inducir la succión del líquido mediante un ducto de tipo Venturi, por tal motivo la presente investigación retoma este principio físico como base para analizar y diseñar un sistema de aspersión pasivo, orientado a reducir la dependencia de bombas eléctricas e inyectores presurizados y componentes electromecánicos adicionales dentro del sistema de aspersión de un UAV.

1.2 Objetivos

1.2.1 General

Analizar y diseñar un sistema de aspersión basado en el principio del efecto Venturi, el cual forme parte de un UAV dedicado a la agricultura.

1.2.2 Específicos

- Obtener las principales variables del sistema de aspersión, a partir del análisis de metodologías referentes a sistemas de pulverización aérea no tripulados.
- Definir la relación aire-flujo adecuada para la efectividad del sistema de aspersión.
- Diseñar el ducto del sistema de aspersión en un software especializado para obtener una diferencia de presión aprovechando al máximo el flujo de aire.
- Analizar y evaluar el sistema de aspersión propuesto, mediante un software especializado.

1.3 Metas

Obtener un diseño geométrico de un sistema de aspersión basado en el principio del efecto Venturi, evaluado mediante simulaciones CFD que permitan identificar las condiciones de operatividad con el objetivo de favorecer una succión del líquido y así realizar tareas de aspersión, con enfoque a la agricultura de precisión.

1.4 Justificación

El uso de UAV en la agricultura de precisión es una herramienta valiosa para aumentar la eficiencia en la gestión de cultivos y la aplicación de agroquímicos, los UAVs agrícolas han adquirido importancia en el sector agrícola debido a su capacidad para operar en zonas de difícil acceso, aplicar agroquímicos de manera localizada y disminuir la exposición directa del agricultor. Sin embargo, uno de los principales desafíos es la limitada autonomía de vuelo debido a la carga útil, la complejidad de los subsistemas y el consumo energético de los sistemas de aspersión tradicionales, debido a que el líquido suele ser impulsado

mediante bombas eléctricas o mecanismos presurizados, lo que incrementa la cantidad de componentes y el peso del sistema. Por tal motivo es pertinente explorar alternativas de aspersión que aprovechen principios físicos y que permitan simplificar la arquitectura del sistema.

El efecto Venturi representa una alternativa de interés debido a que permite inducir la succión de un fluido secundario a partir de la disminución de presión generada en la constricción de un ducto, este principio ha sido utilizado en boquillas de inducción de aire, sistemas de mezcla e inyectores agrícolas, a pesar de ello, su aplicación como sistema de aspersión pasivo integrado a un UAV agrícola requiere analizar si el flujo de aire disponible puede generar una depresión suficiente para inducir el movimiento del líquido.

Por esta razón la presente investigación se justifica en la necesidad de estudiar el enfoque de diseño y simulación numérica, el trabajo no pretende demostrar de manera experimental una reducción total del consumo energético del UAV, sino evaluar si la geometría propuesta puede generar condiciones de presión estática y velocidades adecuadas para inducir la succión del líquido sin incorporar una bomba eléctrica en el sistema de aspersión.

1.5 Descripción del problema

En la agricultura de precisión los vehículos aéreos no tripulados han revolucionado el monitoreo y tratamiento de cultivos, permitiendo una gestión más eficiente de recursos como agua y agroquímicos. Un dron proporciona herramientas altamente adaptables y avanzadas con diversas aplicaciones. Un ejemplo notable es el Sistema de Pulverización Aérea no Tripulado, el cual realiza la aplicación de insumos agrícolas de manera eficiente y precisa, con el objetivo de proteger los cultivos y proporcionar nutrientes para un correcto crecimiento (Faiçal et al, 2017).

El uso de estas tecnologías en la agricultura de precisión aún enfrentan algunos retos relacionados con el tiempo de vuelo, la capacidad de carga, el volumen del depósito y la demanda energética de sus subsistemas. En aplicaciones de aspersión, el UAV debe transportar el líquido a aplicar, mantener la estabilidad durante el vuelo y accionar los componentes encargados de conducir y distribuir el fluido, por esta razón el sistema de aspersión no debe analizarse únicamente como un accesorio, sino como un subsistema que influye en la operación general del UAV.

Los sistemas de aspersión convencionales integran bombas eléctricas, tuberías, boquillas, sensores, actuadores o elementos de control que permiten regular el caudal y la distribución del líquido, aunque estos elementos cumplen una función importante en la aplicación

agrícola, también incrementan la complejidad del sistema y pueden contribuir al aumento de peso, mantenimiento y requerimientos energéticos.

A partir de la complejidad electromecánica de los sistemas de aspersión convencionales surge la necesidad de analizar si un sistema basado en el efecto Venturi puede inducir la succión de un líquido aprovechando el flujo de aire disponible en el UAV, permitiendo ofrecer una alternativa con el objetivo de reducir el mecanismo de conducción y aspersión del líquido.

El problema central de esta investigación consiste en determinar si una geometría de tipo Venturi puede generar una disminución de presión suficiente en la región de la constricción para favorecer la succión pasiva del líquido, considerando condiciones de operación compatibles con un sistema de sustentación de un UAV.

1.6 Pregunta de investigación

A partir de la problemática planteada se busca identificar las condiciones geométricas y operativas que permitan generar en el ducto de tipo Venturi una disminución de presión suficiente para inducir la succión pasiva del líquido, por tal motivo se plantea la siguiente pregunta de investigación:

¿Qué condiciones geométricas y operativas permiten generar una disminución de presión suficiente en un ducto tipo Venturi para inducir la succión pasiva de un líquido en un sistema de aspersión orientado a UAV agrícola?

1.7 Alcance

El alcance de esta investigación se centra en crear un modelo geométrico tridimensional de un sistema de aspersión para drones dedicados a la agricultura, con el desarrollo de un ducto de aspersión y la evaluación de su viabilidad para inducir zonas de presión a partir de un flujo de aire suministrado. La investigación se centrará en el diseño del sistema de aspersión en un software de Diseño Asistido por Computadora (CAD, del inglés: Computer-Aided Design), sin incluir la construcción física y excluyendo la fuente de aire, esta misma se considera como una condición de entrada para las simulaciones CFD.

1.8 Organización del documento

El presente documento se encuentra organizado en ocho capítulos, los cuales describen de manera secuencial el desarrollo de la investigación.

En el Capítulo 1, se presenta el planteamiento general de la investigación, se incluyen los antecedentes del uso del efecto Venturi en sistemas de aspersión, los objetivos, las metas, la justificación, la problemática, la pregunta de investigación y el alcance del trabajo.

En el Capítulo 2, se desarrolla el marco teórico que sustenta la investigación, se abordan conceptos relacionados con la agricultura de precisión, los vehículos aéreos no tripulados, los sistemas de aspersión empleados en UAV agrícolas y los fundamentos de dinámica de fluidos necesarios para comprender el funcionamiento del sistema propuesto, entre ellos el principio de continuidad, el principio de Bernoulli, los tipos de presión, el número de Reynolds, el principio del efecto Venturi y la relación aire-líquido.

En el Capítulo 3, se presenta el estado del arte, donde se analizan investigaciones relacionadas con la aplicación de UAV en la agricultura de precisión, los sistemas de aspersión empleados en vehículos aéreos no tripulados, el consumo energético de estos sistemas, las aplicaciones del efecto Venturi en dispositivos de succión, mezcla y pulverización, así como el uso de herramientas CFD para el estudio de ductos Venturi y flujos aire-líquido.

En el Capítulo 4, se describe el diseño del sistema de aspersión, en primer lugar se caracteriza el caso de estudio y se establecen las variables, propiedades, condiciones físicas y parámetros operativos considerados. Posteriormente, se presenta la metodología de solución, el desarrollo y la evaluación preliminar de las configuraciones geométricas propuestas y, finalmente, la selección del diseño adecuado para continuar con su verificación numérica.

En el Capítulo 5, se presentan y analizan los resultados obtenidos mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional, se describen las condiciones establecidas para los análisis monofásico y multifásico, se estudia el comportamiento de la velocidad y la presión estática en la constricción del ducto, y se determinan los rangos operativos del sistema.

En el Capítulo 6, se exponen las conclusiones generales de la investigación, se integran los principales hallazgos derivados del proceso de diseño y de las simulaciones CFD, se responde la pregunta de investigación y se presentan los alcances, limitaciones y aportaciones del trabajo, así como los trabajos futuros.

En el Capítulo 7, se reúne la bibliografía consultada y empleada para fundamentar el desarrollo teórico, metodológico y técnico de la investigación.

En el Capítulo 8, se presentan los anexos, los cuales contienen información complementaria sobre la evaluación numérica de las configuraciones geométricas desarrolladas y los dibujos técnicos del diseño seleccionado.

Capítulo 2. Marco teórico

En el presente capítulo se abordan los fundamentos teóricos necesarios para sustentar el análisis de un sistema de aspersión basado en el efecto Venturi, se contextualiza el uso de vehículos aéreos no tripulados en la agricultura de precisión y se describen las principales características de los sistemas de aspersión empleados en UAV, también se presentan los conceptos de dinámica de fluidos, presión, continuidad, principio de Bernoulli, número de Reynolds, efecto Venturi y relación aire-líquido, con el objetivo de establecer la base conceptual para el diseño y evaluación del sistema propuesto.

2.1 Agricultura de precisión

La agricultura de precisión es un proceso de modernización agrícola que busca la aplicación de la práctica correcta, en el lugar correcto, en el momento correcto y con la cantidad correcta de sustancias o agroquímicos, con el objetivo de mejorar la calidad de los cultivos (Tsouros *et al*, 2019)

2.2 Vehículos aéreos no tripulados

Si bien los vehículos aéreos no tripulados (UAV) comenzaron a utilizarse en el siglo XIX con fines militares, específicamente para vigilancia remota. Posteriormente, su desarrollo y adaptación se extendieron al sector civil, incluyendo la agricultura de precisión, donde se convirtieron en herramientas clave para monitoreo y otras aplicaciones (Ríos Hernández, 2021).

En la agricultura el primer modelo de UAV utilizado fue el helicóptero Yamaha RMAX, se introdujo para el control de plagas y el monitoreo de cultivos, como se muestra en la Figura 3 (Mogili y Deepak, 2018).



Figura 3. Dron Yamaha RMAX desempeñando tareas de fumigación, (del Cerro, 2021).

De acuerdo a la Asociación Internacional de Sistemas de Vehículos No tripulados (AUVSI, del inglés: Association for Unmanned Vehicle Systems International), en 2020 había más

de 2900 UAVs en más de 900 empresas que prestaban servicio en todo el mundo (del Cerro, 2021).

2.2.1 Aplicaciones de los UAVs

Los UAVs (Vehículos aéreos no tripulados) se clasifican según su propósito, como usos civiles, científicos o militares, y también en función de sus características, tales como el tamaño y la autonomía de vuelo (Hassanalian y Abdelkefi, 2017). En la Figura 4 se muestran los tipos de aplicaciones de los UAVs.

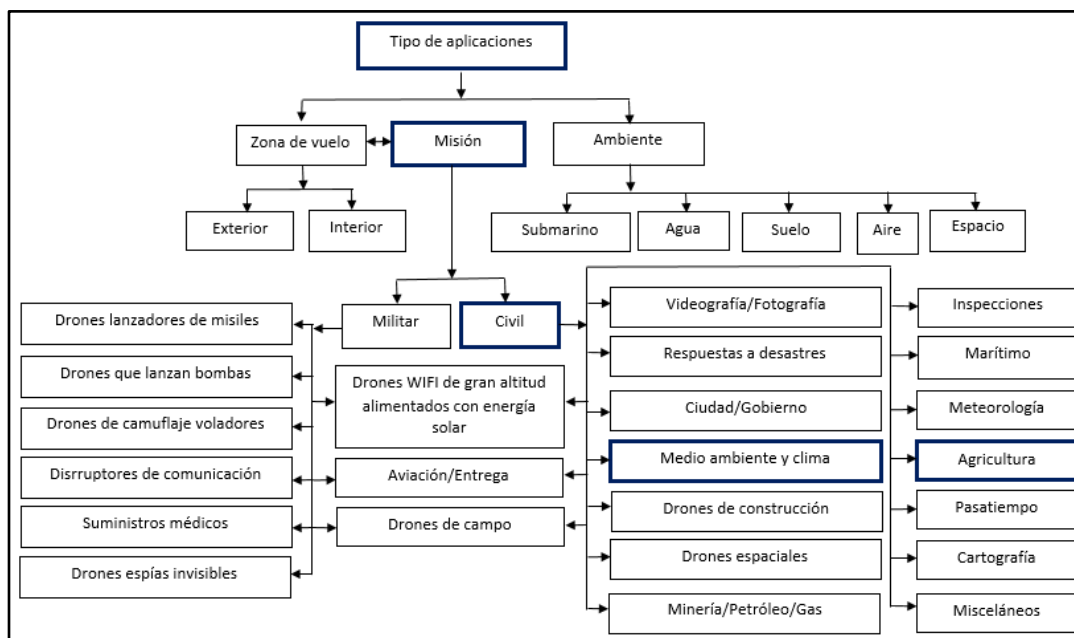


Figura 4. Tipos de aplicación de los UAVs, (Hassanalian y Abdelkefi, 2017).

Como se observa en la Figura 4, los vehículos aéreos no tripulados pueden emplearse en una amplia variedad de aplicaciones civiles, científicas y militares, entre las que se encuentran la inspección, la vigilancia, la respuesta ante desastres, el transporte de suministros y las actividades agrícolas, la presente investigación se delimita al estudio de los UAV utilizados en la agricultura de precisión y específicamente en el sistema de aspersión, con el objetivo de proponer otras alternativas para asperjar agroquímicos.

2.2.2 Ventajas y limitaciones de los UAVs

De acuerdo a la literatura revisada, se encontraron las siguientes ventajas y limitaciones del uso de UAVs.

Ventajas

- Monitoreo y toma de decisiones: los drones permiten el monitoreo preciso y rápido de grandes extensiones de cultivos, lo cual facilita la toma de decisiones informadas en tiempo real (Ríos Hernández, 2021).
- Reducción de costos: a comparación con métodos tradicionales de monitoreo y fumigación, los drones son más eficientes y pueden reducir costos operativos (Talaviya et al, 2020).
- Adaptabilidad y acceso: son idóneos para áreas de difícil acceso y no requieren pistas de aterrizaje especializadas (Shouji et al, 2021).
- Aplicación precisa: facilitan la aplicación de pesticidas, herbicidas y fertilizantes de forma controlada, minimizando desperdicios y reduciendo el impacto ambiental (Mogili y Deepak, 2018).
- Recolección de datos detallados: a partir de cámaras multiespectrales y térmicas, pueden identificar problemas como estrés hídrico, deficiencias de nutrientes y enfermedades de manera no invasiva (Zhang et al, 2019).

Limitaciones

- Limitaciones de carga útil y autonomía: los UAVs tienen restricciones en cuanto a la cantidad de carga que pueden transportar y el tiempo de vuelo debido a la capacidad limitada de las baterías (Talaviya et al, 2020).
- Condiciones climáticas: factores como el viento, la lluvia o las altas temperaturas pueden afectar su desempeño (Agüera et al, 2015).
- Costo inicial: los costos operativos son bajos, pero la adquisición de un dron y sus sensores suelen ser altos (Ríos Hernández, 2021).
- Capacitación y regulaciones: se requiere personal capacitado para operarlos y existen regulaciones estrictas que pueden limitar su uso (Talaviya et al, 2020).
- Problemas de deriva y deposición: durante la fumigación, el flujo de aire generado por los rotores puede causar una distribución desigual o una mayor deriva de las gotas (Shouji et al, 2021).

De las limitaciones señaladas, la carga útil, la autonomía de vuelo y los problemas de deriva son los aspectos más relacionados con esta investigación, debido a que el sistema de aspersión convencional incrementa la complejidad electromecánica del UAV y puede contribuir al consumo energético total.

2.3 Sistemas de aspersión en UAV agrícolas

En la Tabla 1, se presenta una comparación de las características energéticas y operativas de distintos sistemas de pulverización aérea no tripulados, se consideraron modelos

comerciales de los fabricantes DJI y XAG, detallando especificaciones como dimensiones, número y diámetro de rotores, capacidad de carga útil, peso con carga completa, tiempo de vuelo con una sola batería, tipo de batería y su capacidad, consumo eléctrico máximo y el sistema de pulverización (tipo de bomba y caudal máximo). Los modelos incluyen el T30 de DJI, y los V40, P40 y P100 PRO de XAG, destacando diferencias significativas en capacidad de carga y sistemas de pulverización.

Tabla 1. Características energéticas de sistemas de pulverización aérea no tripulados.

Sistemas de pulverización aérea no tripulados (UASS, del inglés: Unmanned Aerial Spraying Systems)									
Modelo, Fabricante	Ilustración y Dimensiones	Rotores "Número"/ diámetro (mm)"	Capacidad del depósito (kg)	Peso con carga completa (kg)	Tiempo de vuelo con una sola batería (minutos)	Batería UAV	Consumo eléctrico máximo total	Sistema de Pulverización: tipo de bomba de agua	Referencia
T30, DJI, 2021.		6 / 38	30	66.5	19.2	Modelo: BAX501. Capacidad: 29000 mAh. Voltaje: 51.8 V.	11 000 W	Bomba de pistón. Caudal máximo: 4 L/min.	(Kholodiu, 2022)
	2858 mm X 2685 mm X 790 mm								
V40, XAG, 2021.		2 / 47	16	44	16	Modelo: B13960S. Capacidad: 12000 mAh. Voltaje: 48.1 V.	5 500 W	Bombas peristálticas de impulsos de alta frecuencia. Caudal máximo: (5 L/min) x 2.	(Janosz, 2024)
	2795 mm X 828 mm X 731 mm								
P40, XAG, 2021.		4 / 40	20	45	10	Modelo: B13960S. Capacidad: 12000 mAh. Voltaje: 48.1 V.	5 500 W	Bombas peristálticas de impulsos de alta frecuencia. Caudal máximo: (5 L/min) x 2.	(Mamchur, 2023)
	2110 mm X 2127 mm X 555 mm								
P100 PRO, XAG.		-	50	-	17	Modelo: B13960S. 962 Wh	-	Bomba peristáltica dual. Caudal máximo: 22 L/min.	(Janosz, 2024)
	2487 mm X 2460 mm X 685 mm								

A partir de la comparación presentada en la Tabla 1, se observa que los UAV agrícolas comerciales integran depósitos de entre 16 y 50 kg, sistemas de bombeo con caudales de hasta 22 L/min y tiempos de vuelo limitados cuando operan con carga completa. Estos valores muestran que la autonomía del UAV está condicionada por la batería, la carga útil, el peso total, el sistema de propulsión y los componentes del sistema de aspersión.

2.4 Fundamentos de dinámica de fluidos

La dinámica de fluidos forma parte de la mecánica de fluidos y se enfoca en el estudio del comportamiento de los fluidos en movimiento, considerando la influencia de variables como la velocidad, presión, densidad, viscosidad y las fuerzas que actúan sobre el fluido. La mecánica de fluidos estudia el comportamiento de los fluidos tanto en reposo como en movimiento, y sus problemas se fundamentan en las ecuaciones de conservación de masa, cantidad de movimiento y energía (Timbadiya et al, 2023).

2.4.1 Principio de continuidad

El principio de continuidad expresa la conservación de la masa en un fluido en régimen permanente. Para un fluido incompresible que fluye por un conducto cerrado, el caudal volumétrico (Q) permanece constante en cualquier sección del ducto. Matemáticamente se expresa como se muestra en la Ecuación 1.

$$Q = A \cdot V = \text{es constante} \quad (1)$$

Donde:

A: es el área de la sección transversal del tubo.

V: es la velocidad promedio del fluido en esa sección.

Para dos secciones en un ducto, se cumple la Ecuación 2.

$$A_1 V_1 = A_2 V_2 \quad (2)$$

Donde:

A₁ = Área de la sección transversal de entrada del ducto (m²)

V₁ = Velocidad del flujo de aire en la entrada del ducto (m/s)

A₂ = Área de la sección transversal en la garganta del Venturi (m²)

V₂ = Velocidad del flujo de aire en la garganta del Venturi (m/s)

La ecuación de continuidad describe cómo la velocidad aumenta al reducir el área. En sistemas Venturi usados en inyectores agrícolas, este incremento puede situarse entre 2 y 4 veces respecto a la velocidad de entrada (Omary et al, 2021).

En el caso del dron, si el flujo descendente entrega 100 m/s en la zona de entrada, una relación geométrica típica $d/D = 0.5$ (Sureshkumar et al, 2013) implicaría una aceleración significativa capaz de inducir succión.

2.4.2 Principio de Bernoulli

El principio de Bernoulli establece que para un flujo estacionario, incompresible y con efectos viscosos despreciables, la energía mecánica del fluido se conserva a lo largo de

una línea de corriente. Su expresión general entre dos puntos del flujo considera la energía asociada con la presión estática, la velocidad y la altura, como se muestra en la Ecuación 3.

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 + \rho g z_1 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 + \rho g z_2 \quad (3)$$

Donde:

P = Presión estática del fluido

ρ = Densidad del fluido

V = Velocidad del fluido

g = Aceleración de la gravedad

z = Altura respecto a un nivel de referencia

En el sistema analizado la diferencia de altura entre la sección de entrada y la constricción es pequeña en comparación con las variaciones de presión y velocidad del flujo. Por esta razón, se considera que $z_1 \approx z_2$, por lo que los términos de energía potencial gravitatoria pueden cancelarse, bajo esta consideración el principio de Bernoulli se expresa de manera simplificada mediante la Ecuación 4:

$$P_1 + \frac{1}{2}\rho V_1^2 = P_2 + \frac{1}{2}\rho V_2^2 \quad (4)$$

Donde:

P_1 = Presión estática del flujo de aire en la entrada del ducto (Pa)

ρ = Densidad del fluido de aire que circula por el ducto (kg/m^3)

V_1 = Velocidad del flujo de aire en la entrada del ducto (m/s)

P_2 = Presión estática en la garganta del Venturi (Pa)

V_2 = Velocidad del flujo de aire en la garganta del Venturi (m/s)

La caída de presión en la constricción es un fenómeno fundamental del Venturi. Estudios experimentales en boquillas agrícolas y en Venturi industriales reportan que la depresión generada puede oscilar entre 3 kPa y 20 kPa según la velocidad y geometría (Halonen et al, 2020; Kumar et al, 2014).

2.4.3 Presión estática, presión dinámica y presión total

La presión estática (P_s) representa la presión termodinámica real del fluido y es la fuerza que ejerce un fluido sobre las paredes del recipiente que lo contiene, mientras que la presión dinámica (q) está asociada con la energía cinética por unidad de volumen y se expresa como $q = \frac{1}{2}\rho V^2$ del flujo. La suma de ambas corresponde a la presión total o presión de estancamiento, es decir la presión que alcanzaría el fluido si fuera desacelerando

idealmente hasta una velocidad de cero, como se muestra en la Ecuación 5 (Çengel y Cimbala, 2014).

$$P_{est} = P_s + q = P_s + \frac{1}{2}\rho V^2 \quad (5)$$

Donde:

P_{est} = Presión de estancamiento o presión total (Pa)

P_s = Presión estática (Pa)

q = Presión dinámica (Pa)

ρ = Densidad del fluido (kg/m³)

V = Velocidad local del fluido (m/s)

Para el sistema de aspersión propuesto la presión de mayor interés es la presión estática en la constricción, debido a que debe ser menor que la presión existente en el depósito del líquido para generar un gradiente de presión, cuando se cumpla esta condición la diferencia de presión puede favorecer al desplazamiento del líquido a través del ducto de succión y su posterior incorporación al flujo principal de aire.

2.4.4 Número de Reynolds

El número de Reynolds (Re) es un parámetro adimensional que caracteriza el régimen del flujo. Se expresa en la Ecuación 6.

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (6)$$

Donde:

ρ = Densidad del fluido de aire en la región del ducto donde se evalúa (kg/m³)

V = Velocidad característica del flujo (m/s)

D = Diámetro hidráulico del ducto o de la garganta del Venturi (m)

μ = Viscosidad dinámica del aire (Pa · s)

Para obtener el objetivo deseado (una inducción efectiva), el flujo en la constricción del Venturi debe ser turbulento con valores de $Re > 4000$, típicos en inyectores agrícolas (Zhang et al, 2023), mientras que el flujo del dron, con velocidades que pueden variar entre los 60 a 100 m/s, fácilmente supera $Re = 10^6$ garantizando así una turbulencia y un mezclado adecuado.

2.5 Principio del efecto Venturi

El principio del efecto Venturi es un fenómeno relacionado con la dinámica de fluidos, el cual se produce cuando un fluido pasa por un conducto estrecho, originando que su velocidad aumente, provocando una disminución de presión (Monchwe, 2023).

Cuando un fluido incompresible circula por una tubería y atraviesa una constricción, la reducción del área transversal provoca un incremento de la velocidad y una disminución de la presión estática, esta diferencia de presión puede utilizarse para determinar el caudal del fluido en medidores Venturi (Çengel y Cimbala, 2014).

La aplicación del efecto Venturi se encuentra estrechamente relacionada con las ecuaciones de continuidad y Bernoulli, las cuales permiten describir matemáticamente la variación de velocidad y presión dentro del ducto (Brown et al, 2019).

El efecto Venturi describe la disminución de presión que experimenta un fluido cuando incrementa su velocidad al pasar por una sección estrecha de un conducto. Este fenómeno ocurre debido a la conservación de la masa y la energía del flujo, descritas por la ecuación de continuidad y el principio de Bernoulli, respectivamente (Munson et al, 2013; White, 2011). En un ducto convergente-divergente, la reducción del área en la constricción provoca un aumento de velocidad y una caída de presión con respecto a la sección de entrada (ISO 5167; Halonen et al, 2020).

En la Figura 5 se representa esquemáticamente el comportamiento del flujo de aire al atravesar un ducto de tipo Venturi. En la sección convergente, la reducción del área transversal provoca un incremento de la velocidad del flujo. La velocidad alcanza su mayor magnitud en la constricción, donde la presión estática disminuye respecto a la sección de entrada. Cuando la presión estática en esta región es menor que la presión existente en el depósito, se genera un gradiente de presión que favorece el desplazamiento del líquido a través del conducto de succión y su incorporación al flujo principal de aire. Posteriormente, la mezcla aire-líquido es conducida hacia la sección divergente y la salida del sistema.

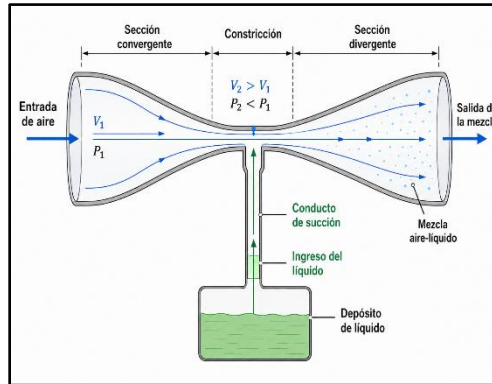


Figura 5. Representación esquemática del principio del efecto Venturi.

