



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN
LUIS POTOSÍ**

Facultad de Ingeniería

**Centro de Investigación y Estudios de
Posgrado**



**Análisis numérico de flujo con partículas
alrededor de un tubo Pitot y propuesta de
diseño para reducir el impacto de partículas
en la superficie**

T E S I S

Que para obtener el grado de:

Maestría en Ingeniería Mecánica

Presenta:

Ing. Víctor Manuel Suárez Segura

Asesora:

Dra. Geydy Luz Gutiérrez Urueta

Coasesor:

Dr. Robert Jäckel

16 de julio de 2026

ING. VÍCTOR MANUEL SUÁREZ SEGURA
P R E S E N T E.

En atención a su solicitud de Temario, presentada por los **Dres. Geydy Luz Gutiérrez Urueta y Dr. Robert Jäckel**, Asesora y Coasesor de la Tesis que desarrollará Usted, con el objeto de obtener el Grado de **Maestro en Ingeniería Mecánica**. Me es grato comunicarle que en la sesión del H. Consejo Técnico Consultivo celebrada el día 17 de julio del presente, fue aprobado el Temario propuesto:

TEMARIO:

"Análisis numérico de flujo con partículas alrededor de un tubo Pitot y propuesta de diseño para reducir el impacto de partículas en la superficie"

Introducción.

1. Aspectos generales sobre flujos con partículas alrededor de tubos Pitot.
2. Caracterización numérica de flujo con partículas alrededor de un tubo Pitot.
3. Propuestas de diseño alternativo de tubo Pitot para la reducción del impacto de partículas.
4. Análisis y discusión de resultados.

Conclusiones.

Referencias.

"MODOS ET CUNCTARUM RERUM MENSURAS AUDEBO"

A T E N T A M E N T E



DR. EMILIO JORGE GONZÁLEZ GALVÁN
DIRECTOR
UNIVERSIDAD AUTÓNOMA
DE SAN LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
DIRECCION

www.uaslp.mx

Av. Manuel Nava 8
Zona Universitaria • CP 78290
San Luis Potosí, S.L.P.
tel. (444) 826 2330 al39
fax (444) 826 2336

Ccp. Archivo
-bvlg



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN
LUIS POTOSÍ
FACULTAD DE INGENIERÍA
Área de Investigación y Estudios de Posgrado



DECLARACIÓN

El presente trabajo que lleva por título:

“Análisis numérico de flujo con partículas alrededor de un tubo Pitot y propuesta de diseño para reducir el impacto de partículas en la superficie”

se realizó en el periodo de agosto de 2023 a agosto de 2026 bajo la dirección de la Dra. **Geydy Luz Gutiérrez Urueta** y el Dr. **Robert Jäckel**.

Originalidad

Por este medio aseguro que he realizado el trabajo reportado y la escritura de este documento de tesis para fines académicos sin ayuda indebida de terceros y sin utilizar otros medios más que los indicados.

Las referencias e información tomadas directa o indirectamente de otras fuentes se han definido en el texto como tales y se ha dado el debido crédito a las mismas.

El autor exime a la UASLP de las opiniones vertidas en este trabajo escrito y asume la responsabilidad total del mismo.

Este trabajo no ha sido sometido como tesis o trabajo terminal a ninguna otra institución nacional o internacional en forma parcial o total, exceptuando el caso cuando exista un convenio específico de doble titulación celebrado entre ambas instituciones.

Se autoriza a la UASLP para que divulgue este documento para fines académicos.

El autor del trabajo escrito, Victor Manuel Suárez Segura.



UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE SAN
LUIS POTOSÍ

Facultad de Ingeniería
Centro de Investigación y Estudios de
Posgrado



**Análisis numérico de flujo con partículas
alrededor de un tubo Pitot y propuesta de diseño para reducir
el impacto de partículas en la superficie**

Presenta:

Ing. Víctor Manuel Suárez Segura

Sinodales:

Dra. Geydy Luz Gutiérrez Urueta

Asesora

Dr. Robert Jäckel

Co-Asesor

Dr. Dirk Frederik De Lange

Revisor

Dr. Ricardo Romero Méndez

Revisor

Dr. Francisco Oviedo Tolentino

Revisor

San Luis Potosí, S.L.P.

Agradecimientos

Primeramente, agradezco profundamente al Consejo Nacional de Humanidades, Ciencias y Tecnologías (SECIHTI) por el apoyo económico brindado durante el desarrollo de mis estudios de posgrado, ya que su respaldo fue fundamental para permitirme continuar con mi formación académica y dedicarme plenamente a la realización de este proyecto.

Al Centro de Investigación y de Estudios de Posgrado de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de San Luis Potosí (CIEP FI-UASLP), por abrirme las puertas de esta institución y brindarme las herramientas, conocimientos y espacios necesarios para mi crecimiento profesional y académico. Asimismo, agradezco a cada uno de los profesores del CIEP que contribuyeron a mi formación durante esta etapa, compartiendo generosamente sus conocimientos, experiencia y enseñanzas, las cuales fueron esenciales en mi desarrollo como profesionista e investigador.

A mi asesora de tesis, la Dra. Geydy Luz Gutiérrez Urueta, expreso mi más sincero agradecimiento por su paciencia, orientación, compromiso y constante apoyo a lo largo de este trabajo. Sus consejos, observaciones y confianza fueron fundamentales para el desarrollo de esta investigación y para mi crecimiento académico y personal.

De igual manera, agradezco al Dr. Robert Jäckel, mi coasesor, por sus valiosas aportaciones, disposición y acompañamiento durante el desarrollo de este proyecto. Su experiencia y recomendaciones enriquecieron significativamente esta investigación.

A la Dra. Cintia Monreal Jiménez, por su apoyo y colaboración como consultora, así como por compartir sus conocimientos y observaciones, las cuales contribuyeron de manera importante al fortalecimiento de este trabajo.

Dedicatoria

A mis seres queridos, por su amor, paciencia y apoyo incondicional a lo largo de este camino.

Resumen

Los flujos turbulentos cargados de partículas que interactúan con cuerpos romos son de gran relevancia en aplicaciones aeronáuticas, industriales y ambientales. En aviación, los tubos Pitot están expuestos a partículas atmosféricas, incluyendo gotas de agua sobreenfriada y partículas sólidas, lo que puede provocar impactos, erosión o alteraciones en las mediciones. Esta tesis presenta una investigación numérica de un flujo turbulento con partículas alrededor de un TP mediante Dinámica de Fluidos