2.6 Relación aire-líquido en sistemas de aspersión

La relación aire-líquido, es un parámetro adimensional que expresa el cociente entre el flujo másico de aire y el flujo másico de líquido en un sistema.

Matemáticamente se expresa en la Ecuación 7.

$$ALR = \frac{\dot{m}_{aire}}{\dot{m}_{liquido}} \quad (7)$$

Donde:

$\dot{m}_{aire}$ = Flujo másico de aire que atraviesa la garganta del Venturi (kg/s)

$\dot{m}_{liquido}$ = Flujo másico del líquido fertilizante inducido hacia el interior del ducto (kg/s)

En sistemas asistidos por aire, la ALR es determinante para la calidad de la mezcla y la atomización. Estudios sobre atomización asistida por aire en drones han mostrado que relaciones entre 0.10 y 0.25 proporcionan gotas más estables y menor deriva (Ou et al, 2024).

Capítulo 3. Estado del arte

En el presente estado del arte, se analizan investigaciones previas relacionadas con el uso de vehículos aéreos no tripulados en la agricultura de precisión, los sistemas de aspersión empleados en UAVs y su consumo energético, de igual forma, se mencionan las aplicaciones del principio del efecto Venturi en dispositivos de aspersión y el uso de herramientas CFD para el análisis de ductos Venturi y flujos aire-líquido, con el propósito de identificar los avances tecnológicos y científicos relacionados con la aspersión agrícola. Para la elaboración del estado del arte se recolectaron 54 fuentes de consulta de las cuales 9 son patentes y 45 artículos entre el 2004 y 2026; 35 artículos son del 2020 al 2026, equivalente al 77.77%, las bases de datos utilizadas para la búsqueda fueron: Scopus, ScienceDirect, MDPI, SciELO, EBSCO y Google Académico.

3.1 UAVs en la agricultura de precisión

Diversas investigaciones demuestran la viabilidad del uso de UAV en tareas agrícolas como el monitoreo de cultivos, la aplicación de fertilizantes y la detección de plagas.

Xue et al. (2014), reportan que la aplicación de pesticidas mediante UAV en cultivos de arroz mejora la cobertura y penetración del producto, además de que reduce la deriva fuera del área objetivo, alcanzando un control de la deriva cercano al 90% dentro de un radio de 8 metros.

Hassanalian y Abdelkefi (2017), indican que los principales desafíos en el diseño de un UAV están asociados a la eficiencia aerodinámica y a la gestión de energía, por lo que el desarrollo de sistemas de propulsión y almacenamiento energético resulta fundamental para mejorar su desempeño operativo.

Thibbotuwawa et al. (2018), identifican a la gestión del consumo energético como uno de los principales retos en la operación de los UAVs. El estudio muestra que variables como la velocidad de vuelo, la dirección del viento y la temperatura influyen en el consumo energético, en la autonomía y la planificación de las misiones.

Wang et al. (2022), analizaron el uso de UAVs agrícolas en la aplicación de insumos, particularmente en terrenos de difícil acceso y en regiones con escasez de mano de obra. El estudio señala que estas tecnologías reducen el consumo de agroquímicos y agua, contribuyendo a tener una agricultura más precisa y sostenible mediante la integración de sistemas aéreos no tripulados.

Acharya et al. (2023), describieron que el uso de drones en la gestión de malezas a partir de sensores, cámaras de alta resolución y sistemas de aplicación precisa de

herbicidas, permiten detectar y mapear zonas infestadas, optimizando el uso de insumos químicos, sin embargo, se identificaron retos asociados con los algoritmos de navegación, patrones de pulverización y la accesibilidad de esta tecnología a pequeños productores.

Studinska et al. (2024), analizaron el potencial de los UAVs en la agricultura ucraniana para mejorar la productividad y sostenibilidad agrícola. El estudio reportó que la utilización de esta tecnología podría incrementar el rendimiento de cultivos como maíz, trigo y girasol hasta en 30 %, generar ingresos adicionales de 133 mil millones de UAH anuales y reducir aproximadamente 350 mil toneladas de emisiones de carbono debido al ahorro de 120 millones de litros de combustible y 4.5 millones de toneladas de agua al año.

3.2 Sistemas de aspersión en UAVs

Giles y Billing (2015), evaluaron el uso de UAVs en pulverización agrícola para cultivos especializados como viñedos, destacando una aplicación precisa y reduciendo la exposición del operador a productos químicos, además lograron tasas de aplicación de 10 a 50 L/ha y tasas de trabajo de 2 a 5 ha/h, con una deposición comparable a la obtenida mediante métodos terrestres tradicionales, aunque con limitaciones asociadas a la carga útil, autonomía y variabilidad en la aplicación.

Chen et al. (2020), analizaron el sistema de aspersión DJI MG-1P en cultivos de algodón, evaluando la velocidad de vuelo y el uso de adyuvantes sobre la deposición de gotas. Los resultados mostraron que una velocidad baja de 3 m/s favorece a una mayor densidad de gotas en las capas inferiores del cultivo.

Gao et al. (2020), estudiaron la aplicación de prothioconazole mediante UAVs para el control de enfermedades fúngicas en cultivos de trigo. El estudio señaló que la pulverización mediante UAV permite una deposición más controlada del fungicida y contribuye a reducir riesgos asociados con residuos peligrosos, en comparación con métodos convencionales de aplicación.

Chen et al. (2022), analizaron la deriva de gotas en sistemas de aspersión aérea no tripulados, considerando factores como diseño de boquilla, altura de vuelo, velocidad de operación y flujo descendente de los rotores. El estudio señala que la deriva continúa siendo una limitación importante en los UASS, debido a que puede ocasionar contaminación en zonas fuera del objetivo de aplicación.

Grella et al. (2022), evaluaron pulverizadores asistidos por aire empleados en cultivos de viñedos para mejorar la distribución de productos fitosanitarios, considerando el efecto de la velocidad del ventilador, la orientación del conducto de aire y el tipo y número

de boquillas activas. Los ensayos de laboratorio mostraron que estos factores influyen directamente en la distribución vertical del rociado y en la reducción de pérdidas por encima de la canopia.

Kong et al. (2024), desarrollaron un dispositivo de pulverización lateral para UAVs con el propósito de mejorar la uniformidad de distribución de gotas. Los resultados mostraron incrementos en la cobertura efectiva entre 6.35 % y 35.32 %, con una mejora de 15.25 % respecto a sistemas sin el dispositivo; las mejores condiciones se obtuvieron a una altura de vuelo de 2 m y una velocidad de 2 m/s.

Shan et al. (2024), evaluaron parámetros operativos de aspersión mediante UAVs en cultivos frutales, considerando volumen de pulverización, altura de vuelo, uso de adyuvantes y patrones de aplicación. En manzanos, el estudio reportó que un volumen de 90 L/ha y una altura de vuelo de 2 m mejoran la cobertura y densidad de gotas, particularmente cuando se emplean adyuvantes.

Wang et al. (2024), propusieron un sistema autónomo de control de pulverización para UAVs, integrando un asistente de control de pulverización y comunicación LoRa para ajustar la operación en tiempo real. Las pruebas de campo mostraron un coeficiente de variación inferior al 30 %, un índice de desempeño de focalización entre 0.871 y 0.988, y una deriva menor al 2.5 % fuera de la zona de aplicación.

Wang et al. (2024), evaluaron el desempeño del DJI AGRAS T30 en la aplicación de diferentes adyuvantes, analizando tensión superficial, ángulo de contacto y uniformidad de distribución de gotas en el dosel arbóreo. Los resultados indicaron que adyuvantes como Agrospred 910 y Mai Fei mejoran la penetración y cobertura del producto en las capas superiores y medias del dosel.

Xue et al. (2024), analizaron la influencia de la altura de vuelo y el tamaño de gota en la deposición y deriva generada por un UAV DJI T40 con tecnología de atomización en malla. En el estudio emplearon modelos de aprendizaje automático, como la máquina de aprendizaje extremo (ELM), obteniendo coeficientes de determinación superiores a 0.95 para predecir deposición y deriva de las gotas.

Perriot et al. (2024), presentaron una base de datos experimental sobre deriva de aspersión en cultivos de trigo, evaluando boquillas convencionales, boquillas de inducción de aire y barreras vegetales. El estudio consideró deriva sedimentaria, deriva aérea y exposición potencial a personas cercanas mediante colectores de campo, hilos de PVC, maniqués y trazadores fluorescentes, con un total de 3792 colectores analizados.

3.3 Consumo energético de los sistemas de aspersión en UAVs

Tsouros et al. (2019), analizaron el uso de UAVs en la agricultura de precisión, destacando aplicaciones como monitoreo de cultivos, detección de enfermedades, estrés hídrico y aplicación localizada de insumos. Los autores señalan que una de las principales limitaciones de estos sistemas es la autonomía de vuelo, la cual puede variar entre 20 minutos y 1 hora, dependiendo del equipo, carga útil y condiciones de operación.

Archila (2020), estudió la optimización de trayectorias para UAVs dedicados a la pulverización agrícola, tomando como referencia el DJI Agras MG-1S, cuyo tiempo máximo de vuelo con carga completa es de 10 minutos. Mediante el método HEDAC, el tiempo total de vuelo se redujo 22.4 %, pasando de 20.83 min, a 16.18 min, en un escenario simulado lo que representa un ahorro considerable de energía sin comprometer la precisión de la pulverización.

Demestichas et al. (2020), describieron el papel de los UAVs en la agricultura 4.0, destacando su uso en monitoreo, recopilación de datos en tiempo real y pulverización localizada. El estudio señala que un UAV equipado con un tanque de 10 L puede pulverizar aproximadamente 1 ha en 10 minutos, mostrando su potencial operativo en aplicaciones agrícolas de precisión.

Kholodiuk y Tokarchuk (2022), analizaron los UAVs agrícolas DJI Agras T16, T20 y T30, considerando variables como capacidad de carga, potencia de rotores, productividad y autonomía. Los autores reportaron productividades de 11.06 ha/h en condiciones óptimas; en el caso del DJI T30, se utilizan rotores de 3600 W, un tanque de 30 L y un empuje máximo de 18.7 kg por rotor, con autonomías variables entre 7, 8 y 20.5 minutos según la carga y las condiciones operativas.

Janosz et al. (2024), evaluaron experimentalmente UAVs agrícolas XAG P100 y XAG P100 Pro, identificando tiempos de vuelo limitados durante operaciones con carga completa. Los resultados indicaron autonomías cercanas a 7 minutos con carga útil, mientras que en condiciones sin carga el tiempo de vuelo aumentó hasta 16 minutos, dependiendo del modelo y de las condiciones de operación.

Jayaram et al. (2024), analizaron el diseño y la optimización de un hexacóptero agrícola mediante la selección de hélices, motores, baterías y sistema de pulverización. En pruebas experimentales, una hélice de 23 pulgadas permitió alcanzar un tiempo promedio de vuelo de 10 minutos con una batería de 16 Ah y un consumo promedio de 77.84 A, el sistema de pulverización cubrió 0.92 acres, equivalentes a 3723.108 m^2 en 5.56 minutos.

3.4 Aplicación del principio del efecto Venturi en diferentes dispositivos

Roman et al. (2004), analizaron el uso de inyectores Venturi en sistemas de quimigación agrícola, donde el flujo principal de agua genera una caída de presión capaz de succionar productos químicos desde un tanque externo. Los autores describen que estos dispositivos funcionan sin una fuente externa de energía gracias a que la geometría produce una presión negativa, o vacío relativo, respecto a la presión atmosférica.

Vallet y Tinet (2013), caracterizaron experimentalmente gotas generadas por boquillas de inducción de aire de abanico plano simple y doble, mediante anemometría Doppler de fase, los autores midieron diámetro de gota y velocidad axial, observando que las boquillas de inducción de aire producen gotas de mayor tamaño, menor proporción de gotas finas y velocidades más estables.

Doruchowski et al. (2017), evaluaron boquillas de inducción de aire de baja deriva frente a boquillas convencionales en aplicaciones de pesticidas en manzano. El estudio comparó volúmenes de aplicación de 250, 500 y 750 L/ha, reportando que las boquillas convencionales generan gotas muy finas de 152 a 158 μm , mientras que las boquillas de inducción de aire producen gotas más gruesas de 371 a 386 μm .

Beswick et al. (2020), evaluaron un sistema de lanza manual basado en el efecto Venturi para lograr atomización mediante diferencias de presión. El dispositivo aprovecha aire comprimido para inducir y dispersar el líquido, reduciendo la necesidad de componentes eléctricos complejos y permitiendo una distribución uniforme en aplicaciones como bioseguridad y desinfección.

Dafsari et al. (2021), estudiaron boquillas agrícolas de inducción de aire, las cuales emplean el efecto Venturi para incorporar aire en la corriente líquida y generar gotas con microburbujas. Los autores identificaron que la longitud de la cámara de mezcla, el diámetro del orificio de aire y el ángulo de corte influyen en la relación aire-líquido, las pruebas experimentales reportaron reducciones de deriva de 20 % a 30 % respecto a boquillas convencionales.

Dafsari et al. (2023), analizaron boquillas de inducción de aire bajo condiciones asociadas a drones agrícolas, considerando altura de vuelo, velocidad, posición de la boquilla y velocidad de rotación de las hélices. En comparación con boquillas de abanico plano convencional, las boquillas de inducción de aire mostraron mayor estabilidad de distribución y menor deriva bajo condiciones de turbulencia.

Sijs et al. (2023), estudiaron la reducción de deriva en aplicaciones agrícolas mediante boquillas de inducción de aire tipo Venturi. Los autores señalan que estas

boquillas generan gotas de mayor tamaño que las boquillas tradicionales de abanico plano, debido a la inducción de aire dentro de la cámara de mezcla y a la reducción de presión en la cámara de mezcla generada en la zona Venturi.

Morgensen (1934) desarrolló una patente de aspersión aérea mediante tubos Venturi montados en una aeronave. El sistema aprovecha el flujo de aire generado por el desplazamiento del avión y por la acción de la hélice para inducir líquido en la constricción, favoreciendo la atomización y mezcla con la corriente de aire.

Duncan et al. (1987) propusieron una boquilla de aspersión basada en canales tipo Venturi para limpieza de superficies. El sistema emplea aire presurizado para generar succión de una mezcla de fluido de limpieza y así proyectarla sobre la superficie, incorporando múltiples canales para mejorar la uniformidad de aplicación.

Stocker (2005) presentó una cámara de atomización tipo Venturi inverso orientada a la aplicación aérea de pesticidas. El dispositivo busca reducir la formación de gotas menores a 200 μm mediante una cámara que disminuye la velocidad del aire en la zona de impacto con el fluido y posteriormente acelera la mezcla aire-pesticida.

Huegerich et al. (2011), desarrollaron un sistema de cebado para bombas centrífugas agrícolas mediante un Venturi alimentado con aire comprimido. La depresión generada permite evacuar aire de la línea de succión y atraer líquido hacia la entrada de la bomba, facilitando el movimiento del fluido dentro del sistema.

Gerbron y Chevalier (2013) propusieron un dispositivo de pulverización con efecto Venturi para aplicaciones cosméticas y de perfumería. El sistema integra una boquilla de aire, una cámara de mezclado y una salida convergente-divergente, al circular aire por el circuito se genera una zona de depresión que aspira producto desde un depósito y lo pulveriza.

Zhang et al. (2019), desarrollaron una boquilla electrostática basada en el efecto Venturi para aplicaciones de pulverización agrícola. La configuración integra un conducto de suministro de líquido, un canal de aire y una zona Venturi próxima a la salida, además de elementos de carga electrostática para favorecer la atomización secundaria y la deposición de gotas sobre los cultivos.

Hofman (2021) propuso un ensamble de aspersión de agua que combina una constricción tipo Venturi con una cámara de vórtice. El sistema induce rotación al flujo y permite aspirar aire mediante orificios ubicados en zonas de baja presión, modificando las características del chorro de salida.

Zhao (2024) presentó un pulverizador agrícola diseñado para ser montado en un dron, integrado por un depósito de medicamento, un tubo Venturi y un tanque de gas comprimido o licuado. En esta configuración, el gas ingresa al Venturi, genera succión en la constricción y extrae el líquido del depósito para expulsarlo en forma de aspersión.

Jing et al. (2024) desarrollaron un dispositivo de automezcla de fluidos para UAVs basado en un tubo Venturi con secciones de entrada, constricción y salida. La configuración incorpora un ramal lateral para introducir un segundo fluido y una placa móvil que permite modificar el ancho efectivo de la zona intermedia, regulando la proporción de mezcla.

3.5 Modelado y simulación CFD de sistemas Venturi y flujos de aire-líquido

Babakhani et al. (2017), realizaron una simulación CFD con validación experimental de flujos bifásicos aceite-agua en régimen core-annular a través de un medidor Venturi y un medidor tipo boquilla. El estudio empleó el modelo VOF en ANSYS Fluent 16.2 junto con modelos RANS, para analizar caída de presión, distribución de fases, velocidad radial, holdup y relación de deslizamiento.

Khayat y Afarideh (2019), realizaron una simulación CFD tridimensional de flujo bifásico líquido-gas en un medidor Venturi, utilizando un modelo multifásico algebraic slip mixture acoplado con turbulencia $k-\epsilon$. El estudio evaluó el efecto de la velocidad del fluido, la fracción volumétrica de gas y la reología de líquidos no newtonianos sobre el coeficiente de descarga y la caída de presión en la constricción del Venturi.

Li et al. (2020), realizaron un estudio numérico y experimental del flujo interno de un inyector Venturi utilizado en fertirrigación. Los autores emplearon ANSYS Fluent con un modelo multifásico de mezcla, turbulencia $k-\epsilon$ estándar y el modelo de cavitación Zwart-Gerber-Belamri; los resultados mostraron que omitir la cavitación puede generar errores superiores al 50 %, mientras que el modelo con cavitación redujo la desviación máxima frente al experimento con el 3 %.

Abdelmotalib et al. (2021), desarrollaron un estudio CFD del flujo interno de una boquilla agrícola de inducción de aire basada en el efecto Venturi, mediante el modelo VOF y turbulencia $k-\epsilon$ realizable, analizaron la relación entre el diámetro del preorificio y el diámetro de constricción, así como el ángulo del difusor; identificaron una relación óptima D_p/D_t de 0.78 y un ángulo de difusor cercano a 20° .

Ni et al. (2021), integraron simulaciones CFD con modelos de regresión y redes neuronales de retropropagación para predecir la distribución de gotas en sistemas de pulverización variable mediante UAVs. El modelo alcanzó una precisión de 93.5 % y un

margen de error menor al 10 % en los puntos de muestra, mostrando la utilidad del modelado predictivo en la optimización de la aspersión agrícola.

Liu et al. (2023) realizaron una simulación numérica del flujo transitorio aire-líquido en una boquilla agrícola de inducción de aire con estructura Venturi. El estudio empleó el modelo VOF y turbulencia $k-\epsilon$ realizable para analizar velocidad, presión y fracción volumétrica de aire; para la combinación TD03-ST06, el caudal máximo de aire fue de 0.0092 L/min a 0.6 MPa, y el modelo de regresión para predecir ALR obtuvo un coeficiente de determinación de 0.9155.

Khaleghi et al. (2023) realizaron un estudio paramétrico experimental y numérico sobre una boquilla agrícola de inducción de aire basada en el principio Venturi. El estudio empleó el modelo VOF y turbulencia $k-\epsilon$ realizable para analizar relación aire-líquido, flujo bifásico, ángulo de aspersión, tamaño de gota y uniformidad del rociado, los ángulos de divergencia fueron de 10° y 20° y presentaron mejor desempeño frente a configuraciones de 0° o 40°.

Li et al. (2023), analizaron el efecto del flujo descendente generado por los rotores de un UAV de ocho rotores sobre la dinámica de las gotas pulverizadas. El estudio mostró que la interacción entre el flujo de aire y las gotas puede generar deriva y distribución desigual, por lo que las simulaciones CFD se emplearon para validar configuraciones que mejoren la eficiencia operativa del sistema de pulverización.

De Vanna et al. (2023), desarrollaron una metodología de optimización CFD para un tubo Venturi aplicado al tratamiento de aguas mediante cavitación hidrodinámica. El estudio empleó ecuaciones RANS, el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST y un modelo multifásico agua-vapor con cavitación Schnerr-Sauer; mediante Latin Hypercube Sampling, la optimización geométrica incrementó el índice de generación de vapor aproximadamente 133.7 % respecto a la geometría base.

Wang y Wang (2024) realizaron una simulación numérica en ANSYS Fluent de un tubo Venturi empleado en un sistema de ventilación y remoción de polvo. Los resultados mostraron que al aumentar la velocidad de entrada de 2 a 12 m/s la depresión en la constricción aumentó de -2.102 a -82.507 Pa; además, al reducir el diámetro de constricción de 183 a 158 mm, manteniendo una velocidad de 10 m/s, la depresión aumentó de -22.289 a -136.767 Pa, estos valores no representan presiones absolutas negativas, sino zonas de baja presión relativa asociadas al efecto Venturi.

Zu et al. (2024), analizaron mediante CFD un inyector Venturi coaxial gas-líquido para estudiar la influencia de la interfaz entre fases en el comportamiento de succión. El

estudio empleó el modelo multifásico VOF y el modelo de turbulencia RSM, con validación experimental mediante mediciones de arrastre de gas; el error reportado fue de 2.17 % para una velocidad de salida de boquilla de 16.78 m/s.

Mondal et al. (2024), evaluaron ANSYS Fluent para simular flujos bifásicos agua-aire y aceite de silicona-aire en una tubería vertical. El estudio utilizó el modelo VOF y turbulencia k- ϵ realizable, analizando patrones de flujo, fracción de vacío, fluctuaciones temporales, caída de presión y perfiles de velocidad; la validación experimental mostró errores menores al 7 % en la predicción de la fracción de vacío media.

Lee y Abdelmotalib (2025), evaluaron mediante CFD e inteligencia artificial el desempeño de una boquilla agrícola de inducción de aire basada en el efecto Venturi. El estudio empleó el modelo VOF y turbulencia k- ϵ realizable, considerando parámetros como diámetro de entrada de aire, longitud del paso de aire, cámara de mezcla y ángulo de corte; el diámetro de entrada de aire fue el parámetro más influyente, con una contribución aproximada de 35 %.

Benghalia et al. (2025), estudiaron mediante CFD el flujo cavitante de nanofluidos a través de un Venturi, empleando un modelo multifásico de mezcla, turbulencia k- ω SST y modelo de cavitación de Singhal. Los autores analizaron agua, Cu/agua y TiO₂/agua con diferentes fracciones volumétricas de nanopartículas, bajo una presión de entrada de 700 kPa y presión atmosférica de salida.

Ersan et al. (2026) realizaron un análisis CFD tridimensional y transitorio de un inyector Venturi empleado en una máquina textil para remoción de agua. El estudio consideró presiones de entrada de 10, 12 y 15 bar, así como diámetros de boquilla de 14, 15 y 16 mm, al incrementar la presión de entrada de 10 a 15 bar, la velocidad máxima aumentó aproximadamente 20 % y la presión de vacío mejoró entre 40 % y 45 %.

3.6 Discusión del estado del arte

A partir de la revisión realizada, se identifica que los UAVs han demostrado ser herramientas útiles para la agricultura de precisión, particularmente en tareas de monitoreo, aplicación localizada de insumos, control de plagas y reducción de la exposición directa del operador a productos químicos. Sin embargo, los estudios revisados también muestran que su desempeño se encuentra limitado por la autonomía de vuelo, la carga útil, las condiciones ambientales y el consumo energético de los subsistemas integrados del UAV.

En el caso de los sistemas de aspersión en UAVs, la literatura indica que variables como la altura de vuelo, velocidad de avance, tipo de boquilla, tamaño de gota, caudal de aplicación,

uso de adyuvantes y flujo descendente de los rotores influyen directamente en la deposición, cobertura y deriva del producto aplicado. Aunque se han desarrollado estrategias de control, dispositivos de pulverización, boquillas de inducción de aire y modelos predictivos para mejorar el desempeño de aplicación, la mayoría de estos sistemas continúa dependiendo de bombas eléctricas, presión hidráulica o mecanismos activos para transportar y atomizar el líquido.

Respecto al consumo energético los trabajos revisados evidencian que los UAVs agrícolas presentan tiempos de operación bajos cuando trabajan con carga completa, especialmente en tareas de aspersión, esta condición limita la superficie atendida por ciclo de vuelo y motiva el desarrollo de alternativas que permitan reducir la demanda energética de los subsistemas auxiliares.

Por otra parte, el principio del efecto Venturi ha sido aplicado en inyectores agrícolas, boquillas de inducción de aire, dispositivos de aspersión, sistemas de mezcla y mecanismos de succión, estos antecedentes demuestran que una geometría convergente-divergente puede generar una zona de baja presión capaz de inducir aire o líquido hacia una corriente principal, sin embargo, gran parte de las aplicaciones revisadas requiere presión hidráulica, aire comprimido, bombas o fuentes externas de energía para activar el fenómeno de succión.

Finalmente, los estudios CFD revisados muestran que la simulación numérica permite analizar variables internas de sistemas Venturi, como velocidad, presión estática, caída de presión, recuperación de presión, relación aire-líquido y formación de zonas de recirculación, pero se identifica una brecha en la literatura relacionada con el análisis de sistemas de aspersión pasivos para UAVs agrícolas que aprovechen directamente el flujo de aire generado por el propio UAV para inducir la succión de un líquido mediante una geometría tipo Venturi, esta brecha justifica el desarrollo de la presente investigación, orientada al análisis y diseño de un sistema de aspersión que reduzca la dependencia de bombas eléctricas y componentes electromecánicos adicionales.

Con el propósito de integrar los principales hallazgos de la revisión e identificar la brecha que sustenta esta investigación en la Tabla 2, se comparan los trabajos más relevantes de acuerdo con su objeto de estudio, metodología, resultados, limitaciones y relación con el sistema de aspersión propuesto.

Tabla 2. Síntesis comparativa de los trabajos revisados y su relación con la presente investigación.

Referencia	Aplicación u objeto de estudio	Metodología y variables analizadas	Resultado principal	Limitación o brecha identificada	Comparación con el presente trabajo de investigación
UAV en la agricultura de precisión					
Xue et al. (2014)	Aplicación de pesticidas mediante UAV en arroz	Evaluación experimental de la deposición, cobertura y deriva.	Se obtuvo un control de la deriva cercano al 90 % dentro de un radio de 8 m.	No estudia el consumo energético ni el mecanismo interno de aspersión.	Demuestra la viabilidad agrícola de los UAV, mientras que esta investigación se concentra en el diseño del sistema encargado de inducir y transportar el líquido.
Hassanalian y Abdelkafi (2017)	Clasificación y diseño de UAV	Revisión de configuraciones, autonomía, eficiencia aerodinámica y gestión energética.	Identificaron la eficiencia aerodinámica y la energía como desafíos principales.	No proponen un sistema de aspersión pasivo.	Fundamenta la necesidad de reducir la complejidad y demanda energética de los subsistemas incorporados a los UAV.
Thibbotuwawa et al. (2018)	Consumo energético y planificación de misiones de UAV	Revisión de velocidad de vuelo, viento, temperatura y autonomía.	Las condiciones de vuelo influyen directamente en el consumo energético.	No analiza el consumo ni el funcionamiento del sistema de aspersión.	La presente investigación aborda un subsistema del UAV que podría prescindir de una bomba eléctrica
Sistemas de aspersión en UAV					
Giles y Billing (2015)	Pulverización mediante UAV en cultivos especializados	Pruebas de aplicación, deposición, caudal y capacidad de trabajo.	Reportaron tasas de 10 a 50 L/ha y rendimientos de 2 a 5 ha/h.	El sistema mantiene las limitaciones de carga útil y autonomía de los pulverizadores convencionales.	Evalúa el desempeño de esta aplicación, esta investigación estudia una alternativa para inducir el líquido aprovechando el flujo de aire del UAV
Chen et al. (2020)	Aspersión mediante DJI MG-1P en algodón	Evaluación de velocidad de vuelo, adyuvantes	Una velocidad de 3 m/s favoreció una mayor densidad de	Se concentra en parámetros externos de operación y no en el	A diferencia de este trabajo, la tesis analiza las condiciones internas de velocidad y presión

		y deposición.	gotas en las capas inferiores.	mecanismo de suministro del líquido.	de un ducto de tipo Venturi.
Chen et al. (2022)	Deriva en sistemas de pulverización aérea no tripulados	Revisión del tipo de boquilla, altura, velocidad y flujo descendente.	La deriva continúa siendo una limitación de los USAS.	No propone una configuración pasiva para asperjar el líquido.	La tesis utiliza el flujo de aire como recurso para inducir succión.
Consumo energético de los sistemas de aspersión					
Tsours et al. (2019)	Aplicaciones de UAV en agricultura de precisión	Revisión de aplicaciones y restricciones operativas.	La autonomía puede variar entre 20 minutos y 1 hora.	No analiza individualmente la demanda energética del sistema de aspersión.	Sustenta la necesidad de analizar alternativas que reduzcan la dependencia de subsistemas activos de aspersión.
Archila (2020)	Optimización de trayectorias para pulverización	Simulación mediante el método HEDAC.	El tiempo total de vuelo disminuyó 22.4 %, de 20.83 a 16.18 minutos.	La reducción energética se logra modificando la trayectoria, no el sistema de aspersión.	La presente investigación aborda el problema desde el diseño del mecanismo de succión y aspersión.
Janosz et al. (2024)	Autonomía de UAV agrícolas XAG	Pruebas experimentales con y sin carga.	Se obtuvieron aproximadamente 7 minutos con carga y hasta 16 minutos sin carga.	No modifica ni sustituye el sistema de bombeo.	Evidencia el efecto de la carga sobre la autonomía y respalda la búsqueda de sistemas de menor complejidad.
Aplicaciones del efecto Venturi					
Boman et al. (2004)	Inyectores Venturi para quimigación	Análisis del gradiente de presión y succión de productos químicos.	El inyector funciona sin una fuente eléctrica externa al aprovechar la caída de presión del agua.	Requiere presión hidráulica en la corriente principal.	Coincide en utilizar el efecto Venturi para succionar un líquido, pero la tesis emplea aire proveniente del UAV como fluido principal.
Dafsari et al. (2021)	Boquilla agrícola de inducción de aire	Evaluación experimental de geometría,	La deriva se redujo entre 20 % y 30 % respecto a boquillas	El líquido continúa siendo suministrado mediante	La tesis invierte la función habitual: el aire es la corriente motriz y se busca

		relación aire- líquido y deriva.	convencional es.	presión hidráulica.	succionar el líquido desde un depósito.
Morgen sen (1934)	Aspersión aérea mediante tubos Venturi	Patente que aprovecha el flujo del avión y la hélice.	El aire induce el líquido en la constricción y favorece para su atomización.	No presenta condiciones operativas aplicables a un UAV actual.	Coincide en aprovechar el flujo de aire de la aeronave para inducir líquido; la presente investigación adapta el principio a un UAV agrícola y determina mediante simulaciones CFD sus condiciones geométricas y operativas.
Zhao (2024)	Pulverizador agrícola montable en dron	Patente con tubo Venturi y depósito de líquido.	Un gas comprimido genera la succión y expulsión del líquido.	Depende de un tanque de gas comprimido o licuado.	La tesis busca eliminar esta fuente auxiliar mediante el aprovechamiento directo del flujo de aire disponible en el UAV.
Modelado y simulación CFD de sistemas Venturi					
Babakh ani et al. (2017)	Flujo bifásico aceite- agua en medidores Venturi	CFD con modelo VOF, modelos RANS y validación experimental.	Se analizaron caída de presión, distribución de fases y relación de deslizamiento.	El dispositivo estudiado es un medidor y no un sistema de aspersión.	Sustenta el uso del modelo VOF para representar la interacción entre dos fases en una geometría Venturi.
Abdelm otalib et al. (2021)	Boquilla agrícola de inducción de aire	ANSYS Fluent, modelo VOF y turbulencia k-ε realizable.	Se identificó una relación geométrica óptima D_p/D_t de 0.78 y un ángulo de difusor cercano a 20°.	La corriente motriz corresponde al líquido presurizado.	Coincide en evaluar geometría y flujo bifásico mediante simulaciones CFD, pero la tesis utiliza aire como corriente principal.
Wang y Wang (2024)	Venturi para ventilación y remoción de polvo	Simulación en ANSYS Fluent variando velocidad y diámetro.	La depresión aumentó de -2.102 a -82.507 Pa al incrementar la velocidad de 2 a 12 m/s.	No considera flujo bifásico ni aplicación agrícola.	Confirma que la velocidad y el diámetro modifican la presión; la tesis extiende este análisis hacia la succión de líquido en un UAV.

A partir de la comparación realizada se identifica que los estudios sobre UAV agrícolas se concentran principalmente en la deposición, cobertura, deriva, autonomía y condiciones de vuelo, mientras que los dispositivos basados en el efecto Venturi suelen depender de presión hidráulica, aire comprimido, bombas o fuentes auxiliares para inducir un segundo fluido. Asimismo, las investigaciones CFD demuestran que la geometría, la velocidad y la presión influyen en el comportamiento de estos sistemas. La presente investigación se diferencia por proponer el diseño y la evaluación numérica de un sistema de aspersión pasivo que aproveche directamente el flujo de aire disponible en un UAV agrícola para favorecer la succión del líquido sin incorporar una bomba eléctrica como mecanismo de impulsión.

Capítulo 4. Diseño del sistema de aspersión

El presente capítulo aborda el diseño del sistema de aspersión pasivo basado en el principio del efecto Venturi, orientado a su posible integración en un dron agrícola. Para ello, el desarrollo del sistema se estructuró a partir de la caracterización del caso de estudio, el planteamiento de la metodología de solución, el desarrollo de configuraciones geométricas, la selección del diseño adecuado y la definición de las especificaciones del modelo seleccionado.

En primera instancia, se establecieron las condiciones físicas y operativas del sistema, considerando la definición de las variables físicas, las propiedades del fluido, los parámetros de operación y los criterios geométricos que intervienen en el funcionamiento del ducto de tipo Venturi. Posteriormente, se desarrollaron modelos tridimensionales mediante diseño asistido por computadora (CAD), en los cuales se realizaron modificaciones en la geometría del ducto, la ubicación del depósito de líquido, la posición del ducto de succión y la zona de constricción. Estas configuraciones permitieron analizar de manera progresiva la evolución del diseño hasta obtener una propuesta geométrica adecuada para su evaluación numérica. Finalmente, los modelos propuestos fueron evaluados mediante simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD), con el propósito de analizar el comportamiento del flujo de aire dentro del sistema, particularmente la variación de velocidad, la distribución de presión estática y la ubicación de la zona de menor presión. A partir de estos resultados se seleccionó la configuración que presentó mejores condiciones para favorecer la incorporación del líquido al flujo principal de aire, estableciendo así la base geométrica y operativa.

4.1 Caracterización del caso de estudio

Esta sección tiene como propósito definir el escenario físico, operativo y geométrico bajo el cual se desarrolla el sistema de aspersión pasivo basado en el principio del efecto Venturi. Por tal motivo se presenta la particularización del sistema propuesto, las condiciones físicas y operativas consideradas para su análisis, así como las variables, propiedades y parámetros que intervienen en el diseño del ducto de aspersión. Esta caracterización permite establecer la base técnica necesaria para el planteamiento de la metodología de solución, el desarrollo de las configuraciones geométricas y la evaluación numérica del sistema.

4.1.1 Particularización del caso de estudio

El sistema de aspersión se orienta a su integración en un fuselaje especial de un UAV agrícola que tiene una tobera particular como se muestra en la Figura 6, con el propósito de analizar el aprovechamiento del flujo de aire generado por la hélice principal como medio para favorecer la incorporación de un líquido al flujo principal. A diferencia de los sistemas de aspersión convencionales empleados en vehículos aéreos no tripulados, los cuales suelen utilizar bombas eléctricas, inyectores o mecanismos electromecánicos para impulsar el líquido, la propuesta planteada en esta investigación se basa en un principio pasivo asociado al efecto Venturi.

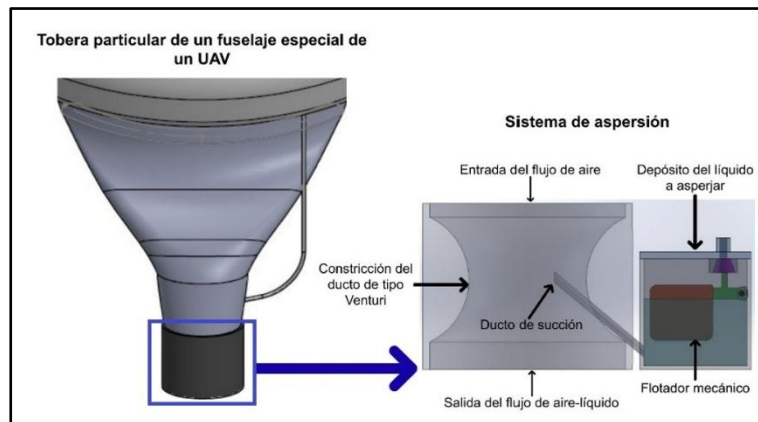


Figura 6. Sistema de aspersión pasivo acoplado en tobera de fuselaje especial de un UAV.

El principio de funcionamiento consiste en conducir el flujo de aire disponible hacia un ducto con geometría convergente-divergente, con el objetivo de incrementar su velocidad y generar una disminución de presión estática en la constricción del ducto. Esta zona de baja presión es el punto de interés del sistema, ya que puede favorecer la incorporación del líquido contenido en un depósito mediante un ducto de succión conectado a la constricción. El sistema de aspersión se compone de cuatro elementos principales: el ducto principal de flujo de aire, la geometría tipo Venturi, el ducto de succión y el depósito del líquido. El ducto principal permite conducir el flujo de aire proveniente del sistema de sustentación de un UAV hacia la sección convergente, la constricción del Venturi representa la zona donde se busca generar la mayor aceleración del flujo y la menor presión estática, el ducto de succión comunica el depósito con la región de baja presión y el depósito almacena el líquido destinado a incorporarse al flujo principal.

La ubicación del ducto de succión es un aspecto crítico dentro del sistema, debido a que debe conectarse en una zona donde exista una diferencia de presión suficiente entre el depósito del líquido y el interior del ducto Venturi, la incorporación del líquido no depende

únicamente de sus propiedades físicas, sino principalmente de la diferencia de presión generada por la geometría del ducto y por la velocidad del flujo de aire que atraviesa la constricción.

4.1.2 Variables, propiedades y parámetros considerados en el diseño

Para caracterizar el sistema de aspersión se identificaron las magnitudes que intervienen en el comportamiento del flujo dentro del ducto de tipo Venturi, las cuales se clasifican en variables operativas, propiedades físicas, parámetros geométricos y parámetros adimensionales, que podemos observar en la Tabla 3. Esta clasificación permite distinguir entre las condiciones de operación, propiedades propias de los fluidos, dimensiones que definen la geometría del ducto y los parámetros calculados utilizados para interpretar el régimen del flujo.

Las variables operativas principales son la velocidad del aire y la presión estática. La velocidad del aire permite evaluar la aceleración del flujo al atravesar la constricción del ducto y la presión estática permite identificar la formación de zonas de baja presión. Estas variables son fundamentales para analizar el comportamiento del sistema y determinar si la geometría propuesta favorece la incorporación del líquido.

Las propiedades físicas consideradas corresponden principalmente a la densidad y viscosidad de los fluidos, en el caso del aire estas propiedades intervienen en el análisis del comportamiento aerodinámico dentro del ducto, en el caso del fluido secundario la densidad y el comportamiento de la solución fertilizante permiten establecer las condiciones bajo las cuales el líquido podría incorporarse al flujo principal.

Los parámetros geométricos incluyen el diámetro de entrada, el diámetro de la constricción, la longitud del ducto, la ubicación del ducto de succión y el volumen del depósito del líquido. Estos parámetros definen la configuración física del sistema y son determinantes para generar la reducción de área necesaria en la constricción del Venturi. Finalmente, los parámetros adimensionales, como el número de Reynolds y la relación aire-líquido, permiten interpretar el régimen del flujo y la proporción entre el flujo másico de aire y el flujo másico de líquido.

Tabla 3. Variables, propiedades y parámetros considerados en el diseño del sistema de aspersión.

Clasificación	Elemento	Símbolo	Unidad	Función dentro del diseño
Variable operativa	Velocidad del aire	V	m/s	Determina la aceleración del flujo en la constricción.

Variable operativa	Presión estática	P	Pa	Permite identificar la zona de baja presión.
Propiedad física	Densidad del aire	ρ	kg/m^3	Interviene en el análisis de presión y velocidad.
Propiedad física	Viscosidad dinámica del aire	μ	$Pa \cdot s$	Permite estimar el régimen del flujo.
Propiedad física	Densidad del líquido	ρ	kg/m^3	Caracteriza el fluido secundario.
Parámetro geométrico	Diámetro de entrada	D_1	m	Define la sección inicial del ducto.
Parámetro geométrico	Diámetro de la constricción	D_2	m	Define la zona de constricción.
Parámetro geométrico	Posición del ducto de succión	—	—	Determina la conexión con la zona de baja presión.
Parámetro geométrico	Volumen del depósito	V_d	L	Define la capacidad de almacenamiento del líquido.
Parámetro adimensional	Número de Reynolds	Re	—	Caracteriza el régimen del flujo.
Parámetro adimensional	Relación aire-líquido	ALR	kg/kg	Relaciona el flujo másico de aire con el flujo másico de líquido.

4.1.3 Condiciones físicas y operativas del sistema

El caso de estudio considera la interacción entre dos fluidos: el aire como fluido principal y una solución fertilizante como fluido secundario. El aire corresponde al flujo disponible generado por el sistema sustentación y conducido hacia el ducto tipo Venturi, mientras que el fluido secundario corresponde al líquido que se busca incorporar al flujo principal mediante la diferencia de presión generada en la constricción del ducto.

Para delimitar la aplicación agrícola del sistema, se consideró como referencia la fertilización foliar en cultivo de maíz mediante el uso de UREA 46-00-00. Este fertilizante fue seleccionado a partir de un análisis agroproductivo, el cual podemos observar en la Tabla 4, debido a su uso en actividades agrícolas, su contenido de nitrógeno y su alta solubilidad en agua, lo que permite considerarlo como insumo para la preparación de una solución líquida destinada a la aplicación foliar.

Tabla 4. Características físicas del líquido a asperjar.

Cultivo producido a nivel nacional	Cultivo producido en Morelos	Producto utilizado para fertilizar	Características del producto
Maíz grano blanco	Maíz grano blanco	UREA 46-00-00	Fórmula química:

21 926 226 toneladas	191 691 toneladas	Solubilidad en agua: Muy alta, lo que facilita su absorción en aplicaciones foliares. Forma física: Granulado o perlado.	CO(NH ₂) ₂
6 077 09 hectáreas	44 529 hectáreas		Contenido de nitrógeno (N): 46% Densidad aparente: 0.74 g/cm ³ .
Censo Agropecuario 2022 del INEGI	Censo Agropecuario 2022 del INEGI	Secretaría de Agricultura y Desarrollo Rural (SADER) de México. "Guía para el uso del Fertilizante en el Estado de Guerrero"	FERTINOVA AGROPRODUCTOS

Las condiciones físicas y operativas del sistema se definieron a partir de los requerimientos del sistema de aspersión y de las condiciones de flujo consideradas para el dron. Estas condiciones permiten establecer los valores de referencia, como se muestra en la Tabla 5, para el desarrollo del modelo geométrico y su posterior evaluación numérica.

Tabla 5. Condiciones físicas y operativas del sistema de aspersión.

Condición	Valor considerado	Función dentro del análisis
Fluido principal	Aire	Flujo que atraviesa el ducto tipo Venturi.
Fluido secundario	Solución de UREA 46-00-00	Líquido a incorporar al flujo principal.
Velocidad de entrada del aire	30 a 100 m/s	Rango inicial considerado para el diseño.
Presión de referencia	101 kPa	Presión atmosférica considerada.
Presión esperada en la constricción	30 a 90 kPa	Intervalo de presión buscado para favorecer succión.
Diámetro de entrada del ducto	14 cm	Sección de ingreso del flujo de aire.
Diámetro de la constricción	7 cm	Zona donde se busca acelerar el flujo.
Ángulo del ducto de succión	50°	Condición geométrica de conexión con la constricción.
Posición del ducto de succión	Diagonal	Orientación de entrada del fluido secundario.
Volumen del depósito del líquido	0.500 L	Capacidad considerada para el líquido.

Los valores presentados en la Tabla 5 constituyen condiciones iniciales para el diseño y análisis del sistema, el rango de velocidad de entrada se considera como una referencia preliminar para estudiar el comportamiento del flujo dentro del ducto tipo Venturi, mientras que los parámetros geométricos permiten delimitar las dimensiones principales de la configuración propuesta.

4.2 Metodología de solución

La metodología de solución se estructuró con el objetivo de establecer una secuencia ordenada para el análisis, diseño, selección y evaluación de un sistema de aspersión pasivo basado en el principio del efecto Venturi, orientado a su posible integración en un vehículo aéreo no tripulado dedicado a la agricultura. Esta metodología permitió relacionar la fundamentación teórica del fenómeno físico con la identificación de variables, la definición de parámetros de diseño, el desarrollo de configuraciones geométricas y la evaluación numérica del sistema propuesto.

El procedimiento metodológico se organizó en cinco etapas principales: fundamentación teórica e identificación de variables del sistema, definición de parámetros operativos y criterios de diseño, diseño geométrico de modelos, evaluación preliminar y selección de la configuración geométrica, y verificación CFD del diseño seleccionado e identificación de rangos operativos. La Figura 7, muestra de manera esquemática la secuencia seguida para el desarrollo del sistema de aspersión.

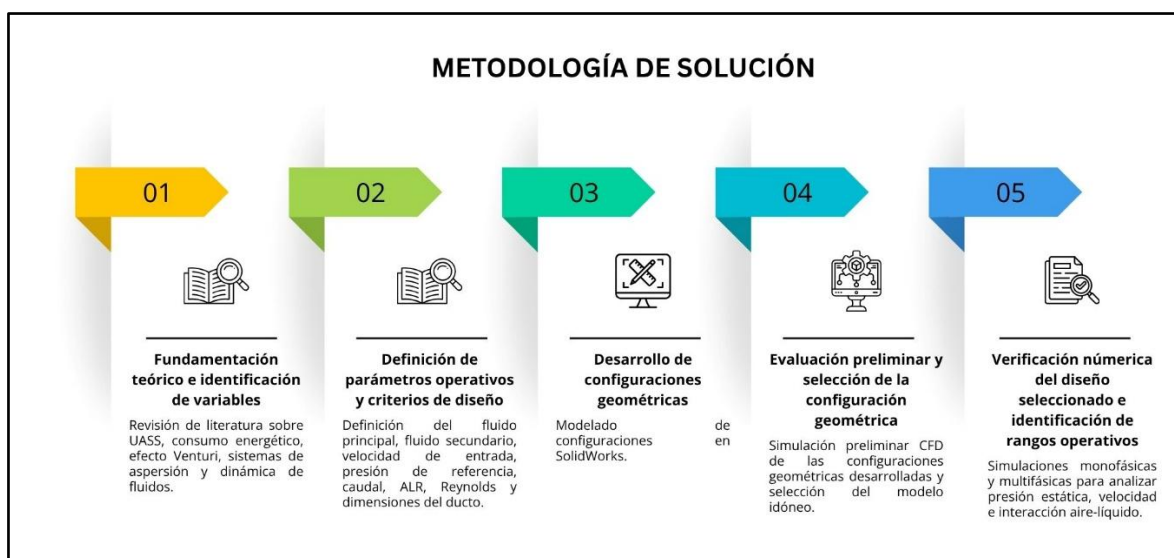


Figura 7. Metodología de solución para el diseño y evaluación del sistema de aspersión.

Etapas 1. Fundamentación teórica e identificación de variables: Se realizó un análisis sobre los sistemas de pulverización aérea no tripulados, consumo energético en UAV agrícolas, aplicaciones del principio del efecto Venturi. Esta revisión permitió identificar las variables físicas para el diseño del sistema, tales como: velocidad del flujo de aire, presión estática, caudal volumétrico, densidad, viscosidad y geometría del ducto.

Etapas 2. Definición de parámetros operativos y criterios de diseño: Se establecieron las condiciones físicas y funcionales que debía cumplir el sistema, considerando el aire como fluido principal, la solución fertilizante como fluido secundario, la presión de referencia, el

rango de velocidades de entrada y las restricciones geométricas del ducto. También se definieron criterios de diseño relacionados con la presencia de una geometría convergente-divergente, la formación de una garganta o zona de constricción, la ubicación del ducto de succión y la integración del depósito del líquido.

Etapas 3. Desarrollo de configuraciones geométricas: Se realizaron a partir del diseño asistido por computadora (CAD), por tal motivo se utilizó el software de SolidWorks con el propósito de generar modelos tridimensionales preliminares del sistema de aspersión. Las configuraciones desarrolladas consideraron modificaciones en el perfil del ducto, la ubicación del depósito, la posición del ducto de succión, la forma de la constricción y la conexión entre el depósito de líquido y el ducto principal, esta etapa permitió generar modelos preliminares antes de seleccionar una configuración geométrica final.

Etapas 4. Evaluación preliminar y selección de la configuración geométrica: Se realizaron simulaciones de dinámica de fluidos computacional (CFD) y se procedió a realizar la selección de la configuración geométrica. Donde los modelos preliminares fueron evaluados mediante simulaciones de flujo de aire, considerando condiciones de frontera equivalentes para permitir una comparación homogénea entre las configuraciones propuestas, la evaluación se centró en analizar la distribución de velocidad, la presión estática, la ubicación de las zonas de presión mínima, la trayectoria de las líneas de corriente y la presencia de zonas de recirculación o estancamiento. A partir de esta comparación se seleccionó la configuración que presentó mejores condiciones geométricas y funcionales para inducir la succión del líquido y aspersión del líquido.

Etapas 5. Verificación numérica del diseño seleccionado e identificación de rangos operativos: Se realizó un análisis monofásico del flujo de aire en SolidWorks Flow Simulation con el propósito de conocer la aceleración del flujo en la constricción, la distribución de presión estática y establecer los rangos operativos del sistema de aspersión. También se realizó un análisis multifásico en ANSYS Fluent, con el objetivo de observar la interacción entre el flujo de aire y el líquido contenido en el depósito, este análisis permitió complementar la verificación numérica del sistema al considerar el comportamiento del fluido secundario ante la diferencia de presión generada en la constricción del ducto.

En la Tabla 6 se resumen las etapas de la metodología de solución consideradas para el desarrollo del sistema de aspersión.

Tabla 6. Resumen de las etapas metodología de solución.

Etapas	Propósito	Resultado esperado
Fundamentación teórica e identificación de variables	Establecer la base técnica para el desarrollo del	Variables físicas y fundamentos técnicos

	sistema de aspersión pasivo basado en el efecto Venturi.	necesarios para orientar el diseño del sistema.
Definición de parámetros operativos y criterios de diseño	Delimitar las condiciones de operación y las restricciones geométricas que debe cumplir el sistema.	Parámetros operativos y criterios de diseño para el desarrollo de las configuraciones geométricas.
Desarrollo de configuraciones geométricas	Generar alternativas geométricas del sistema de aspersión mediante diseño asistido por computadora.	Modelos geométricos preliminares del sistema de aspersión.
Evaluación preliminar y selección de la configuración geométrica	Comparar las configuraciones propuestas para seleccionar el modelo con mejor comportamiento geométrico y funcional.	Configuración geométrica seleccionada para su verificación numérica.
Verificación numérica del diseño seleccionado e identificación de rangos operativos	Evaluar el comportamiento del diseño seleccionado bajo diferentes condiciones de entrada y analizar la interacción aire-líquido.	Resultados CFD del diseño seleccionado, comportamiento aire-líquido y rangos operativos del sistema de aspersión.

4.3 Desarrollo y evaluación preliminar de las configuraciones geométricas propuestas

Con base en los parámetros operativos, variables físicas y criterios de diseño definidos en las secciones anteriores, se desarrollaron diferentes configuraciones geométricas del sistema de aspersión pasivo mediante diseño asistido por computadora. El propósito de esta etapa fue generar alternativas de diseño que integren un ducto principal con geometría de tipo Venturi, un depósito para el líquido, un ducto de succión y una zona de constricción donde pudiera generarse una disminución de presión estática.

El desarrollo de los diseños se realizó en SolidWorks considerando modificaciones progresivas en el perfil del ducto, la ubicación del depósito, la posición del ducto de succión, la forma de la constricción y la conexión entre el depósito de líquido y el ducto principal, estas modificaciones permitieron analizar la evolución geométrica del sistema.

Durante esta etapa se elaboraron siete configuraciones geométricas, los primeros seis modelos se utilizaron como alternativas preliminares para comparar diferentes formas de integrar el ducto, el depósito y el ducto de succión, la Figura 8 muestra las seis configuraciones preliminares desarrolladas en SolidWorks.

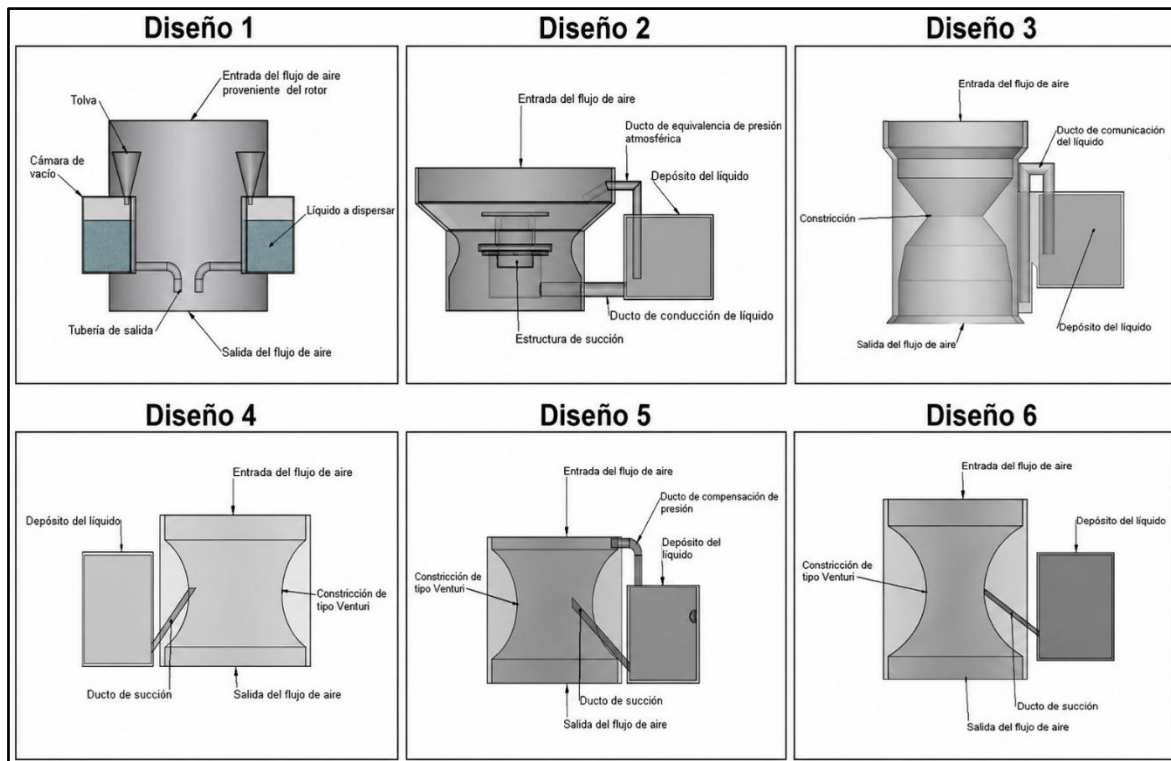


Figura 8. Partes geométricas de los seis diseños preliminares del sistema de aspersión.

Como se observa en la Figura 8, los diseños preliminares presentan diferentes formas de integrar los elementos principales del sistema, los primeros 4 modelos permiten explorar configuraciones simples de acoplamiento entre el depósito y el ducto principal, mientras que a los modelos 4 y 5 se les incorporó una constricción tipo Venturi y una conexión más directa entre el ducto de succión y la zona donde se esperaba una menor presión estática.

Una vez desarrollados los diseños preliminares fueron evaluados mediante simulaciones en SolidWorks con el módulo de Flow Simulation para conocer el comportamiento del flujo de aire, con el objetivo de realizar una comparación homogénea entre los modelos, se consideraron condiciones de frontera equivalentes: una velocidad de entrada del flujo de aire de 60 m/s, presión atmosférica en la salida de 101 325 Pa y aire como fluido de trabajo. La evaluación se centró en la distribución de velocidad, la presión estática, la ubicación de la presión mínima, las trayectorias de las líneas de corriente y la presencia de zonas de recirculación o estancamiento.

Con el propósito de presentar los resultados de las simulaciones monofásicas se realizó Tabla 7, donde se presenta la modificación geométrica principal, el comportamiento de velocidad máxima y presión estática mínima, el resultado más relevante y la decisión tomada para cada configuración. El análisis CFD de cada modelo diseñado se presenta en el Anexo A.

Tabla 7. Comparación geométrica y evaluación preliminar de los diseños propuestos.

Diseño	Modificación geométrica principal	Velocidad máxima	Presión estática mínima	Resultado principal
Diseño 1	Configuración inicial con dos depósitos laterales y ducto simple.	92.71 m/s	98 662.6 Pa	Presenta una geometría poco definida para generar efecto Venturi; la presión mínima se distribuye en un área amplia y no se concentra en una zona de succión.
Diseño 2	Entrada superior del flujo y depósito lateral con cámara interna.	251.598 m/s	- 1.55957e+07 Pa	La geometría genera recirculaciones y desplaza lateralmente la región de baja presión, reduciendo la correspondencia con el ducto de succión.
Diseño 3	Constricción pronunciada tipo doble cono.	596.394 m/s	77 612.16 Pa	Incrementa notablemente la velocidad en la constricción; sin embargo, el ducto de succión no coincide con la zona de presión mínima.
Diseño 4	Ducto convergente-divergente con depósito lateral y succión inclinada.	193.523 m/s	86 677 Pa	Mejora la alineación entre el ducto de succión y la zona de baja presión, aunque la geometría aún requiere ajustes para integrar mejor el depósito y la constricción.
Diseño 5	Geometría Venturi con ducto adicional de compensación.	235.404 m/s	80 547.2 Pa	Presenta una aceleración estable y una caída de presión favorable; no obstante, incorpora mayor complejidad geométrica por el ducto adicional.
Diseño 6	Geometría simétrica con constricción Venturi definida.	614.306 m/s	28 431.6 Pa	Presenta alta aceleración y una presión mínima significativa; sin embargo, el ducto de succión no se ubica directamente en la zona de presión mínima.

A partir de la comparación presentada en la Tabla 7, se observa que los primeros 4 diseños permitieron identificar limitaciones geométricas asociadas con la ausencia de una constricción definida, la presencia de recirculaciones y la falta de coincidencia entre el punto de succión y la zona de menor presión estática. En el Diseño 1 la geometría no presentó un perfil Venturi definido, por lo que la aceleración del flujo y la caída de presión fueron limitadas. En el Diseño 2 aunque se obtuvo una mayor velocidad, la trayectoria interna del

flujo generó recirculaciones. En el Diseño 3 la constricción produjo un incremento de velocidad, pero el ducto de succión no coincidió con la zona de presión mínima.

Los Diseños 4, 5 y 6 representaron una mejora en la evolución geométrica del sistema, en estos modelos se incorporó una geometría convergente-divergente y se buscó una conexión más directa entre el depósito del líquido y la constricción del ducto. El Diseño 4 mejoró la ubicación del ducto de succión, el Diseño 5 incorporó un ducto de compensación de presión aunque con mayor complejidad geométrica. y el Diseño 6 presentó una caída de presión más significativa.

4.4 Selección del diseño adecuado

Con base en los resultados obtenidos de los diseños presentados previamente se procedió con el desarrollo del Diseño 7 buscando una configuración ajustada a partir de las ventajas identificadas en los modelos anteriores, esta propuesta buscó mejorar la coincidencia entre la constricción del ducto, la zona de menor presión estática y el ducto de succión manteniendo una geometría compacta y compatible con el depósito del líquido.

La selección del modelo no se basó únicamente en los valores máximos de velocidad o en los valores mínimos de la presión estática obtenidos durante la evaluación preliminar, también se consideraron aspectos de diseño como: coincidencia entre la geometría del sistema y la zona donde se busca inducir la succión del líquido. Algunos modelos preliminares presentaron incrementos importantes de velocidad y una disminución en la presión estática, sin embargo, la región de menor presión no siempre coincidió con la ubicación del ducto de succión.

El Diseño 7 integra mejoras en su geometría como lo es: un ducto con perfil convergente-divergente, una constricción definida, un ducto de succión orientado hacia la región de baja presión y un depósito del líquido a asperjar, como se observa en la Figura 9.

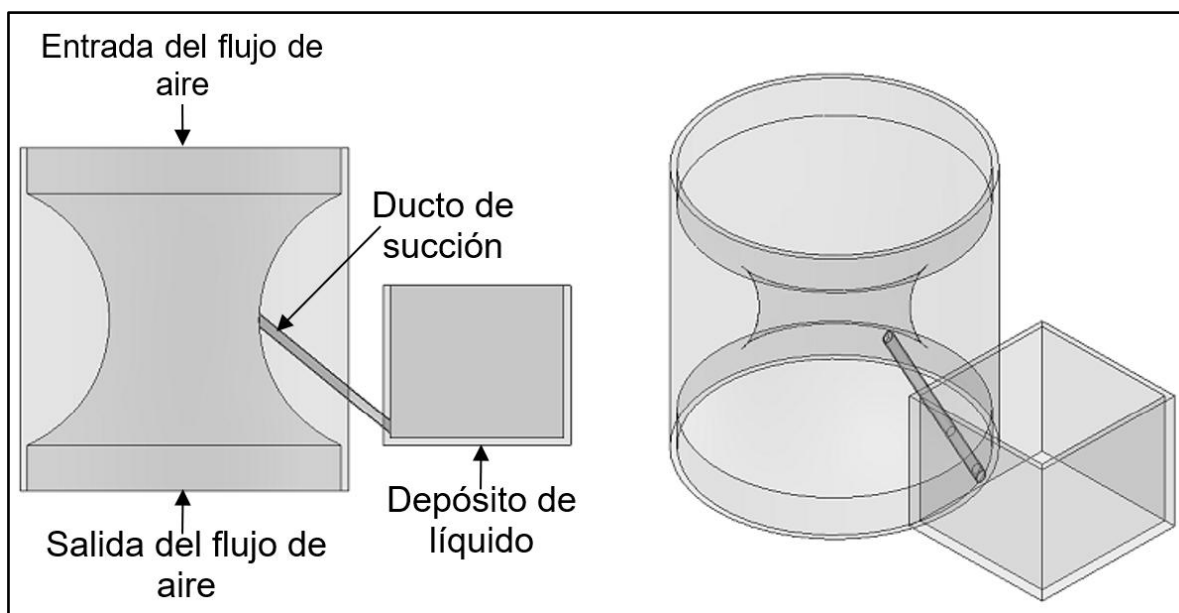


Figura 9. Configuración geométrica correspondiente al Diseño 7.

Para justificar la selección del diseño se consideraron los criterios que se muestran en la Tabla 8, los cuales permitieron evaluar la configuración desde el punto de vista geométrico y funcional, sin presentar todavía una validación completa del desempeño operativo del sistema.

Tabla 8. Características principales del diseño seleccionado.

Criterio de selección	Descripción	Característica del Diseño 7
Geometría tipo Venturi	El ducto debe presentar una reducción de área en la constricción para favorecer la aceleración del flujo de aire.	El modelo incorpora un perfil convergente-divergente con una zona de constricción definida.
Ubicación del ducto de succión	El ducto de succión debe conectarse en una zona de baja presión.	El ducto de succión se orienta hacia la constricción del Venturi, mejorando la correspondencia entre succión y presión mínima.
Integración del depósito	El depósito debe acoplarse al sistema sin interferir de forma significativa con el flujo principal de aire.	El depósito se integra lateralmente y mantiene comunicación directa con el ducto de succión.
Continuidad del flujo	La geometría debe evitar cambios bruscos que generen zonas muertas, estancamientos o recirculaciones desfavorables.	La configuración presenta una transición más ordenada entre la entrada, la constricción y la salida del ducto.
Compatibilidad geométrica	El modelo debe conservar una forma compacta para su posible integración en el	El diseño mantiene una geometría compacta y funcional para continuar con la evaluación numérica.

	fuselaje de un UAV con características particulares.	
--	--	--

El modelo seleccionado conserva las dimensiones principales definidas en los parámetros de diseño: diámetro de entrada y salida de 140 mm, diámetro de constricción de 64 mm, altura del ducto de 150 mm y depósito del líquido acoplado mediante un ducto de succión inclinado. En el Anexo B, se pueden observar los dibujos técnicos del diseño seleccionado y propuesto como el idóneo para realizar aspersión a partir del efecto Venturi.

Capítulo 5. Análisis y discusión de resultados del sistema de aspersión

El presente capítulo tiene como propósito analizar y discutir el comportamiento numérico del diseño seleccionado bajo diferentes condiciones de operación. La evaluación del sistema se realizó mediante simulaciones de Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), considerando dos etapas de análisis.

5.1 Condiciones generales de simulación

La verificación numérica del diseño seleccionado se desarrolló mediante dos etapas de simulación CFD, la primera correspondió al análisis monofásico del flujo de aire en SolidWorks Flow Simulation, mientras que la segunda consideró la interacción aire-líquido mediante un análisis multifásico en ANSYS Fluent, en las siguientes subsecciones se describen las condiciones de frontera, variables monitoreadas y criterios establecidos para cada etapa.

5.1.1 Condiciones del análisis monofásico en SolidWorks Flow Simulation

El análisis monofásico se realizó en SolidWorks Flow Simulation considerando aire como fluido de trabajo, el propósito de esta etapa fue evaluar el comportamiento aerodinámico del diseño seleccionado, particularmente la aceleración del flujo en la constricción del ducto y la disminución de presión estática asociada al efecto Venturi, para esta etapa se definieron condiciones generales del sistema como se muestra en la Tabla 9.

Tabla 9. Condiciones generales para realizar simulaciones CFD.

Condición	Descripción
Tipo de análisis	Monofásico
Tipo de fluido	Aire
Condiciones de frontera	15 velocidades de flujo de aire
Tipos de objetivos	Objetivos globales en el ducto de tipo Venturi Objetivos superficiales en la constricción Objetivos superficiales en la salida
Variables de interes	Velocidad promedio Velocidad máxima Presión estática promedio Presión estática mínima Presión estática máxima

Para este análisis también se consideraron condiciones de frontera, las cuales incluyen la velocidad en la entrada del ducto y presión atmosférica en la salida, para las condiciones de entrada establecieron 15 velocidades del flujo de aire, de las cuales 7 de ellas

corresponden a velocidades promedio del subsistema de sustentación del UAV al cual se acoplará el sistema de aspersión, como se muestra en la Tabla 10, y las otras 8 velocidades son parámetros considerados para conocer el comportamiento del sistema a medida que varía la velocidad del flujo de aire.

Tabla 10. Parámetros de velocidades del flujo de aire de las toberas del fuselaje del UAV obtenidos en simulaciones CFD.

Velocidad de rotación de la hélice en RPM	Lugar	Velocidad del flujo de aire que ingresa a la tobera "m/s"	Velocidad promedio "m/s"
3200	Tobera Delantera Derecha	30.76	30.37
	Tobera Delantera izquierda	30.04	
	Tobera Trasera Derecha	30.25	
	Tobera Trasera Izquierda	30.43	
3700	Tobera Delantera Derecha	35.39	34.94
	Tobera Delantera izquierda	34.60	
	Tobera Trasera Derecha	34.77	
	Tobera Trasera Izquierda	35.03	
4200	Tobera Delantera Derecha	39.95	39.45
	Tobera Delantera izquierda	39.08	
	Tobera Trasera Derecha	39.24	
	Tobera Trasera Izquierda	39.56	
4700	Tobera Delantera Derecha	44.46	43.90
	Tobera Delantera izquierda	43.49	
	Tobera Trasera Derecha	43.65	
	Tobera Trasera Izquierda	44.02	
5200	Tobera Delantera Derecha	48.88	47.17
	Tobera Delantera izquierda	47.83	
	Tobera Trasera Derecha	47.96	
	Tobera Trasera Izquierda	44.02	
5700	Tobera Delantera Derecha	53.18	52.51
	Tobera Delantera izquierda	52.07	
	Tobera Trasera Derecha	52.16	
	Tobera Trasera Izquierda	52.65	
6200	Tobera Delantera Derecha	57.36	56.66
	Tobera Delantera izquierda	56.21	
	Tobera Trasera Derecha	56.28	
	Tobera Trasera Izquierda	56.81	

Para el monitoreo de las variables de interés en el entorno de SolidWorks Flow Simulation se utilizaron objetivos globales y objetivos superficiales. Los objetivos globales del dominio denominados Global Goals, son parámetros de control y medición configurados para evaluar el comportamiento general de todo el sistema, mientras que los objetivos superficiales denominados Surface Goals, son parámetros de control y medición asignados

a caras o geometrías específicas y sirven para evaluar el comportamiento exacto de un fluido al entrar en contacto con las paredes del modelo 3D.

En cada simulación se analizaron tres tipos de parámetros:

- Parámetros globales del ducto Venturi, que describen el comportamiento general del flujo dentro del sistema.
- Parámetros superficiales en la constricción, donde se espera la máxima aceleración del flujo y la mínima presión estática.
- Parámetros superficiales en la salida del ducto, los cuales permiten evaluar la recuperación de presión y el comportamiento del flujo.

En la Figura 10 se muestran las regiones de análisis del modelo donde se obtuvieron los parámetros aerodinámicos de interés.

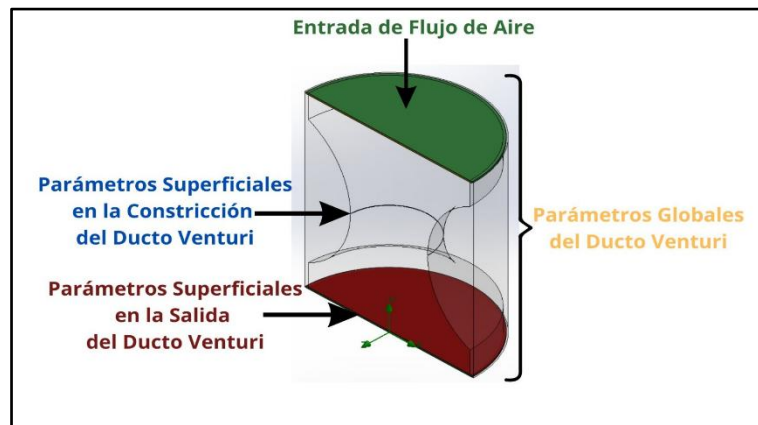


Figura 10. Regiones de análisis para la obtención de parámetros aerodinámicos en el ducto de tipo Venturi.

En las simulaciones monofásicas se monitorearon diversas variables hidrodinámicas con el objetivo de evaluar el desempeño del ducto tipo Venturi y así conocer las condiciones potencialmente favorables para inducir succión del fluido secundario.

La velocidad del flujo de aire fue una de las principales variables analizadas porque permite cuantificar la aceleración del flujo en la región de la constricción del Venturi y evaluar el principio de continuidad. El incremento de velocidad en esta sección es un indicador directo de la efectividad geométrica del ducto para transformar el flujo entrante en energía cinética útil. También se monitorea la presión estática a lo largo del ducto, con el fin de determinar la caída de presión en la constricción. Esta diferencia de presión es un parámetro fundamental para la inducción de la succión del líquido en el sistema.

Adicionalmente, se analizaron los gradientes de presión y velocidad en la región de la constricción, los cuales permiten identificar zonas de alta aceleración del flujo y evaluar la

estabilidad del régimen de operación. Estos gradientes son relevantes para detectar posibles pérdidas energéticas asociadas a separación del flujo o recirculación no deseada.

5.1.2 Condiciones del análisis multifásico en ANSYS Fluent

El análisis multifásico se realizó en ANSYS Fluent con el propósito de complementar los resultados obtenidos en SolidWorks Flow Simulation. A diferencia del análisis monofásico esta etapa consideró la interacción entre el flujo de aire y el líquido contenido en el depósito, permitiendo observar la respuesta del fluido secundario ante la diferencia de presión generada en el ducto tipo Venturi.

Para esta etapa se seleccionaron tres velocidades de entrada: 20, 40 y 60 m/s. Estas velocidades representan tres condiciones de análisis: baja velocidad, velocidad dentro del intervalo favorable y alta velocidad. La velocidad de 20 m/s permite observar el comportamiento del sistema cuando la depresión generada es limitada, la velocidad de 40 m/s representa una condición cercana al intervalo operativo favorable identificado en el análisis monofásico, y la velocidad de 60 m/s permite analizar el comportamiento del sistema bajo una condición de alta energía del flujo.

5.2 Resultados generales de las simulaciones monofásicas y determinación de los rangos operativos

En esta sección se presentan los resultados obtenidos mediante las 15 simulaciones monofásicas realizadas en SolidWorks con el módulo de Flow Simulation para el diseño seleccionado del sistema de aspersión. Las simulaciones se desarrollaron con velocidades de entrada comprendidas entre 20 y 60 m/s, con el propósito de analizar la respuesta aerodinámica del ducto de tipo Venturi e identificar las condiciones de operación que generan una aceleración del flujo y disminución de presión estática en la constricción favorable.

Los resultados cuantitativos se presentan en la Tabla 11, en la cual se incluyen los parámetros globales del ducto, los parámetros superficiales de la constricción y los parámetros superficiales de la salida. Para determinar los rangos operativos se consideraron principalmente la velocidad máxima y la presión estática mínima obtenidas mediante los objetivos superficiales definidos en la constricción, debido a que esta región coincide con la conexión del ducto de succión y constituye la zona de interés para inducir el movimiento del líquido desde su depósito.

Tabla 11. Resultados de parámetros obtenidos en el ducto de aspersión a partir de simulaciones CFD.

Simulación	Entrada de Flujo de aire	Parámetros Globales del Ducto Venturi				Parámetros Superficiales en la Constricción del Ducto Venturi					Parámetros Superficiales en la Salida del Ducto Venturi		
	Velocidad m/s	GG Velocidad Promedio "m/s"	GG Velocidad Máxima "m/s"	GG Presión estática Promedio "Pa"	GG Presión estática mínima "Pa"	SG Velocidad Promedio "m/s"	SG Velocidad máxima "m/s"	SG Presión estática Promedio "Pa"	SG Presión estática mínima "Pa"	SG Presión estática máxima "Pa"	SG Velocidad Promedio "m/s"	SG Velocidad mínima "m/s"	SG Velocidad máxima "m/s"
1	20	33.716	90.475	100062.38	96929.19	19.748	72.194	97402.28	96929.19	97899.04	18.411	0.193	62.477
2	25	48.779	129.506	99394.32	92383.62	28.274	99.006	93211.96	92383.62	93918.54	27.631	0.227	89.541
3	30	64.292	169.692	101659.11	88443.97	34.933	120.206	89445.03	88661.32	90582.28	36.204	0.003	114.62
4	30.37	65.037	172.322	101893.8	88281.5	35.704	121.305	89176.16	88446.58	90343.53	36.874	0.00005328	114.69
5	34.94	70.188	186.462	103680.38	87909.86	39.55	133.147	88183.76	87420.4	89038.06	39.742	0.0008233	120.629
6	35	70.262	186.7	103670.75	87319.62	41.062	133.29	88757.17	87356.96	89021	39.908	0.0004797	120.748
7	39.45	83.992	230.954	102761.99	78565.58	47.264	156.782	80807.85	79137.9	82629.61	47.057	0.047	142.312
8	40	84.702	235.559	102935.25	78178.04	48.159	160.148	79997.81	78180.54	81610.98	47.315	0.129	142.32
9	43.9	116.256	447.538	113892.14	35419.84	80.248	268.924	68724.37	60131.36	76307	73.218	0.278	193.728
10	45	131.582	488.583	125304.09	29403.06	90.794	304.265	81739.8	72200.85	90653.97	89.316	0.144	294.878
11	47.17	166.358	821.615	155835.52	10145.73	119.854	367.457	114687.19	99714.68	127269.63	115.713	2.021	347.917
12	50	217.565	889.812	222958.62	7409.68	246.285	590.403	179488.18	155585.14	199021.98	239.052	4.945	587.378
13	52.51	252.445	759.03	320165.14	2596.94	349.248	625.255	266108.52	229915.24	295201.86	340.175	2.068	619.865
14	56.66	304.117	758.5	599941.31	10748.09	493.992	676.744	508432.64	439105.51	563143.35	519.662	3.021	675.854
15	60	327.252	785.464	1008242.3	9960.18	583.645	698.25	851688.85	732179.23	943647.4	582.945	117.405	696.402

5.2.1 Comportamiento de la velocidad en la constricción

Los resultados muestran que la velocidad máxima en la constricción aumenta conforme se incrementa la velocidad de entrada del flujo de aire, para las condiciones de baja velocidad entre 20 y 30 m/s la velocidad máxima superficial en la constricción aumentó de 72.194 a 120.206 m/s, este comportamiento confirma que la reducción del área transversal del ducto produce una aceleración del flujo aun con las condiciones de entrada más bajas.

Entre 30.37 y 35 m/s la velocidad máxima en la constricción presentó un incremento gradual con valores de 121.305, 133.147 y 133.290 m/s, este intervalo representa una etapa de transición debido a que el flujo continúa acelerándose.

A partir de una velocidad de entrada de 39.45 m/s la aceleración del flujo se intensificó, las velocidades máximas superficiales obtenidas en la constricción fueron de 156.782 m/s para 39.45 m/s, 160.148 m/s para 40 m/s, 268.924 m/s para 43.9 m/s y 304.265 m/s para 45 m/s, estos resultados evidencian un incremento importante de la energía cinética del flujo dentro de la constricción del Venturi.

Para velocidades de entrada superiores a 45 m/s la velocidad máxima continuó aumentando y alcanzó valores de 367.457 m/s a 47.17 m/s, 590.403 m/s a 50 m/s, 625.255 m/s a 52.51 m/s, 676.744 m/s a 56.66 m/s y 698.250 m/s a 60 m/s, estos valores aún deben analizarse junto con el comportamiento de la presión estática, ya que una mayor velocidad no implica necesariamente mejores condiciones para inducir la succión del líquido.

En la Figura 11 se presenta la relación entre la velocidad de entrada y la velocidad máxima superficial obtenida en la constricción.

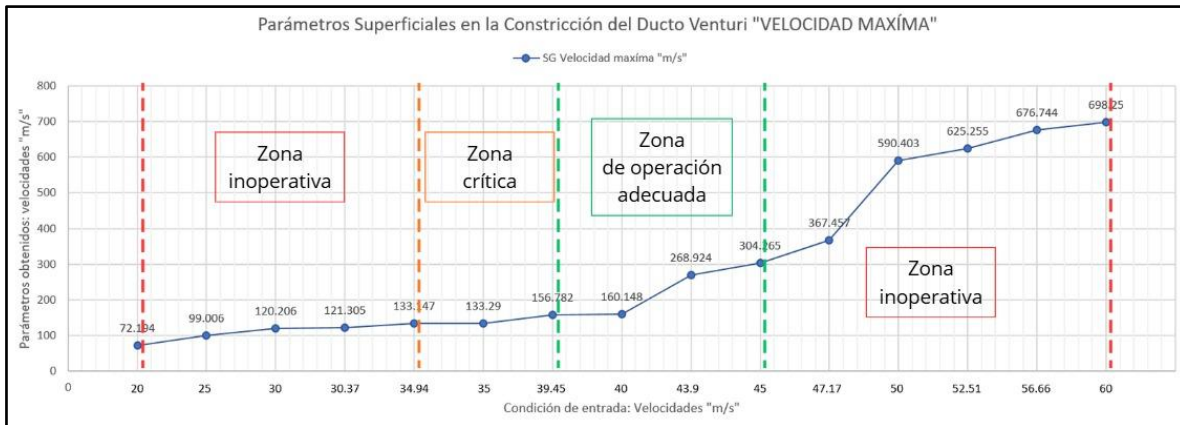


Figura 11. Gráfica de dispersión de la velocidad máxima del flujo de aire en la constricción del ducto Venturi en función de la velocidad de entrada.

5.2.2 Comportamiento de la presión estática en la constricción

La presión estática mínima superficial en la constricción presentó una disminución progresiva en las primeras condiciones evaluadas, para velocidades de entrada de 20, 25 y 30 m/s se obtuvieron presiones mínimas de 96 929.19, 92 383.62 y 88 661.32 Pa, aunque estos valores son inferiores a la presión atmosférica de referencia la reducción obtenida es moderada.

Para velocidades de entrada de 30.37, 34.94 y 35 m/s las presiones mínimas fueron de 88 446.58, 87 420.40 y 87 356.96 Pa, en este intervalo la presión continúa disminuyendo aunque la variación entre los casos es relativamente pequeña, lo que indica un comportamiento de transición antes de alcanzar las condiciones de mayor depresión.

Una reducción más significativa se observó entre 39.45 y 45 m/s, para estas velocidades se obtuvieron presiones mínimas de 79 137.90 y 78 180.54 Pa, la condición de 43.9 m/s presentó la menor presión estática superficial de las 15 simulaciones con un valor de 60 131.36 Pa. Posteriormente a 45 m/s la presión mínima aumentó a 72 200.85 Pa.

A partir de 47.17 m/s se produjo un cambio importante en el comportamiento de la presión estática mínima superficial, porque aumentó a 99 714.68 Pa y continuó incrementándose hasta alcanzar valores de 155 585.14 Pa a 50 m/s, 229 915.24 Pa a 52.51 m/s, 439 105.51 Pa a 56.66 m/s y 732 179.23 Pa a 60 m/s, este incremento indica que aunque la velocidad del flujo continúa aumentando la región de la constricción deja de mantener la condición de baja presión requerida para favorecer la succión.

En la Figura 12 se presenta la relación entre la velocidad de entrada y la presión estática mínima superficial obtenida en la constricción.

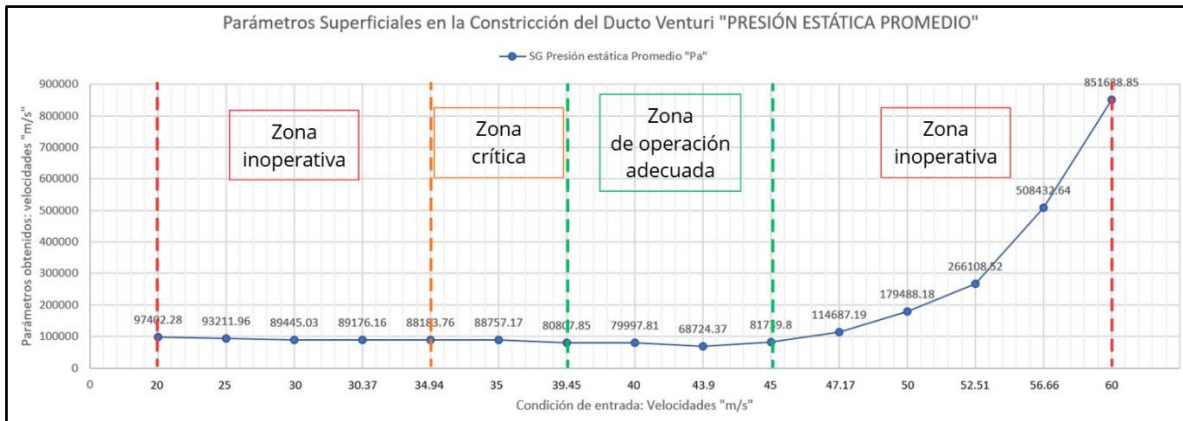


Figura 12. Gráfica de dispersión de la presión estática mínima generada en la constricción del ducto Venturi en función de la velocidad de entrada.

5.2.3 Determinación de los rangos operativos

La determinación de los rangos operativos se realizó mediante el análisis conjunto de la velocidad máxima y la presión estática mínima en la constricción, este criterio permite evitar que el comportamiento del sistema sea evaluado únicamente a partir del incremento de velocidad, debido a que el propósito del ducto no consiste en alcanzar la mayor velocidad posible sino en generar una zona de presión reducida en la región donde se conecta el ducto de succión.

Con base en las tendencias observadas el intervalo evaluado se clasificó en cuatro rangos: zona inoperativa "baja velocidad no favorable", zona crítica, zona de operación adecuada y zona inoperativa "alta velocidad no favorable", la clasificación se presenta en la Tabla 12.

Tabla 12. Clasificación de los rangos operativos del sistema de aspersión.

Rango operativo	Velocidades de entrada "m/s"	Velocidad máxima en la constricción "m/s"	Presión estática mínima en la constricción "Pa"	Interpretación
Zona inoperativa	20	72.194	96 929.19	El flujo se acelera, pero la disminución de presión es moderada.
	25	99.006	92 383.62	
	30	120.206	88 661.32	
Zona crítica	30.37	121.305	88 446.58	El sistema presenta una variación gradual antes de alcanzar las condiciones de mayor depresión.
	34.94	133.147	87 420.4	
	35	120.206	87 356.96	
Zona de operación adecuada	39.45	156.782	79 137.9	Se obtiene la combinación más favorable entre aceleración del flujo
	40	160.148	78 180.54	
	43.9	268.924	60 131.36	

	45	304.265	72 200.85	y disminución de presión estática.
Zona inoperativa	47.17	367.457	99 714.68	La velocidad continúa aumentando, pero la presión en la constricción se incrementa y deja de favorecer la succión.
	50	590.403	155 585.14	
	52.51	625.255	229 915.24	
	56.66	676.744	439 105.51	
	60	698.250	732 179.23	

En la zona inoperativa comprendida entre 20 y 30 m/s, la geometría genera una aceleración del flujo y una disminución inicial de la presión estática, la presión mínima permanece entre 96 929.19 y 88 661.32 Pa, valores inferiores a la presión atmosférica de referencia de 101 325 Pa, por lo que existe un gradiente de presión estática podría inducir el desplazamiento del líquido desde el depósito, sin embargo, la depresión generada en este intervalo es menor que la obtenida en la zona de operación favorable. Por esta razón, el gradiente disponible podría resultar insuficiente para vencer de manera estable la carga hidrostática y las pérdidas presentes en el ducto de succión.

La zona crítica comprende las velocidades de 30.37, 34.94 y 35 m/s, en este intervalo la velocidad máxima aumenta de 121.305 a 133.290 m/s, mientras que la presión estática se mantiene por debajo de la presión atmosférica con valores de 88 446.58 a 87 356.96 Pa, lo que indica que existe un gradiente de presión con potencial para iniciar el desplazamiento del líquido desde el depósito, sin embargo, la reducción de presión todavía no alcanza los valores observados en la zona de operación favorable. Esta zona representa una condición intermedia en la que podría presentarse una succión incipiente, intermitente o de bajo caudal, bajo estas condiciones la incorporación del líquido al flujo principal podría comenzar, pero no necesariamente mantenerse de forma estable ni producir una aspersión continua y uniforme.

La zona de operación adecuada se identificó entre 39.45 y 45 m/s, en este intervalo se presenta una aceleración significativa del flujo acompañada de una disminución importante de la presión estática en la constricción. La condición de 43.9 m/s destaca como el punto de mayor depresión al registrar una velocidad máxima superficial de 268.924 m/s y una presión estática mínima de 60 131.36 Pa, aunque a 45 m/s la velocidad máxima aumentó hasta 304.265 m/s, la presión mínima se elevó a 72 200.85 Pa, lo cual indica que la condición de máxima velocidad dentro del intervalo no coincide con la condición de mínima presión. Estos resultados indican que dentro de este intervalo se genera el mayor gradiente de presión estática capaz de inducir la succión pasiva del líquido desde el depósito.

Para velocidades superiores a 45 m/s, el sistema entra en una zona inoperativa de alta velocidad no favorable, en este rango la velocidad máxima continúa aumentando, sin embargo, la presión estática mínima en la constricción presenta un incremento pronunciado. A 47.17 m/s la presión mínima aumentó a 99 714.68 Pa y a partir de 50 m/s superó incluso la presión atmosférica de referencia, este comportamiento indica que la región de la constricción deja de generar la depresión necesaria para favorecer la entrada del líquido por lo que el incremento de velocidad no constituye una mejora del funcionamiento esperado, por lo tanto, no se esperan condiciones favorables para generar una aspersión estable mediante el efecto Venturi.

A partir de los resultados obtenidos, se establece que el rango operativo favorable del sistema se encuentra entre 39.45 y 45 m/s. Dentro de este intervalo, la condición de 43.9 m/s representa el punto de mayor reducción de presión estática en la constricción, por lo tanto la velocidad de 40 m/s constituye una condición representativa del intervalo favorable propiciar una aspersión y puede utilizarse para complementar la verificación numérica mediante el análisis multifásico aire-líquido en ANSYS Fluent.

5.3 Análisis de casos representativos en SolidWorks Flow Simulation

En esta sección se explican 4 simulaciones de las 15 realizadas en el ducto de tipo Venturi, con el objetivo de conocer el comportamiento del flujo de aire, especialmente el incremento de su velocidad en la constricción y la reducción de la presión estática.

5.3.1 Caso a baja velocidad del flujo de aire: 20 m/s

La simulación se realizó considerando una velocidad de entrada del flujo de aire de 20 m/s, con el objetivo de analizar el comportamiento inicial del flujo dentro del ducto de aspersión y evaluar la respuesta aerodinámica del sistema ante condiciones de operación de baja velocidad.

De acuerdo con los resultados obtenidos, el flujo de aire experimenta una aceleración al aproximarse a la región de la constricción del ducto Venturi, este comportamiento puede observarse en la Figura 13, donde se presenta la distribución de velocidades del flujo dentro del ducto. En la Figura 13(a) se muestra el campo de velocidades, donde se aprecia un incremento gradual de la velocidad en la zona central del ducto conforme el flujo se aproxima a la constricción. Asimismo, las líneas de corriente mostradas en la Figura 13(b) evidencian que el flujo mantiene una trayectoria relativamente uniforme y alineada con el eje del ducto, sin presentar recirculaciones importantes en las paredes internas.

Los resultados cuantitativos obtenidos en la simulación indican que el sistema presenta una velocidad promedio global de 33.716 m/s, mientras que la velocidad máxima dentro del ducto alcanza 90.475 m/s, lo cual confirma que el flujo experimenta una aceleración considerable al atravesar la constricción. Este incremento de velocidad se debe a la reducción del área transversal del ducto, fenómeno que está asociado al principio de conservación de la masa, donde el fluido incrementa su velocidad para mantener constante el flujo volumétrico.

Finalmente, en la salida del ducto se registra una velocidad promedio de 18.411 m/s, con una velocidad máxima de 62.477 m/s, lo que indica que parte de la energía cinética adquirida durante la aceleración del flujo se redistribuye después de pasar por la constricción.

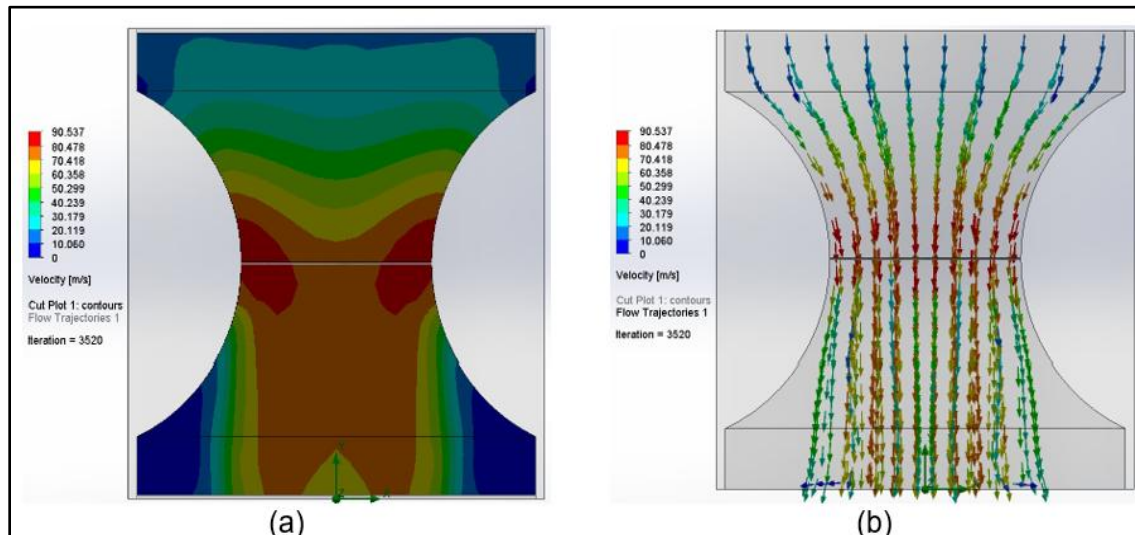


Figura 13. Distribución de velocidades del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 20 m/s. a) Campo de velocidades (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de velocidad.

En términos de presión, el comportamiento del flujo dentro del ducto puede observarse en la Figura 14, donde se muestra la distribución de presiones del sistema. En la Figura 14(a) se presenta el campo de presiones, en el cual se identifica una ligera disminución de la presión estática en la región de la constricción. Por su parte, las líneas de corriente mostradas en la Figura 14(b) permiten observar la evolución del flujo a lo largo del ducto, evidenciando que el flujo se acelera al atravesar la zona de menor diámetro.

Los resultados numéricos muestran que el ducto presenta una presión estática promedio de 100 062.38 Pa, mientras que el valor mínimo registrado dentro del sistema es de 96 929.19 Pa. En la región específica de la constricción del ducto Venturi se obtuvo una presión estática promedio de 97 402.28 Pa, con un valor máximo de 97 899.04 Pa y un valor mínimo

de 96 929.19 Pa, lo cual confirma la presencia de una zona de presión ligeramente inferior en esta región.

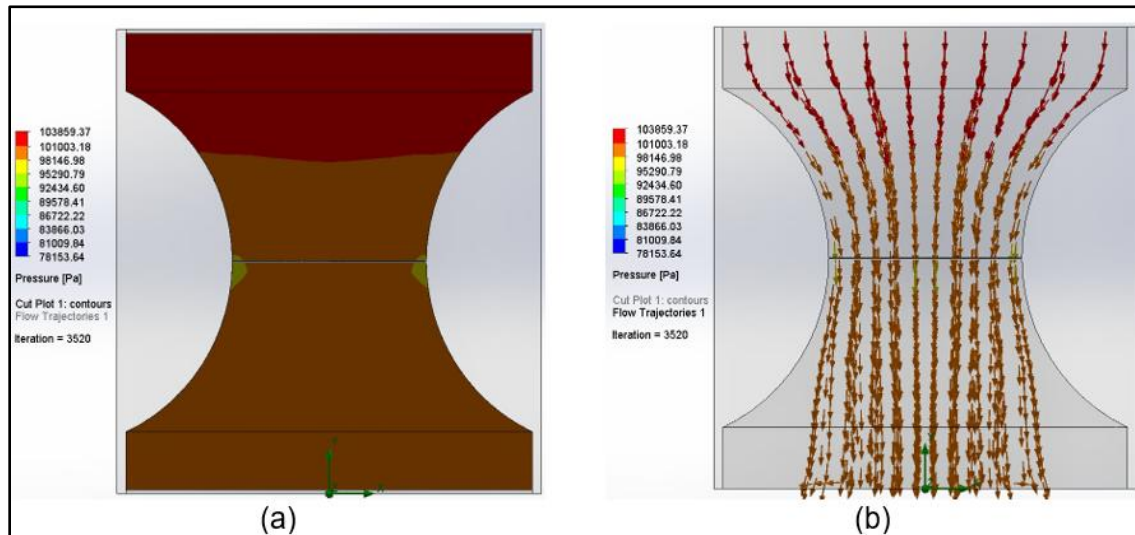


Figura 14. Distribución de presiones del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 20 m/s. a) Campo de presiones (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de presiones.

En general los resultados de esta simulación muestran que aun cuando la geometría del ducto comienza a generar el comportamiento característico de un sistema Venturi, la reducción de presión obtenida a una velocidad de entrada de 20 m/s es relativamente limitada, por lo que la capacidad del sistema para inducir succión del fluido líquido aún es baja. Sin embargo, el comportamiento observado confirma que la geometría del ducto permite generar una aceleración progresiva del flujo y una disminución de presión en la constricción, fenómeno fundamental para el funcionamiento del sistema de aspersión propuesto.

5.3.2 Caso dentro del intervalo favorable: 40 m/s

La simulación se realizó considerando una velocidad de entrada del flujo de aire de 40 m/s, con el objetivo de analizar el comportamiento del flujo dentro del ducto Venturi ante un incremento adicional de la velocidad de entrada y evaluar su efecto en la distribución de las variables aerodinámicas dentro del sistema.

El comportamiento del flujo dentro del ducto puede observarse en la Figura 15, donde se presenta la distribución de velocidades del flujo de aire. En la Figura 15(a) se muestra el campo de velocidades, donde se aprecia que el flujo alcanza mayores magnitudes de velocidad conforme se aproxima a la región de la constricción del ducto Venturi. La variación de colores observada en esta región indica una aceleración significativa del flujo al

atravesar la zona de menor diámetro. Asimismo, las líneas de corriente mostradas en la Figura 15(b) evidencian que el flujo se mantiene alineado con el eje del ducto y se dirige hacia la constricción del Venturi sin presentar recirculaciones significativas, lo que indica que el flujo mantiene un comportamiento aerodinámico estable dentro del sistema.

Los resultados cuantitativos obtenidos en esta simulación indican que el sistema presenta una velocidad promedio global de 84.702 m/s, mientras que la velocidad máxima dentro del ducto alcanza 235.559 m/s, lo que representa un incremento considerable respecto a las simulaciones anteriores. Este comportamiento confirma que el aumento de la velocidad de entrada provoca una aceleración aún mayor del flujo al atravesar la constricción del ducto, fenómeno que se encuentra directamente relacionado con el principio de continuidad, donde el fluido incrementa su velocidad al atravesar una sección de menor área transversal. Finalmente, en la salida del ducto se registra una velocidad promedio de 47.315 m/s, con una velocidad máxima de 142.32 m/s, lo que indica que el flujo conserva una elevada energía cinética después de atravesar la constricción.

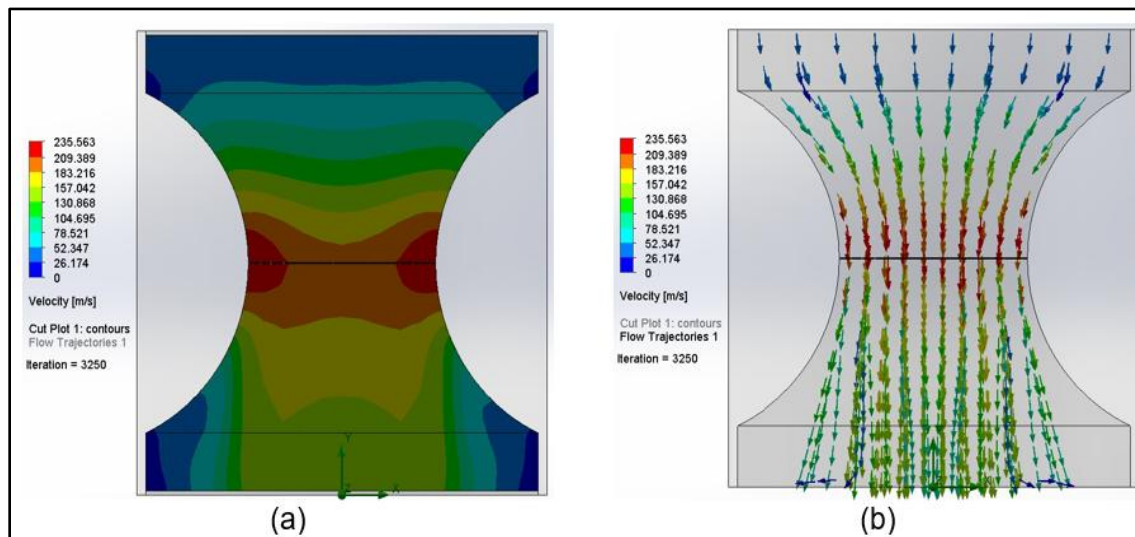


Figura 15. Distribución de velocidades del flujo de aire en el ducto de aspersion para una velocidad de entrada de 40 m/s. a) Campo de velocidades (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de velocidad.

En cuanto al comportamiento de la presión, la distribución mostrada en la Figura 16 permite observar una disminución significativa de la presión estática en la región de la constricción del ducto. En la Figura 16(a) se presenta el campo de presiones, donde se identifica claramente la formación de una zona de presión reducida en la constricción del Venturi. Por su parte, las líneas de corriente mostradas en la Figura 16(b) permiten observar la evolución del flujo dentro del ducto conforme atraviesa la región de menor diámetro.

Los resultados numéricos muestran que el sistema presenta una presión estática promedio de 102 935.25 Pa, mientras que la presión mínima registrada dentro del ducto es de 78 178.04 Pa, lo que evidencia una disminución considerable de la presión en comparación con las simulaciones anteriores.

En la región específica de la constricción del ducto Venturi se obtuvo una presión estática promedio de 79 997.81 Pa, con un valor máximo de 81 610.98 Pa y un valor mínimo de 78 180.54 Pa, lo cual confirma la presencia de una región de presión considerablemente menor en la constricción del ducto.

La reducción localizada de la presión estática indica que para una velocidad de entrada de 40 m/s, la geometría genera un gradiente adecuado para inducir la succión pasiva del líquido desde el depósito, esta condición confirma la formación de una región de baja presión necesaria para el funcionamiento del sistema.

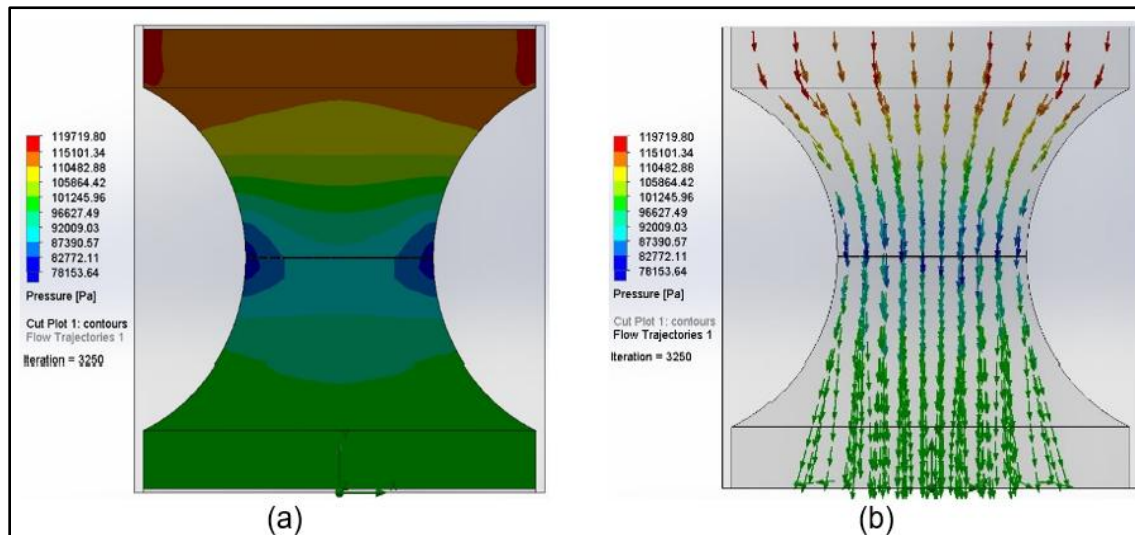


Figura 16. Distribución de presiones del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 40 m/s. a) Campo de presiones (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de presiones.

En general, los resultados obtenidos en esta simulación muestran que el incremento de la velocidad de entrada produce una aceleración significativa del flujo dentro de la constricción del ducto y una disminución aún más pronunciada de la presión estática en la constricción del Venturi, comportamiento característico del efecto Venturi. Este fenómeno confirma que la geometría del ducto favorece la formación de una región de baja presión cada vez más intensa, condición fundamental para inducir succión dentro del sistema de aspersión propuesto.

5.3.3 Caso dentro del intervalo favorable: 43.9 m/s

La simulación se realizó considerando una velocidad de entrada del flujo de aire de 43.9 m/s, con el objetivo de analizar el comportamiento del flujo dentro del ducto Venturi ante un incremento adicional de la velocidad de entrada y evaluar su efecto en la distribución de las variables aerodinámicas del sistema.

El comportamiento del flujo dentro del ducto puede observarse en la Figura 17, donde se presenta la distribución de velocidades del flujo de aire. En la Figura 17(a) se muestra el campo de velocidades, donde se aprecia que el flujo alcanza mayores magnitudes de velocidad conforme se aproxima a la región de la constricción del ducto Venturi. La variación de colores observada en esta región indica una aceleración considerable del flujo al atravesar la zona de menor diámetro. Asimismo, las líneas de corriente mostradas en la Figura 17(b) evidencian que el flujo se mantiene alineado con el eje del ducto y se dirige hacia la constricción del Venturi sin presentar recirculaciones significativas, lo que indica que el flujo mantiene un comportamiento aerodinámico estable dentro del sistema.

Los resultados cuantitativos obtenidos en esta simulación indican que el sistema presenta una velocidad promedio global de 116.256 m/s, mientras que la velocidad máxima dentro del ducto alcanza 447.538 m/s, lo que representa un incremento significativo respecto a las simulaciones anteriores. Este comportamiento confirma que el aumento de la velocidad de entrada provoca una aceleración aún mayor del flujo al atravesar la constricción del ducto, fenómeno que se encuentra directamente relacionado con el principio de continuidad, donde el fluido incrementa su velocidad al atravesar una sección de menor área transversal. Finalmente, en la salida del ducto se registra una velocidad promedio de 73.218 m/s, con una velocidad máxima de 193.728 m/s, lo que indica que el flujo conserva una elevada energía cinética después de atravesar la constricción.

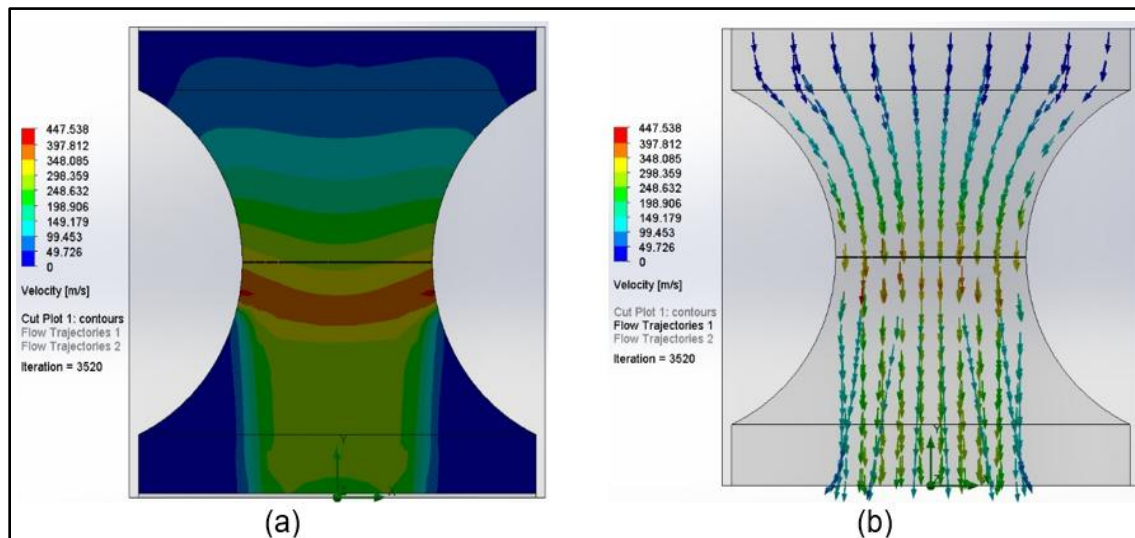


Figura 17. Distribución de velocidades del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 43.9 m/s. a) Campo de velocidades (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de velocidad.

En cuanto al comportamiento de la presión, la distribución mostrada en la Figura 18 permite observar una disminución considerable de la presión estática en la región de la constricción del ducto. En la Figura 18(a) se presenta el campo de presiones, donde se identifica claramente la formación de una zona de presión reducida en la constricción del Venturi. Por su parte, las líneas de corriente mostradas en la Figura 18(b) permiten observar la evolución del flujo dentro del ducto conforme atraviesa la región de menor diámetro.

Los resultados numéricos muestran que el sistema presenta una presión estática promedio de 113 892.14 Pa, mientras que la presión mínima registrada dentro del ducto es de 35 419.84 Pa, lo que evidencia una disminución considerable de la presión en comparación con las simulaciones anteriores.

En la región específica de la constricción del ducto Venturi se obtuvo una presión estática promedio de 68 724.37 Pa, con un valor máximo de 76 307 Pa y un valor mínimo de 60 131.36 Pa, lo cual confirma la presencia de una región de presión considerablemente menor en la constricción del ducto.

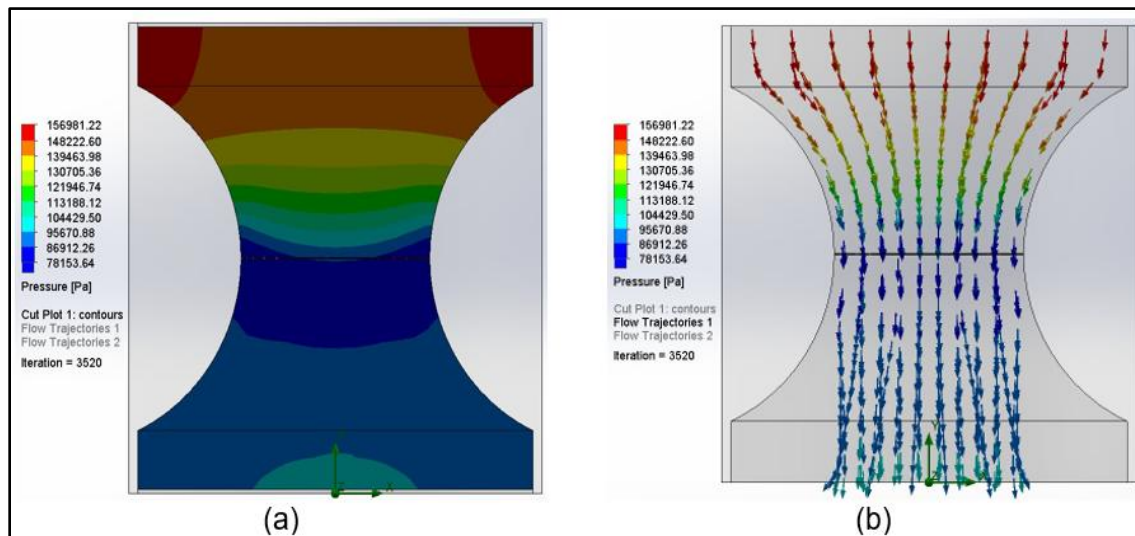


Figura 18. Distribución de presiones del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 43.9 m/s. a) Campo de presiones (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de presiones.

En general, los resultados obtenidos en esta simulación muestran que el incremento de la velocidad de entrada produce una aceleración significativa del flujo dentro de la constricción del ducto y una disminución aún más pronunciada de la presión estática en la constricción del Venturi, comportamiento característico del efecto Venturi. Este fenómeno confirma que la geometría del ducto favorece la formación de una región de baja presión cada vez más intensa, condición fundamental para inducir succión dentro del sistema de aspersión propuesto.

5.3.4 Caso a alta velocidad del flujo de aire: 60 m/s

La simulación se realizó considerando una velocidad de entrada del flujo de aire de 60 m/s, con el objetivo de analizar el comportamiento del flujo dentro del ducto Venturi bajo la condición de mayor velocidad de entrada evaluada en este estudio y determinar su efecto sobre la distribución de velocidades y presiones dentro del sistema.

El comportamiento del flujo puede observarse en la Figura 19, donde se presenta la distribución de velocidades dentro del ducto de aspersión. En la Figura 19(a) se muestra el campo de velocidades representado mediante líneas de corriente, donde se observa que el flujo de aire experimenta una aceleración significativa al aproximarse a la región de la constricción del ducto Venturi. Asimismo, en la Figura 19(b) se muestra la distribución de la magnitud de velocidad, donde se aprecia que los valores máximos de velocidad se concentran en la constricción del ducto. Este comportamiento es consecuencia directa de la reducción del área transversal del ducto, lo cual provoca una aceleración del flujo

conforme al principio de continuidad, donde el fluido incrementa su velocidad al atravesar una sección de menor área.

Los resultados cuantitativos obtenidos a partir de la simulación muestran que el sistema presenta una velocidad promedio global de 327.252 m/s, mientras que la velocidad máxima dentro del ducto alcanza 785.464 m/s, lo que representa el valor más alto obtenido entre todas las simulaciones realizadas. Este incremento en la velocidad confirma que el aumento de la velocidad de entrada provoca una aceleración considerable del flujo dentro de la constricción del ducto.

Finalmente, en la salida del ducto se registra una velocidad promedio de 582.945 m/s, con una velocidad máxima de 696.402 m/s, lo que indica que el flujo conserva una elevada energía cinética después de atravesar la constricción.

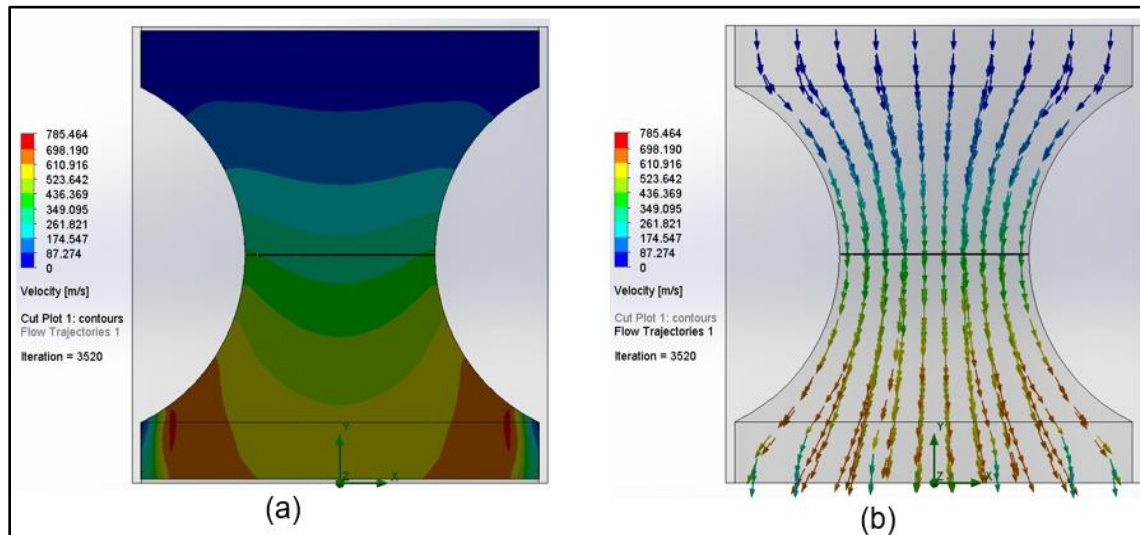


Figura 19. Distribución de velocidades del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 60 m/s. a) Campo de velocidades (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de velocidad.

En cuanto al comportamiento de la presión, la Figura 20 muestra la distribución de presiones dentro del ducto de aspersión. En la Figura 20(a) se presenta el campo de presiones representado mediante líneas de corriente, donde se observa una disminución significativa de la presión estática en la región de la constricción. Por su parte, la Figura 20(b) muestra la distribución de la magnitud de presión, donde se identifica claramente la formación de una región de baja presión en la constricción del ducto Venturi.

En la región específica de la constricción del ducto Venturi se obtuvo una presión estática promedio de 851 688.85 Pa, con un valor máximo de 943 647.4 Pa y un valor mínimo de 732 179.23 Pa, lo cual confirma la presencia de una región de presión significativamente reducida en la constricción del ducto.

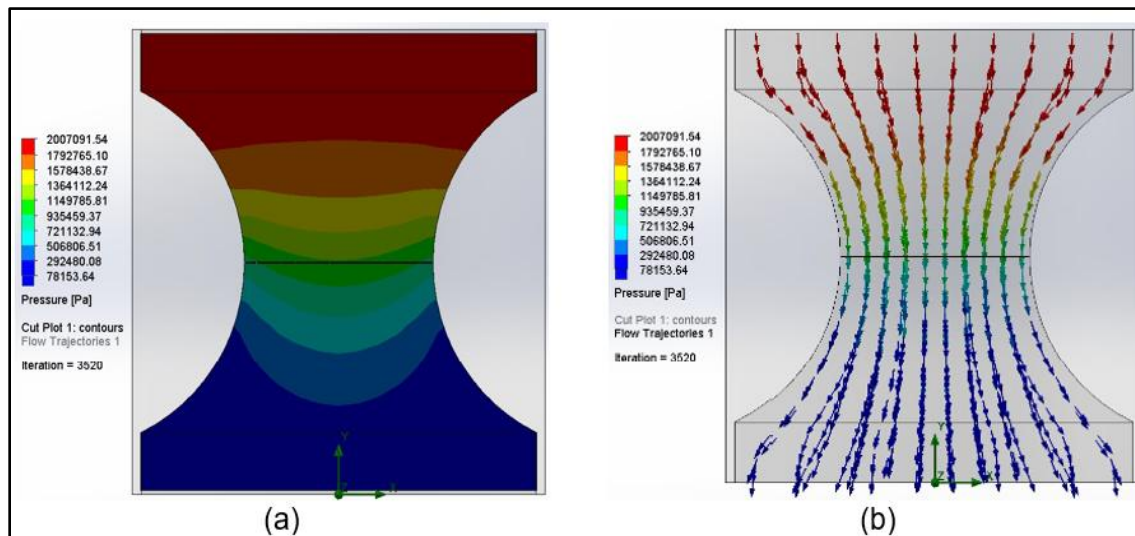


Figura 20. Distribución de presiones del flujo de aire en el ducto de aspersión para una velocidad de entrada de 60 m/s. a) Campo de presiones (líneas de corriente), b) Distribución de magnitud de presiones.

En general, los resultados obtenidos en esta simulación muestran que el incremento de la velocidad de entrada produce una aceleración máxima del flujo dentro de la constricción del ducto y una disminución significativa de la presión estática en la constricción del Venturi, comportamiento característico del efecto Venturi. Este fenómeno confirma que la geometría del ducto favorece la generación de una región de baja presión suficientemente intensa, condición necesaria para inducir succión dentro del sistema de aspersión propuesto.

5.4 Resultados del análisis multifásico en ANSYS Fluent

El análisis multifásico en ANSYS Fluent se realizó para complementar la evaluación monofásica desarrollada en SolidWorks Flow Simulation, incorporando de manera simultánea el flujo de aire y el líquido contenido en el depósito. Esta etapa permitió analizar la interacción entre ambas fases y observar la respuesta del líquido ante las condiciones generadas en la constricción del ducto tipo Venturi.

Para la presentación de los resultados se seleccionó una condición representativa del rango operativo favorable determinado previamente.

5.4.1 Justificación del caso multifásico seleccionado

La condición de 40 m/s fue seleccionada como caso representativo para presentar los resultados del análisis multifásico, debido a que se encuentra dentro del rango operativo favorable identificado entre 39.45 y 45 m/s. En el análisis monofásico a esta velocidad produjo una velocidad máxima superficial de 160.148 m/s en la constricción y una presión

estática mínima de 78 180.54 Pa, valores que evidencian una aceleración significativa del flujo y una reducción de presión respecto a la presión atmosférica de referencia.

Esta selección permite analizar el comportamiento aire-líquido y conocer la relación directa entre los resultados obtenidos en ambos programas. En SolidWorks Flow Simulation se identificó que esta condición genera una zona de presión reducida en la constricción, mientras que en ANSYS Fluent se buscó observar si dicha diferencia de presión produce una succión del líquido contenido en el depósito.

Por lo tanto, este análisis no tuvo como finalidad repetir la caracterización aerodinámica desarrollada anteriormente, sino verificar numéricamente la interacción entre las fases y determinar si el líquido presenta desplazamiento hacia el ducto principal bajo una condición perteneciente al rango operativo favorable.

5.4.2 Comportamiento aire-líquido a 40 m/s

De acuerdo con la simulación multifase realizada, el flujo de aire ingresa al sistema con una distribución relativamente uniforme y comienza a converger hacia la región de la constricción del ducto, provocando que las líneas de corriente se organizan progresivamente hacia la zona central del ducto, lo cual indica que el flujo es canalizado hacia la constricción del Venturi, este comportamiento puede observarse en la Figura 21, donde el flujo comienza a acelerarse conforme se aproxima a la región de menor área transversal.

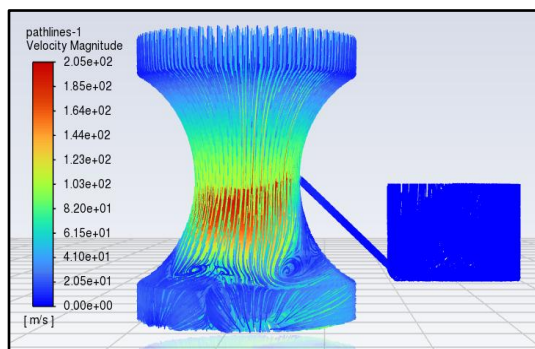


Figura 21. Distribución general de líneas de corriente coloreadas por magnitud de velocidad del flujo de aire en el ducto Venturi para una velocidad de entrada de 40 m/s.

A medida que el flujo avanza dentro del ducto, se observa un incremento considerable de la magnitud de la velocidad en la constricción, en esta región se identifican los valores máximos de velocidad del sistema, representados por las tonalidades rojo y naranja en las líneas de corriente, este comportamiento se observa en las Figura 22, donde el flujo alcanza velocidades considerablemente mayores que la velocidad de entrada, evidenciando la aceleración producida por la reducción geométrica del ducto.

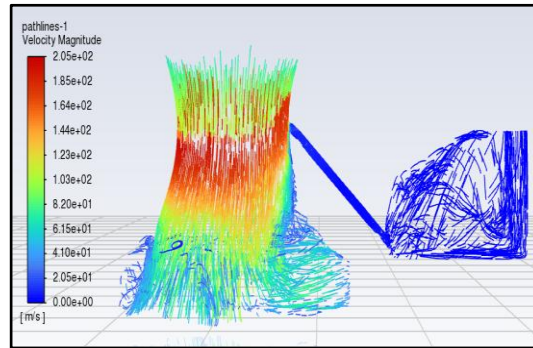


Figura 22. Incremento de la velocidad del flujo en la garganta del ducto Venturi evidenciado mediante líneas de corriente a 40 m/s.

El análisis permite identificar la formación de estructuras vorticosas en la región inferior del sistema, particularmente en la zona donde el ducto experimenta una expansión geométrica después de la constricción, como se observa en la Figura 23, el flujo presenta recirculaciones y remolinos que se desarrollan conforme el flujo acelerado proveniente de la constricción interactúa con la geometría inferior del ducto.

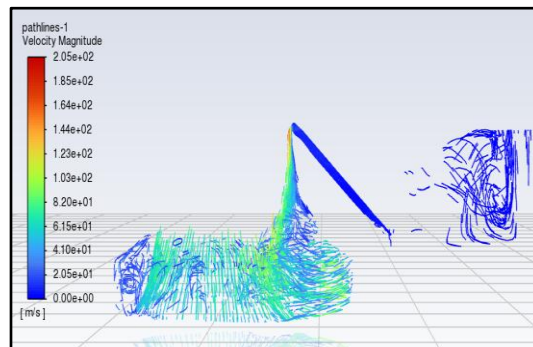


Figura 23. Desarrollo de estructuras vorticosas en la cámara inferior del sistema de aspersión inducidas por la expansión del flujo a 40 m/s.

También se observa que el flujo en el conducto lateral del sistema presenta velocidades considerablemente menores en comparación con la región de la constricción. En la Figura 24 se observa que las líneas de corriente en esta región presentan tonalidades predominantemente azules, lo que indica velocidades cercanas a cero o relativamente bajas.

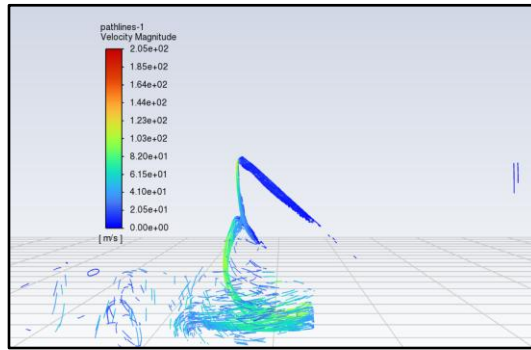


Figura 24. Distribución del flujo de aire en el conducto lateral del sistema con presencia de zonas de baja velocidad a 40 m/s.

Otro aspecto importante que puede identificarse a partir de la simulación es la formación de un flujo descendente de alta velocidad después de la constricción, como se observa en la Figura 25, el flujo acelerado en la constricción se dirige hacia la región inferior del sistema con una trayectoria definida, este chorro interactúa con la cámara inferior del ducto generando estructuras vorticosas más organizadas, lo que indica una mayor transferencia de energía dentro del sistema.

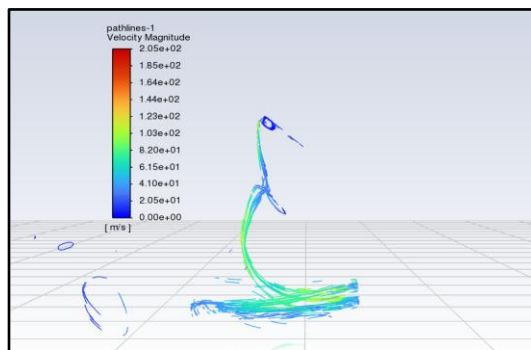


Figura 25. Patrón global del flujo de aire dentro del sistema de aspersión mostrando la interacción entre el flujo principal y las zonas de recirculación a 40 m/s.

El análisis CFD indica que al incrementar la velocidad de entrada del flujo de aire se intensifica el fenómeno de aceleración en la constricción del ducto Venturi, generando un flujo de mayor energía cinética y estructuras de recirculación más definidas en la región inferior del sistema. Este comportamiento sugiere que el sistema presenta condiciones favorables para la generación de una región de baja presión en la constricción del ducto, lo cual es fundamental para inducir el fenómeno de succión y generar aspersión, cubriendo así el objetivo principal del diseño propuesto.

Capítulo 6. Conclusiones

La presente investigación tuvo como objetivo analizar y diseñar un sistema de aspersión pasivo basado en el principio del efecto Venturi orientado a su posible integración en un vehículo aéreo no tripulado dedicado a la agricultura, por tal motivo se desarrolló un modelo geométrico tridimensional compuesto por un ducto principal con perfil convergente-divergente, una zona de constricción, un ducto de succión y un depósito de líquido. La evaluación numérica permitió determinar que el funcionamiento del sistema depende tanto de la configuración geométrica como de la velocidad de entrada del flujo de aire, debido a que ambos factores condicionan la aceleración del flujo y la disminución de presión estática en la región donde se busca incorporar el líquido.

Durante la etapa de diseño se desarrollaron siete configuraciones geométricas cuya evaluación preliminar permitió identificar limitaciones relacionadas con la ausencia de una constricción definida, la presencia de recirculaciones, la distribución poco localizada de la presión mínima y la falta de coincidencia entre la zona de baja presión y el ducto de succión. A partir de este proceso se seleccionó el Diseño 7 debido a que integra un perfil convergente-divergente, una constricción de 64 mm, una entrada y salida de 140 mm, un ducto de succión inclinado y un depósito lateral. Su selección no se fundamentó únicamente en los valores de velocidad y presión obtenidos, sino también en la coincidencia entre la región de presión reducida y la conexión del ducto de succión, así como en la continuidad del flujo y la compatibilidad geométrica con el fuselaje de UAV agrícola particular.

Las simulaciones monofásicas realizadas en SolidWorks Flow Simulation mostraron que la reducción del área transversal incrementa la velocidad del aire en la constricción y modifica la presión estática dentro del ducto. Sin embargo, los resultados también demostraron que una mayor velocidad de entrada no produce necesariamente una disminución continua de presión en la región de interés. El análisis conjunto de la velocidad máxima y la presión estática mínima superficial permitió clasificar el comportamiento del sistema en cuatro zonas: baja velocidad no favorable, transición, operación favorable y alta velocidad no favorable.

El rango operativo favorable se identificó entre 39.45 y 45 m/s, dentro de este intervalo se obtuvo la combinación más conveniente entre aceleración del flujo y disminución de presión estática en la constricción, condición que permite la succión y en consecuencia la aspersión del líquido. La condición de 43.9 m/s presentó la menor presión estática superficial en la constricción de las 15 simulaciones, con un valor de 60 131.36 Pa y una velocidad máxima superficial de 268.924 m/s, por lo tanto, esta condición representa el punto de mayor

depresión con el objetivo de inducir la succión pasiva entre los casos evaluados. Por otra parte, a 40 m/s se obtuvo una presión estática mínima de 78 180.54 Pa y una velocidad máxima superficial de 160.148 m/s, por lo que esta condición se consideró representativa del intervalo favorable para complementar el análisis en ANSYS Fluent para observar si el gradiente de presión generado en la constricción produce el ascenso del líquido por el ducto de succión, su incorporación al flujo principal y su transporte hacia la salida. Para velocidades superiores a 45 m/s, la presión mínima en la constricción comenzó a incrementarse y, a partir de 50 m/s, superó la presión atmosférica de referencia, esto indica que el incremento excesivo de la velocidad deja de generar una depresión útil en la zona de conexión con el ducto de succión, por lo tanto, estas condiciones son desfavorables para la aspersión del líquido.

El análisis realizado en ANSYS Fluent complementó la evaluación monofásica al permitir examinar el comportamiento del sistema bajo una condición perteneciente al rango operativo favorable. Para una velocidad de entrada de 40 m/s se observó la concentración y aceleración del flujo en la constricción, así como la formación de estructuras vorticosas y zonas de recirculación en la región de expansión y en la cámara inferior. Estos resultados muestran que la geometría influye no solo en la generación de una región de presión reducida, sino también en la estabilidad y distribución del flujo después de la constricción. Con base en los resultados obtenidos, la pregunta de investigación se responde estableciendo que las condiciones geométricas y operativas favorables corresponden a un ducto convergente-divergente o conocido también como ducto de tipo Venturi, el cual cuenta con una constricción definida, un ducto de succión conectado directamente con la región de menor presión y una velocidad de entrada comprendida aproximadamente entre 39.45 y 45 m/s. Estas condiciones permiten que el diseño genera una aceleración significativa del flujo y una presión estática inferior a la presión atmosférica en la constricción, lo que proporciona el gradiente de presión requerido para favorecer la succión pasiva de un líquido desde el depósito y con ello generar la aspersión.

El alcance de la investigación se limitó al diseño y evaluación de un modelo geométrico tridimensional mediante herramientas CAD y CFD, el sistema propuesto podría disminuir la dependencia de bombas eléctricas al aprovechar el flujo de aire disponible en el UAV.

La principal aportación de esta investigación consiste en el diseño y análisis numérico de un sistema pasivo de aspersión que aprovecha el flujo de aire disponible en un UAV agrícola para generar una disminución de presión mediante el principio del efecto Venturi. Además del diseño geométrico seleccionado, se obtuvo una metodología de evaluación basada en

el análisis progresivo de configuraciones, la comparación de parámetros globales y superficiales y la determinación de rangos operativos. La identificación de un intervalo favorable de velocidad constituye un resultado relevante debido a que demuestra que el sistema debe operar dentro de condiciones específicas y que aumentar la velocidad del aire no garantiza una mejora en el potencial de succión.

Como trabajo futuro se requiere construir un prototipo físico del sistema y realizar pruebas experimentales que permitan medir la velocidad del aire, la presión en la constricción, el caudal de líquido succionado y la relación aire-líquido. También será necesario evaluar el tamaño y la distribución de las gotas, la cobertura, la deposición y la deriva bajo diferentes condiciones de operación. Posteriormente, el sistema deberá integrarse al UAV propuesto para analizar su comportamiento durante el vuelo, su influencia en la estabilidad del vehículo y el consumo energético real en comparación con un sistema de aspersión convencional.

Capítulo 7. Bibliografía

- Abdelmotalib, H. M., Dafsari, R. A., Yu, S.-H., & Lee, J. (2021). Computational study of internal flow characteristics of the air induction nozzle. *International Journal of Mechanical Sciences*, 204, 106578. <https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2021.106578>
- Acharya, V. S. A. D. (2023). Spraying with precision: Harnessing drones for targeted herbicide application. *KRISHI SCIENCE – eMagazine for Agricultural Sciences*, 4(9), 51–55.
- Agüera Vega, F., Carvajal Ramírez, F., Pérez Saiz, M., & Orgaz Rosúa, F. (2015). Multi-temporal imaging using an unmanned aerial vehicle for monitoring a sunflower crop. *Biosystems Engineering*, 132, 19–27.
- Archila Cruz, O. F. (2020). Optimal distribution of agents in crop spraying. *Universidad de los Andes, Department of Electrical and Electronic Engineering*, 2025–2028.
- Babakhani Dehkordi, P., Colombo, L. P. M., Guilizzoni, M., & Sotgia, G. (2017). CFD simulation with experimental validation of oil-water core-annular flows through Venturi and Nozzle flow meters. *Journal of Petroleum Science and Engineering*, 149, 540–552. <https://doi.org/10.1016/j.petrol.2016.10.058>
- Benghalia, I., Nehaoua, N., Zamoum, M., & Ami, I. (2025). Study of nanofluids cavitating flow through a Venturi using computational fluid dynamics code. *Romanian Journal of Physics*, 70, Article 609. <https://doi.org/10.59277/RomJPhys.2025.70.609>
- Beswick, A., Bailey, C., Crook, B., Crouch, D., Farrant, J., Frost, G., & Stagg, S. (2020). Performance testing of a Venturi-based backpack spray decontamination system. *Applied Biosafety: Journal of ABSA International*, 25(1), 28–40.
- Boman, B. J., Shukla, S., & Haman, D. (2004). Chemigation equipment and techniques for citrus (Circular 1403). *University of Florida, Institute of Food and Agricultural Sciences*.
- Brown, R., Singh, R., & Elsharqawy, M. (2019). Design and analysis of Venturi tubes for fluid systems. *Journal of Fluids Engineering*, 141(6), 061201.
- Butler Ellis, M. C., Swan, T., Miller, P. C. H., Waddelow, S., Bradley, A., & Tuck, C. R. (2002). Design factors affecting spray characteristics and drift performance of air induction nozzles. *Biosystems Engineering*, 82(3), 289–296.

Çengel, Y. A., & Cimbala, J. M. (2014). Fluid mechanics: Fundamentals and applications (3rd ed.). McGraw-Hill Education.

Cengel, Y., & Cimbala, J. (2017). Fluid Mechanics: Fundamentals and Applications (4th ed.). McGraw-Hill.

Chen, P., Douzals, J. P., Lan, Y., Cotteux, E., Delpuech, X., Pouxviel, G., & Zhan, Y. (2022). Characteristics of unmanned aerial spraying systems and related spray drift: A review. *Frontiers in Plant Science*, 13, 870956.

Chen, S., Lan, Y., Li, J., & Fritz, B. (2020). Evaluation of spray performance from UAVs for crop protection. *Biosystems Engineering*, 195, 197–213.

Chen, X., Liu, D., Wang, G., Zhang, X., Lu, X., & Gong, Y. (2020). Effect of spray parameters and adjuvant type on droplet deposition of plant protection unmanned aerial vehicle in mid-growth cotton field. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 22(2), 347–352.

Dafsari, R. A., Yu, S., Choi, Y., & Lee, J. (2021). Effect of geometrical parameters of air-induction nozzles on droplet characteristics and behaviour. *Biosystems Engineering*, 209, 14–29.

Dafsari, R. A., Yu, S., Yu, S.-H., Choi, Y., & Lee, J. (2023). Drift potential and coverage ratio analysis of an air induction nozzle under an agricultural drone with various operating conditions: An indoor test. *SSRN Electronic Journal*.

Dafsari, R. S., et al. (2021). Air-injection nozzles for agricultural spraying: A review of droplet formation and spray drift. *Agricultural Water Management*, 243, 106528.

del Cerro, J., Cruz Ulloa, C., Barrientos, A., & de León Rivas, J. (2021). Unmanned Aerial Vehicles in Agriculture: A Survey. *Agronomy*, 11(2), 203.

Demestichas, K., Alexakis, T., Peppes, N., & Adamopoulou, E. (2020). The role of drones as an enabler for the 4th agricultural revolution. *Current Research in Agricultural Sciences*, 7(2), 40–51.

De Vanna, F., Benato, A., Ballan, M., & Stoppato, A. (2023). CFD-driven optimization of a Venturi tube for wastewater treatment applications. *En Proceedings of ECOS 2023: The 36th International Conference on Efficiency, Cost, Optimization, Simulation and Environmental Impact of Energy Systems*.

Doruchowski, G., Świechowski, W., Masny, S., Maciesiak, A., Tartanus, M., Bryk, H., & Hołownicki, R. (2017). Low-drift nozzles vs. standard nozzles for pesticide application in the biological efficacy trials of pesticides in apple pest and disease control. *Science of the Total Environment*, 575, 1239–1246. doi:10.1016/j.scitotenv.2016.09.200.

Duncan, L. S., Groth, H. F., & Collins, J. M. (1987). Venturi spray nozzle for a cleaning device (US4712740A).

Ersan, E., Taskiran, A., Karatas, A., Mohammed, K. S., & Celik, N. (2026). CFD analysis of a Venturi injector system. *Applied Sciences*, 16(5), 2356. <https://doi.org/10.3390/app16052356>

Faiçal, B. S., Freitas, H., Gomes, P. H., Mano, L. Y., Pessin, G., de Carvalho, A. C. P. L. F., Krishnamachari, B., & Ueyama, J. (2017). An adaptive approach for UAV-based pesticide spraying in dynamic environments. *Computers and Electronics in Agriculture*, 138, 210–223.

FERTINOVA. (2024). Ficha técnica UREA 46-00-00.

Gao, Q., Ma, J., Liu, Q., Liao, M., Xiao, J., Jiang, M., Shi, Y., & Cao, H. (2020). Effect of application method and formulation on prothioconazole residue behavior and mycotoxin contamination in wheat. *Science of the Total Environment*, 729, 139019.

Gebbers, R., & Adamchuk, V. I. (2010). Precision agriculture and food security. *Science*, 327, 828–831.

Gerbron, J., & Chevalier, M. (2013). Dispositivo de pulverización con efecto Venturi y su uso en cosmetología y en perfumería (ES2380142B).

Giles, D. K., & Billing, R. C. (2015). Deployment and performance of a UAV for crop spraying. *Chemical Engineering Transactions*, 44, 307–312.

Grella, M., Marucco, P., Zwervaeagher, I., Gioelli, F., Bozzer, C., Biglia, A., Manzone, M., Caffini, A., Fountas, S., Nuytens, D., & Balsari, P. (2022). The effect of fan setting, air-conveyor orientation and nozzle configuration on airblast sprayer efficiency: Insights relevant to trellised vineyards. *Crop Protection*, 155, 105921.

Griesang, F., Spadoni, A. B. D., Urah Ferreira, P. H., & Da Costa Ferreira, M. (2022). Effect of working pressure and spacing of nozzles on the quality of spraying distribution. *Crop Protection*, 151.

- Hanif, A. S., Han, X., Yu, S. H., Han, C., Baek, S. W., Lee, C. G., Lee, D. H., & Kang, Y. H. (2023). Modeling of the control logic of a UASS based on coefficient of variation spraying distribution analysis in an indoor flight simulator. *Frontiers in Plant Science*, 14.
- Hassanalian, M., & Abdelkefi, A. (2017). Classifications, applications, and design challenges of drones: A review. *Progress in Aerospace Sciences*, 91, 99–131.
- He, X. (2018). Rapid development of unmanned aerial vehicles (UAV) for plant protection and application technology in China. *Outlooks on Pest Management*, 29, 162–167.
- Hofman, D. (2021). Vortex Venturi water spraying assembly (US20210187520A1).
- Huang, G. B., Zhu, Q. Y., & Siew, C. K. (2006). Extreme learning machine: Theory and applications. *Neurocomputing*, 70(1–3), 489–501.
- Huegerich, D. J., Funseth, T. G., O'Neal, T. M., & Humpal, R. A. (2011). Sprayer pump primed by using Venturi (US8075282B2).
- ISO 5167-1:2003. Measurement of fluid flow by means of pressure differential devices inserted in circular cross-section conduits. International Organization for Standardization.
- Janosz, M., Wang, Z., & Wang, H. (2024). Flight time limitations of agricultural drones under full payload conditions. *Precision Agriculture*, 25(3), 541–558.
- Janosz, P., Fellner, A., Fellner, R., & Kułakowski, M. (2024). Navigator preparation during spraying by UAVs. *Zeszyty Naukowe SGSP*, 89(2), 248–265.
- Jayaram, D. K., Raja, V., Arputharaj, B. S., & AL-bonsrulah, H. A. Z. (2024). Design, multiperspective investigations, and performance analysis of multirotor unmanned aerial vehicle for precision farming. *International Journal of Aerospace Engineering*, 2024.
- Jing, Z., Zou, X., Chen, C., Qiao, M., & Zhou, Y. (2024). Dispositivo de automezcla de fluidos para UAV (CN221815790U).
- Khaleghi Kasbi, M., Alidoost Dafsari, R., Charanandeh, A., Yu, S., Choi, Y., & Lee, J. (2023). Parametric study on the internal geometry affecting agricultural air induction nozzle performance. *Physics of Fluids*, 35(2), 023316. <https://doi.org/10.1063/5.0134893>
- Khayat, O., & Afarideh, H. (2019). Numerical investigation of non-Newtonian liquid–gas flow in Venturi flow meter using computational fluid dynamics. *Iranian Journal of Science and*

Technology, Transactions of Mechanical Engineering. <https://doi.org/10.1007/s40997-019-00321-z>

Kholodiuk, O., & Tokarchuk, O. (2022). The efficiency of using Agras drones for spraying, their design, technical and technological features. *Tekhnika, Energetika, Transport APK*, 2(117).

Kong, F., Qiu, B., Dong, X., Yi, K., Wang, Q., Jiang, C., Zhang, X., & Huang, X. (2024). Design and development of a side spray device for UAVs to improve spray coverage in obstacle neighborhoods. *Agronomy*, 14(9), 2002.

Kumar, R., Sani, R., & Omar, H. (2014). Pressure characteristics of Venturi ejectors in industrial applications. *International Journal of Mechanical Sciences*, 89, 1–12.

Kundu, P. K., Cohen, I. M., & Dowling, D. R. (2012). Chapter 10 Computational Fluid Dynamics. In H. H. Hu (Ed.), *Fluid Mechanics* (5th ed., pp. 421–472). Academic Press.

Lee, J., & Abdelmotalib, H. M. (2025). CFD-based evaluation of air induction nozzle performance: Integration with AI for predictive modeling. *Results in Engineering*, 28, 107116. <https://doi.org/10.1016/j.rineng.2025.107116>

Li, H., Li, H., Huang, X., Han, Q., Yuan, Y., & Qi, B. (2020). Numerical and experimental study on the internal flow of the Venturi injector. *Processes*, 8(1), 64. <https://doi.org/10.3390/pr8010064>

Liu, C., Hu, J., Li, Y., Zhao, S., Li, Q., & Zhang, W. (2023). Numerical simulation on air-liquid transient flow and regression model on air-liquid ratio of air induction nozzle. *Agronomy*, 13(1), 248. <https://doi.org/10.3390/agronomy13010248>

Li, X., Xu, T., Wang, W., Lu, D., Tang, Y., & Wang, S. (2023). Effect of downwash airflow of 8-rotor unmanned aerial vehicle on droplet motion and spatial distribution. *Chinese Journal of Pesticide Science*, 25(3).

Mogili, U. R., & Deepak, B. B. V. L. (2018). Review on application of drone systems in precision agriculture. *Procedia Computer Science*, 133, 502–509.

Monchwe, T. B. (2023). Bernoulli's principle and the Venturi effect. *South African Journal of Anaesthesia and Analgesia*, 29(1), 42–44.

Mondal, P., Lahiri, S. K., & Ghanta, K. C. (2024). Assessment of ANSYS-FLUENT code for computation of two-phase flow characteristics: A comparative study of water–air and silicone oil–air in a vertical pipe. *Journal of Fluids Engineering*, 146(12), 121403. <https://doi.org/10.1115/1.4065764>

Morgensen, O. (1934). Airplane spray equipment (US1957075).

Munson, B. R., Young, D. F., Okiishi, T. H., & Huebsch, W. W. (2013). *Fundamentals of Fluid Mechanics* (7th ed.). Wiley.

Ni, M., Wang, H., Liu, X., Liao, Y., Fu, L., Wu, Q., Mu, J., Chen, X., & Li, J. (2021). Design of a variable spraying system for a plant protection UAV based on CFD simulation and regression analysis. *Sensors*, 21, 638.

Omary, M., Al-Khaffaf, S., & Lamm, F. R. (2021). Performance of Venturi injectors in drip fertigation systems. *Agricultural Water Management*, 248, 106758.

Ou, Y., Liu, H., Zhang, T., Wu, J., & Zhang, R. (2024). Design and experimental research of air-assisted nozzle for pesticide application in orchard. *Frontiers in Plant Science*, 15, 1405530.

Palleja, T., Tresanchez, M., Llorens, J., & Saiz-Vela, A. (2023). Design and characterization of a real-time capacitive system to estimate pesticide spray deposition and drift. *Computers and Electronics in Agriculture*, 207, 107720.

Perriot, B., Pasquier, D., Hudebine, Y., Verpont, F., Vergès, A., Codis, S., Douzals, J.-P., Bedos, C., Grimbuhler, S., Sellam, M., & Naud, O. (2024). Spray drift in field crops: A dataset to analyse the influence of air induction nozzles, hedges, and their combination on the reduction of sedimentary drift, aerial drift and exposure of bystanders. *Data in Brief*, 54, 110366. doi:10.1016/j.dib.2024.110366.

Qin, W., Xue, X., & Yan, H. (2021). Droplet size distribution and evaporation of agricultural sprays. *Agricultural Water Management*, 249, 106812.

Ríos Hernández, R. (2021). Uso de los drones o vehículos aéreos no tripulados en la agricultura de precisión. *Revista Ingeniería Agrícola*, 11(4), e10.

Saravi, S., & Shokrzadeh, M. (2011). Role of pesticides in human life in the modern age: A review. En M. Stoytcheva (Ed.), *Pesticides in the modern world—Risks and benefits* (pp. 3–12).

Shan, C., Xue, C., Zhang, L., Song, C., Kaousar, R., Wang, G., & Lan, Y. (2024). Effects of different spray parameters of plant protection UAV on the deposition characteristics of droplets in apple trees. *Crop Protection*, 184, 106835.

Shouji, C., Dafsari, R. A., Yu, S.-H., Choi, Y., & Lee, J. (2021). Mean and turbulent flow characteristics of downwash air flow generated by a single rotor blade in agricultural drones. *Computers and Electronics in Agriculture*, 190, 106471.

Sijs, R., Kooij, S., & Bonn, D. (2023). Droplet size from Venturi air induction spray nozzles. *Experiments in Fluids*, 64, 43.

Stocker, R. (2005). Reverse venturi atomization chamber and the use thereof (US20050121538A1).

Studinska, H., Lys, Y., Martyniuk, O., & Kucher, L. (2024). Effectiveness of agricultural drones in Ukrainian agriculture: Economic and environmental impacts. *Journal of Agricultural Innovation and Technology*, 31(2), 45–60.

Suteu, D., Rusu, L., Zaharia, C., Badeanu, M., & Daraban, G. M. (2020). Challenge of utilization vegetal extracts as natural plant protection products. *Applied Sciences*, 10(24), 8913.

Tahir, N., Lan, Y., Zhang, Y., Wenjiang, H., Yingkuan, R., & Zaigham Abbas Naqvi, S. M. (2023). Application of unmanned aerial vehicles in precision agriculture. *Precision Agriculture*, 55–70.

Takata, H. H. (1992). Venturi system for agricultural spreaders of solid particles (United States Patent No. 5,092,526).

Talaviya, T., Shah, D., Patel, N., Yagnik, H., & Shah, M. (2020). Implementation of artificial intelligence in agriculture for optimisation of irrigation and application of pesticides and herbicides. *Artificial Intelligence in Agriculture*, 4, 58–73.

Tareq, S., et al. (2020). Mass flow interactions in air-assisted atomization systems. *Chemical Engineering Journal*, 388, 124252.

Thibbotuwawa, A., Nielsen, P., Zbigniew, B., & Bocewicz, G. (2018). Energy consumption in unmanned aerial vehicles: A review of energy consumption models and their relation to the UAV routing. *Advances in Intelligent Systems and Computing*, 853, 173–184.

Timbadiya, P. V., Patel, P. L., Singh, V. P., & Barman, B. (Eds.). (2023). Fluid mechanics and hydraulics: Proceedings of 26th International Conference on Hydraulics, Water Resources and Coastal Engineering (HYDRO 2021). Springer Nature Singapore. <https://doi.org/10.1007/978-981-19-9151-6>

Tsouros, D. C., Bibi, S., & Sarigiannidis, P. (2019). A review on UAV-based applications for precision agriculture. *Information*, 10(11), 349.

Vallet, A., & Tinet, C. (2013). Characteristics of droplets from single and twin jet air induction nozzles: A preliminary investigation. *Crop Protection*, 48, 63–68. doi:10.1016/j.cropro.2013.02.010.

Wang, L., Huang, X., Li, W., Yan, K., Han, Y., Zhang, Y., et al. (2022). Progress in agricultural unmanned aerial vehicles (UAVs) applied in China and prospects for Poland. *Agriculture*, 12, 397.

Wang, P., Hanif, A. S., Yu, S.-H., Lee, C.-G., Kang, Y. H., Lee, D.-H., & Han, X. (2024). Development of an autonomous drone spraying control system based on the coefficient of variation of spray distribution. *Computers and Electronics in Agriculture*, 227.

Wang, X., Liu, Y., Wang, S., & Wang, S. (2024). Effects of spray adjuvants on droplet deposition characteristics in litchi trees under UAV spraying operations. *Agronomy*, 14(9), 2125.

Wang, Y.-P., & Wang, J.-M. (2024). Numerical simulation for Venturi tube of electric shovel ventilation and dust removal system based on Fluent. *Mechanical Research & Application*, 37(5), 43–45, 52. <https://doi.org/10.16576/j.ISSN.1007-4414.2024.05.011>

White, F. M. (2011). *Fluid Mechanics* (7th ed.). McGraw-Hill.

Xue, X., Qin, W., Li, Z., & Lan, Y. (2022). UAV-based spray systems performance and application limits. *Biosystems Engineering*, 212, 45–60.

Xue, X., Tian, Y., Yang, Z., Li, Z., Lyu, S., Song, S., & Sun, D. (2024). Research on a UAV spray system combined with grid atomized droplets. *Frontiers in Plant Science*, 14, 1286332.

Xue, X., Tu, K., Qin, W., Lan, Y., & Zhang, H. (2014). Drift and deposition of ultra-low altitude and low volume application in paddy field. *International Journal of Agricultural and Biological Engineering*, 7(4), 23–28.

Zhang, C. L., Dou, H. B., Hao, G. F., Ding, B. F., Li, L., Huang, P. L., & Gong, W. K. (2019). Boquilla electrostática con efecto Venturi adaptable a la pulverización de cultivos (CN209334001U).

Zhang, F., Li, Z., & He, Q. (2023). Multi-objective optimization of Venturi injectors using CFD and genetic algorithms. *Applied Mathematical Modelling*, 122, 527–543.

Zhang, L., Zhang, H., Niu, Y., & Han, W. (2019). Mapping maize water stress based on UAV multispectral remote sensing. *Remote Sensing*, 11(6), 605.

Zhao, J. (2024). Pulverizador agrícola montable en dron (CN221689855U).

Zu, Y., Zhong, W., Xu, E., & Miao, Z. (2024). Computational fluid dynamics analysis of gas suction in coaxial flow Venturi injector: Impact of gas–liquid interface structure in mixing section. *Applied Sciences*, 14(23), 10839. <https://doi.org/10.3390/app142310839>

Capítulo 8. Anexos

Anexo A. Evaluación preliminar de los diseños

En esta sección se muestran las simulaciones CFD realizadas a los 7 diseño preliminares, las cuales permitieron conocer parámetros como velocidades y presiones, con el propósito de evaluar el comportamiento del flujo de aire en cada una de las configuraciones planteadas.

Para todos los modelos se establecieron las mismas condiciones de operación con el fin de garantizar una comparación homogénea:

- Velocidad de entrada del flujo de aire: 60 m/s
- Dirección del flujo
- Presión atmosférica: 101325 Pascales
- Fluido: aire

El análisis se centró en identificar el cambio de velocidades y presiones en el ducto de tipo Venturi a partir de un flujo de aire inducido en la entrada del sistema, y así mismo conocer la distribución de las líneas de corriente, especialmente la magnitud y la ubicación de la presión estática mínima, porque esta es responsable del efecto de succión requerido para el sistema de aspersión.

Análisis del flujo de aire del Diseño 1

En la Figura 26 se muestran las simulaciones del comportamiento del flujo de aire del Diseño 1, en donde la velocidad en el ducto aumenta de 60 m/s a 92.71 m/s, sin alcanzar valores elevados, debido a que la forma cilíndrica simple limita el aceleramiento del flujo hacia la parte inferior.

La presión mínima es de 98662.6 Pa, y no se localiza en un punto específico, sino que se distribuye en un área amplia, lo cual reduce la eficiencia de succión.

El diseño presenta una geometría poco definida para generar un efecto Venturi, lo que se refleja en bajas velocidades y en una reducida caída de presión.

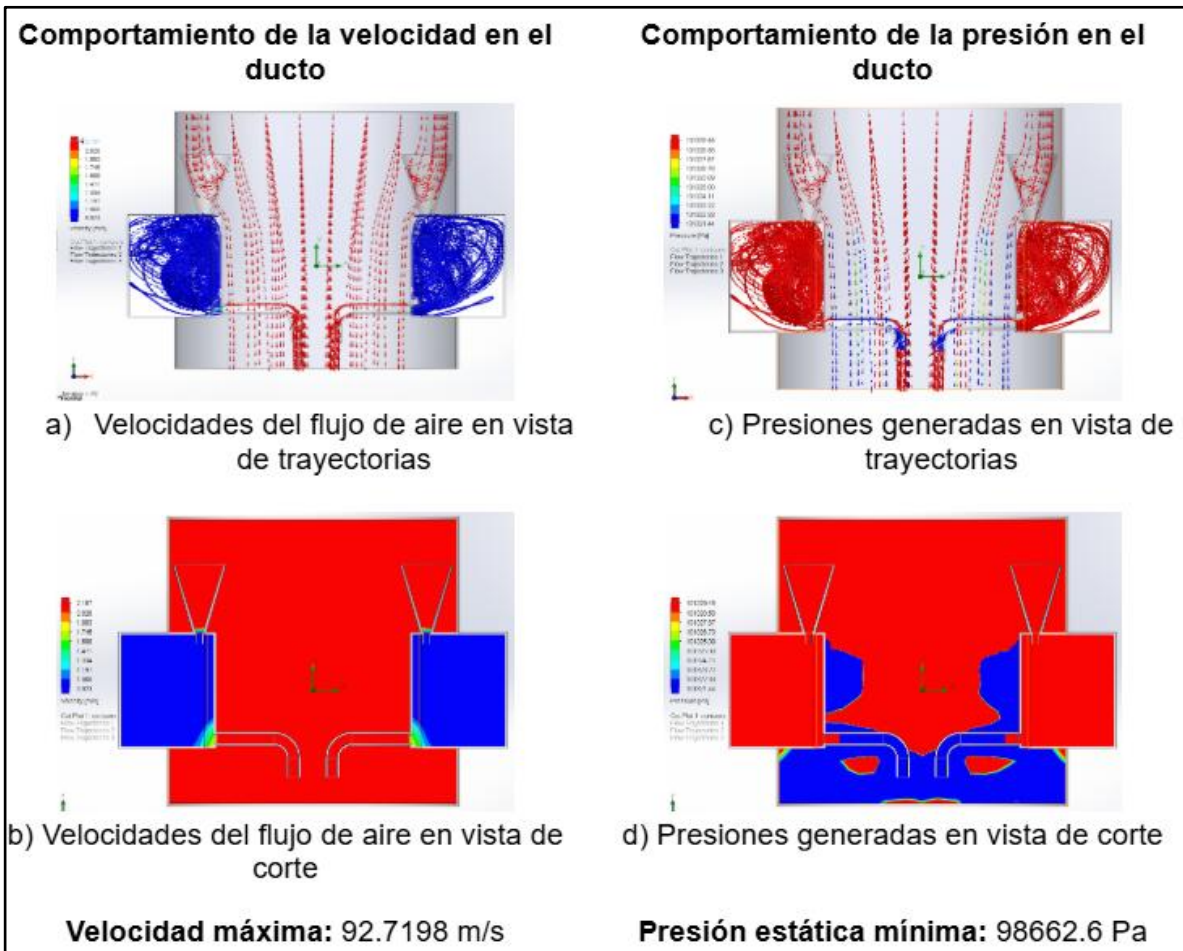


Figura 26. Distribución de velocidades y presiones del flujo de aire en el ducto Venturi correspondiente al Diseño 1.

Análisis del flujo de aire del Diseño 2

En la Figura 27 se observan las simulaciones del flujo de aire del Diseño 2, donde el flujo se acelera ligeramente en la sección media del ducto, obteniendo un parámetro de 251.598 m/s, la velocidad mínima es de 22.33 m/s y se ubica en el depósito del líquido. La geometría superior genera remolinos que afectan la estabilidad del flujo. Se identifican regiones de baja presión poco favorables para inducir una succión, la zona de baja presión se desplaza lateralmente debido al perfil asimétrico del ducto.

La presencia de zonas de recirculación reduce la eficiencia del diseño, aunque presenta una mejora respecto al Diseño 1, sigue siendo insuficiente para propiciar un efecto Venturi.

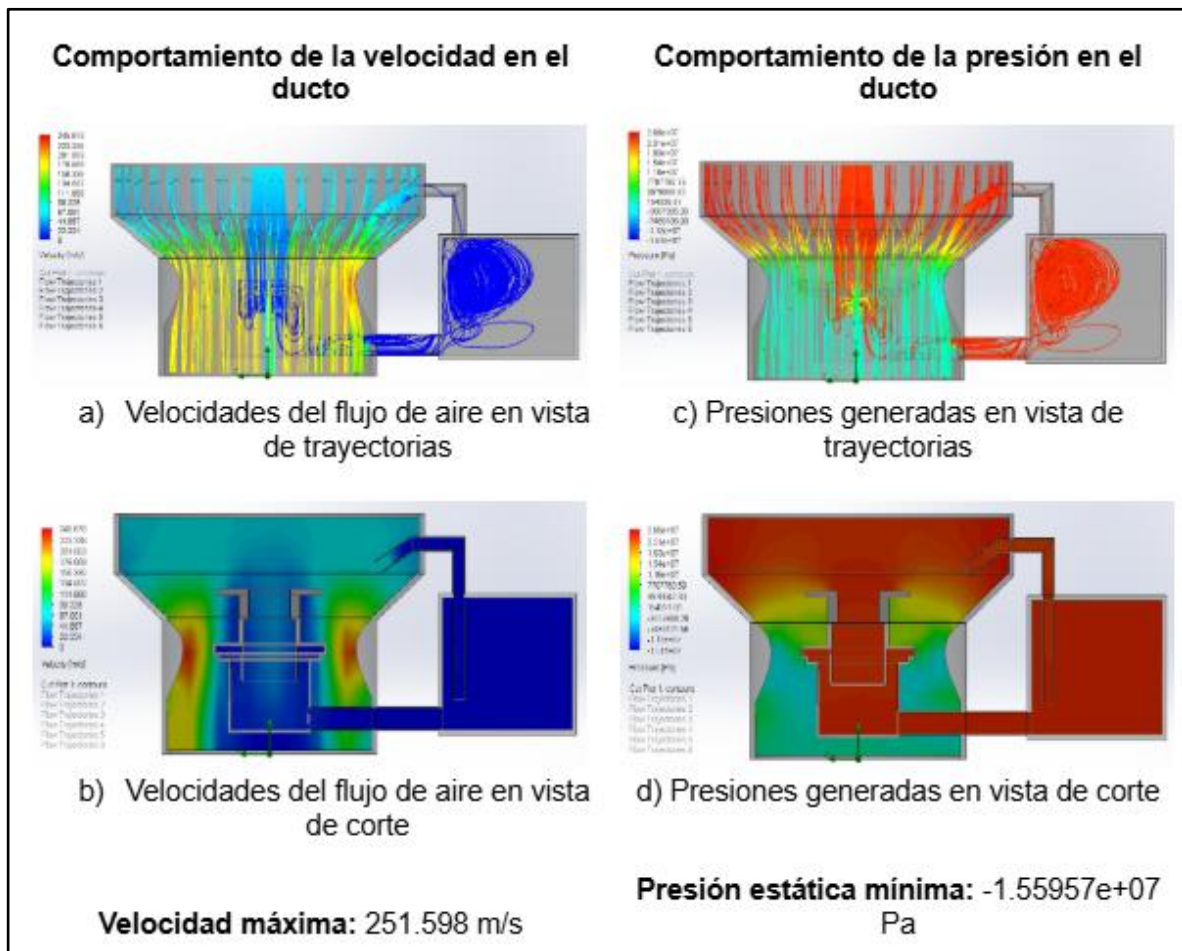


Figura 27. Distribución de velocidades y presiones del flujo de aire en el ducto Venturi correspondiente al Diseño 2.

Análisis del flujo de aire del Diseño 3

En la Figura 28 se muestran las simulaciones del flujo de aire del Diseño 3, la constricción pronunciada genera un incremento notable de la velocidad en la constricción, obteniendo una velocidad máxima de 596.394 m/s, lo cual cumple parcialmente con el comportamiento esperado de un ducto Venturi. La presión estática mínima aparece en el centro del ducto con un valor de 77612.16 Pa, correlacionada con el incremento de velocidad. Este diseño muestra una mejora en la aceleración del flujo y en la caída de presión, aunque el ducto de succión no se encuentra ubicado en la zona mínima de presión estática.

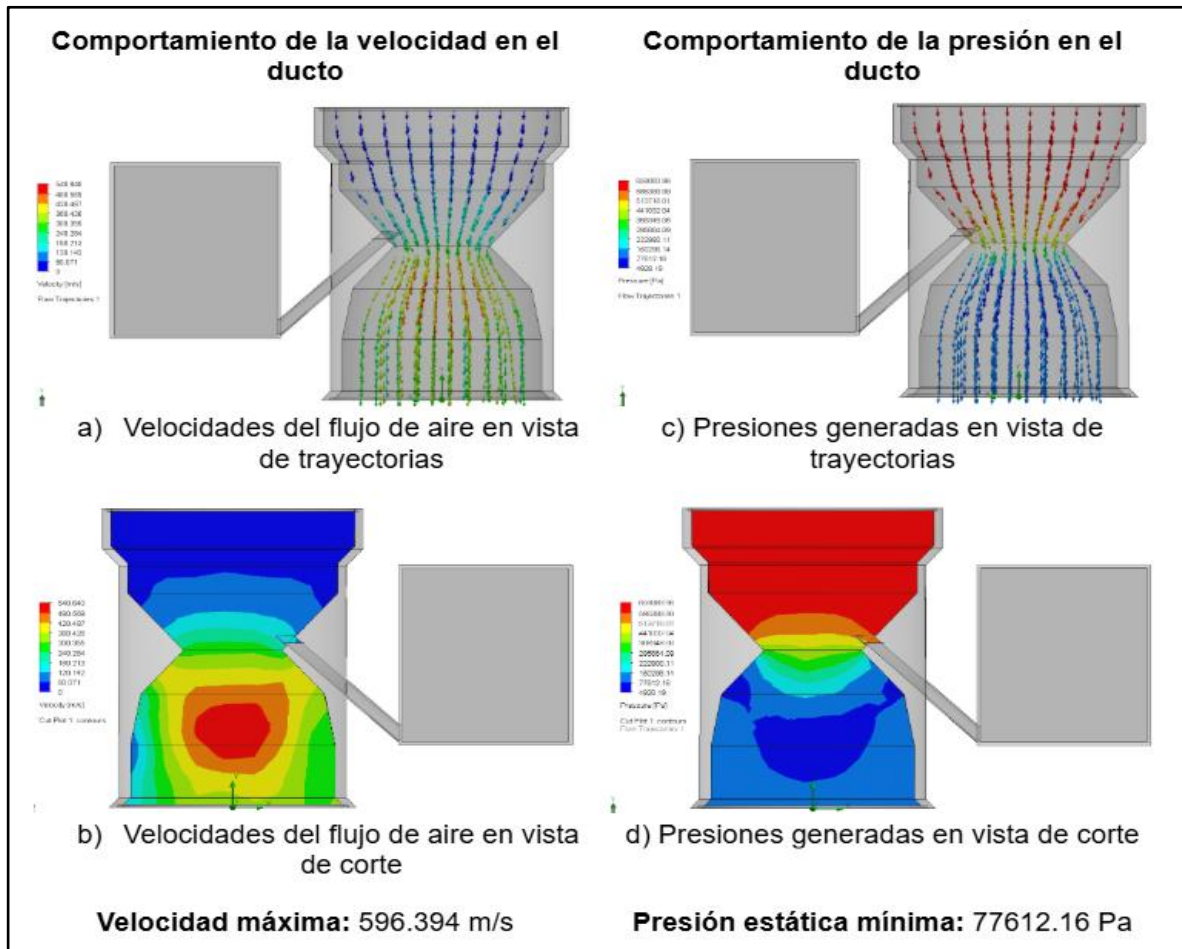


Figura 28. Distribución de velocidades y presiones del flujo de aire en el ducto Venturi correspondiente al Diseño 3.

Análisis del flujo de aire del Diseño 4

En la Figura 29 se observan las simulaciones del flujo de aire del Diseño 4, el flujo alcanza valores de 193.523 m/s, la geometría cilíndrica alargada favorece un flujo más uniforme y una aceleración más estable hacia la constricción. El diseño presenta una región de presión mínima más clara, obteniendo valores de 86677 Pa, adecuada para inducir la succión del líquido. La ubicación del ducto de succión se encuentra en la zona de menor presión, lo cual favorece la eficiencia del sistema.

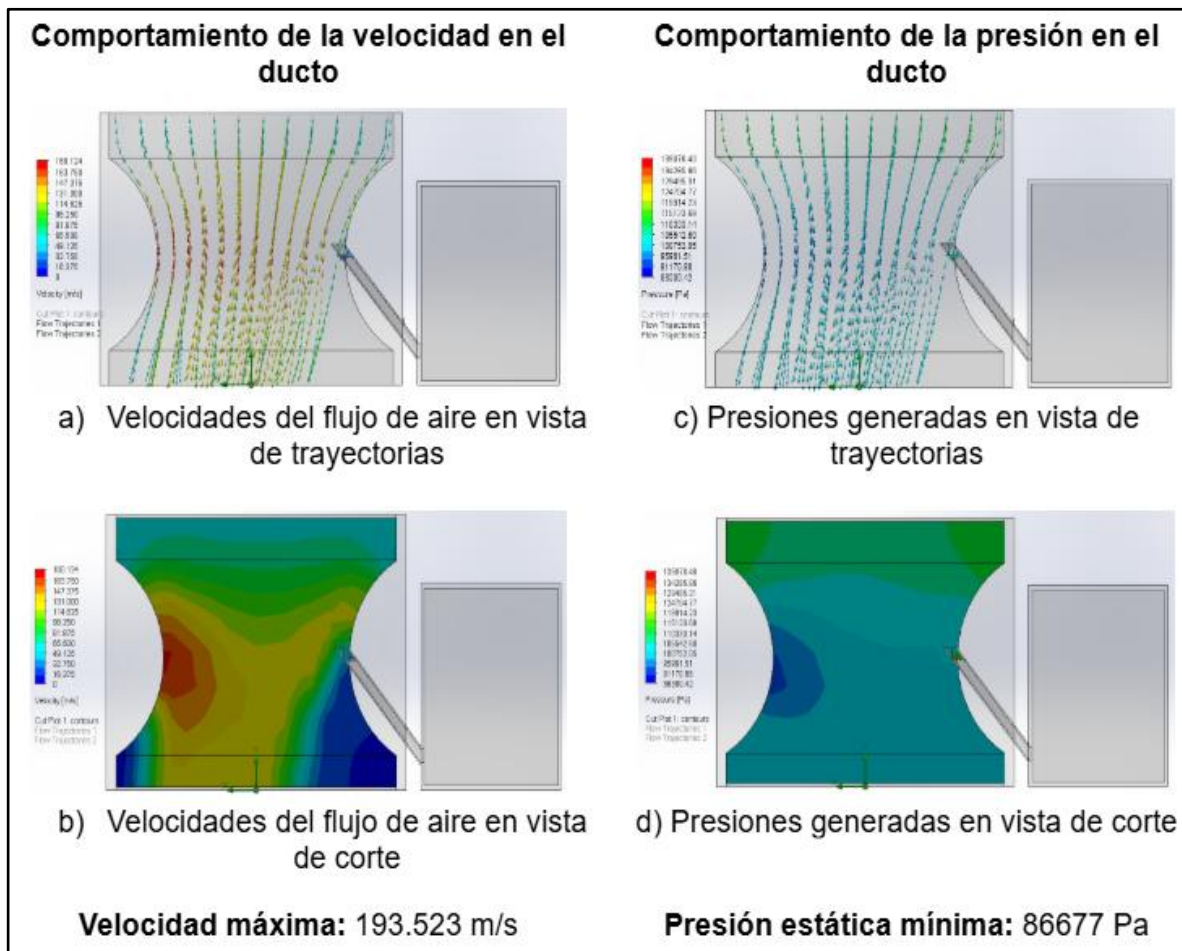


Figura 29. Distribución de velocidades y presiones del flujo de aire en el ducto Venturi correspondiente al Diseño 4.

Análisis del flujo de aire del Diseño 5

En la Figura 30 se muestran las simulaciones del flujo de aire del Diseño 5, el comportamiento de la velocidad es estable y la aceleración en la constricción es adecuada propiciando un valor máximo de 235.404 m/s. Gracias a la presencia del ducto de compensación de presión, este no afecta de manera negativa el flujo interno y la presión mínima en la constricción es de 80547.2 Pa, permitiendo una caída de presión suficiente para propiciar succión en el reservorio de líquido.

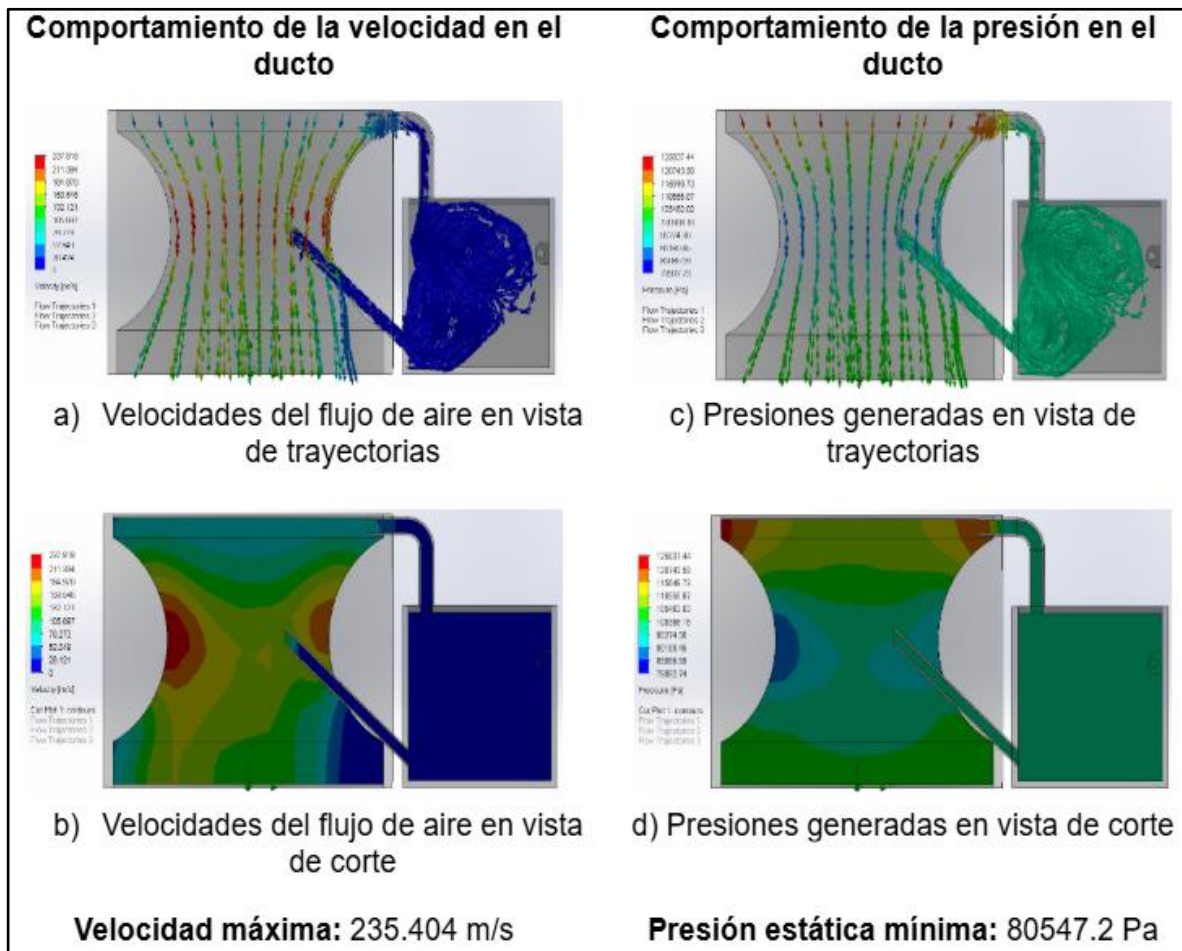


Figura 30. Distribución de velocidades y presiones del flujo de aire en el ducto Venturi correspondiente al Diseño 5.

Análisis del flujo de aire del Diseño 6

En la Figura 31 se muestran las simulaciones del flujo de aire del Diseño 6, de todos los modelos preliminares este diseño presenta uno de los perfiles de velocidad más estables y altos en la zona de la constricción, con un valor de 614.306 m/s. La transición entre secciones es suave y el flujo no presenta remolinos significativos. La presión mínima está ubicada en el centro del Venturi presentando un valor de 28431.6 Pa, lo cual maximiza la capacidad de succión, sin embargo el ducto de succión no se ubica en la zona de mínima presión estática. Este diseño destaca como uno de los más adecuados en cuanto a generación del efecto Venturi y comportamiento aerodinámico interno.

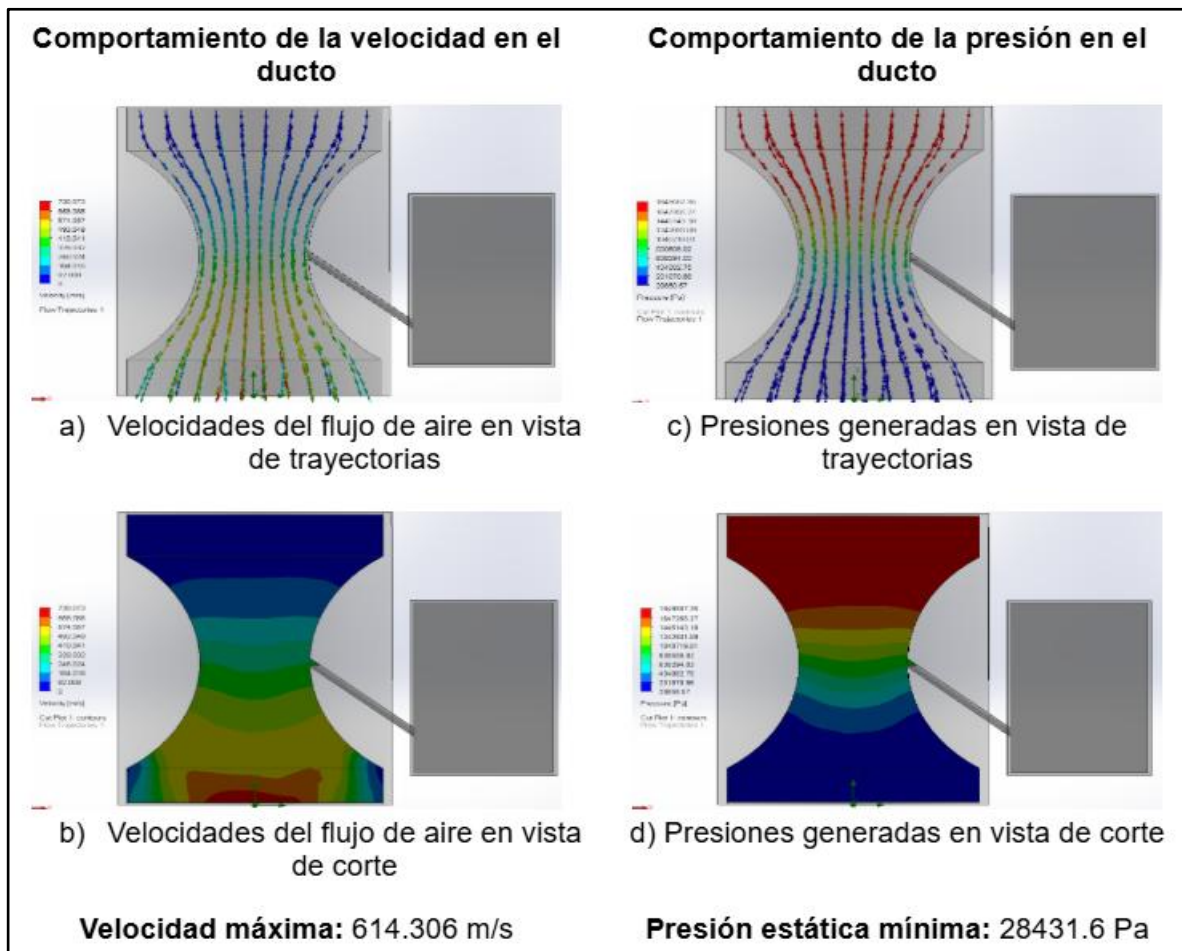


Figura 31. Distribución de velocidades y presiones del flujo de aire en el ducto Venturi correspondiente al Diseño 6.

Análisis del flujo de aire del Diseño 7

Las simulaciones muestran un aumento significativo de la velocidad del flujo de 225.781 m/s, al aproximarse a la constricción del Venturi, manteniendo una trayectoria uniforme y sin zonas de recirculación. En la Figura 32 y 33, se observa el comportamiento de las velocidades en forma de trayectorias y en vista de corte, a partir de esto se concluye que la aceleración se distribuye de manera simétrica alrededor del eje del ducto, lo cual confirma que la geometría favorece a la propagación del efecto Venturi.

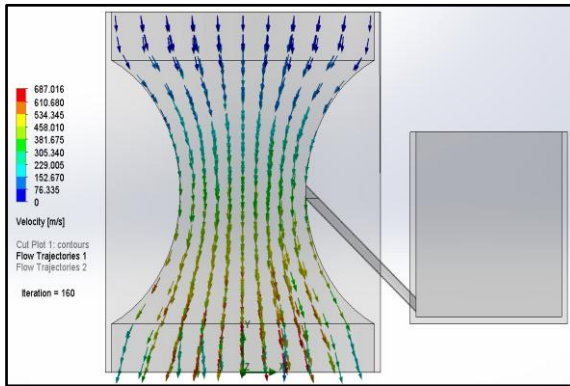


Figura 32. Vista de trayectorias del flujo de aire.

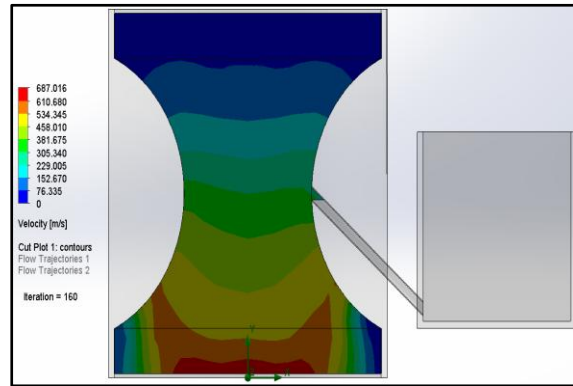


Figura 33. Vista de corte del flujo de aire.

Las simulaciones también se realizaron para analizar las presiones generadas en el sistema muestran una región definida de mínima presión estática ubicada en la constricción del ducto con un valor de 437553.30 Pa. En la Figura 34 y 35, se observan las presiones generadas en forma de trayectorias y en vista de corte, a partir de esos resultados se concluye que la localización de baja presión coincide con el punto donde se conecta el ducto de succión, condición indispensable para inducir el ascenso del líquido desde el depósito sin necesidad de bombas externas.

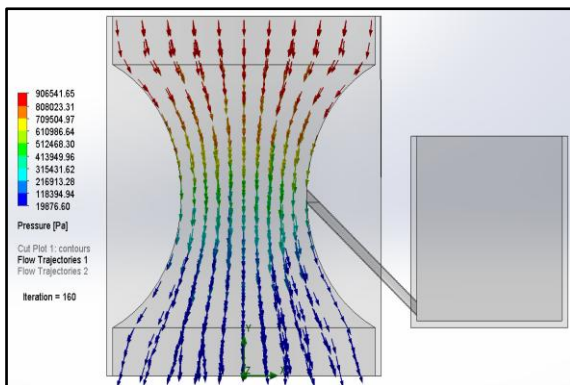


Figura 34. Vista de trayectorias de la presión estática.

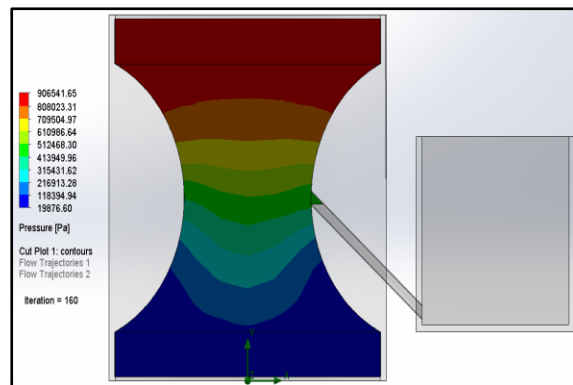


Figura 35. Vista de corte de la presión estática.

Anexo B. Especificaciones técnicas del sistema de aspersión

El sistema de aspersión diseñado puede ser replicable a partir de su respectivo dibujo técnico, el cual permite representar de manera precisa, normalizada y detallada las partes del sistema, facilitando su análisis, fabricación y montaje. En la Figura 36 se observa el primer dibujo técnico del sistema de aspersión con sus respectivas cotas expresadas en milímetros “mm”, se muestra la cara lateral permitiendo visualizar la altura del ducto de tipo Venturi la cual corresponde a 150 mm, los diámetros de entrada y salida del ducto correspondiente a 140 mm y la constricción del ducto el cual tiene un diámetro de 64 mm.

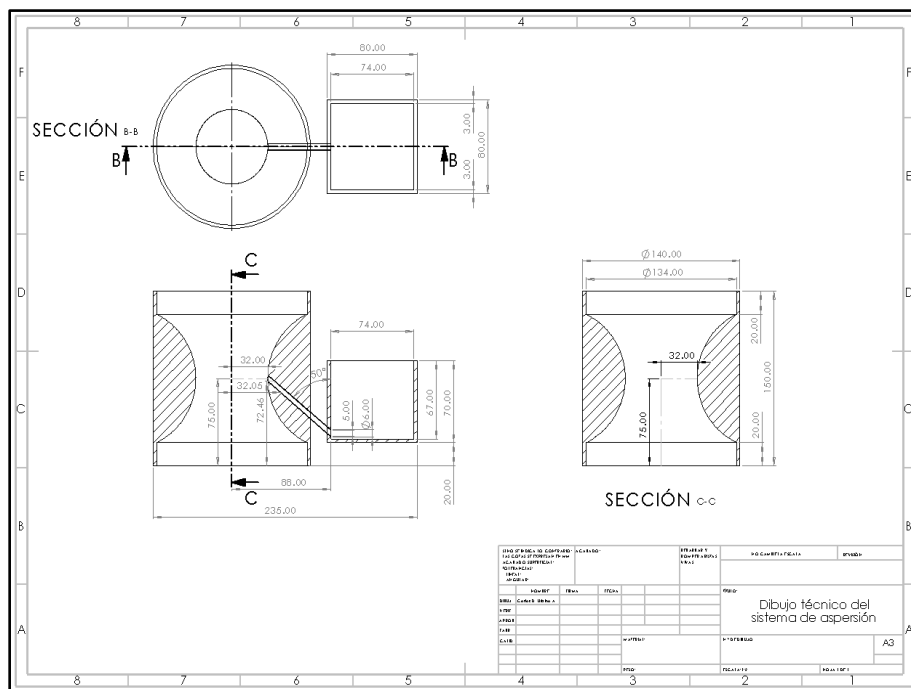


Figura 36. Dibujo técnico 1 del sistema de aspiración.

En la Figura 37 se observa el segundo dibujo técnico del diseño seleccionado, se muestra el sistema en una vista isométrica permitiendo conocer la geometría y la constricción del ducto, también observamos la altura del nivel del líquido con un valor de 67 mm, el cual va relacionado directamente con el ducto de succión, permitiendo así la aspiración deseada.

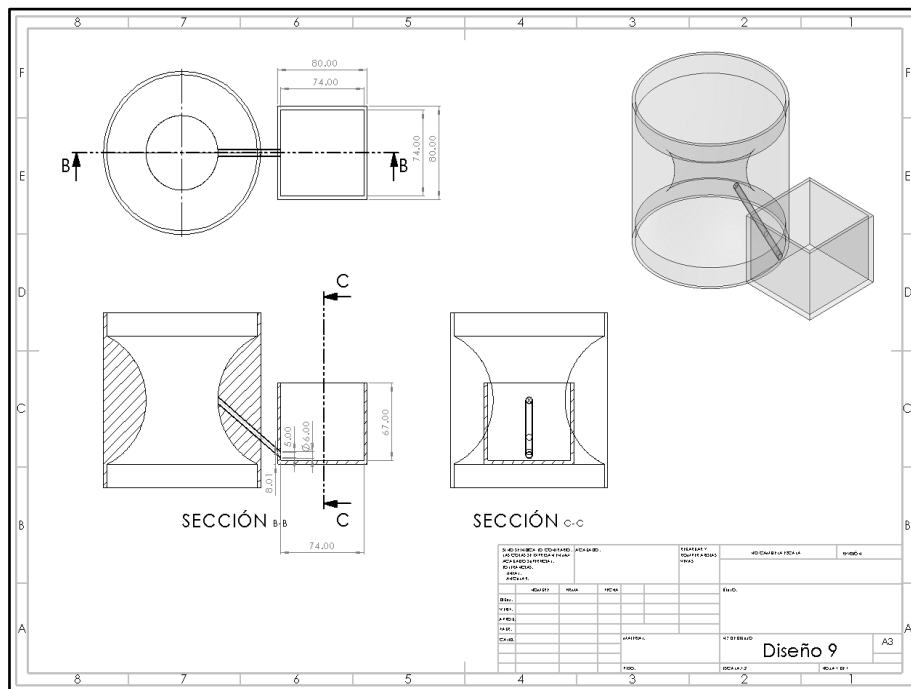


Figura 37. Dibujo técnico 2 del sistema de aspiración.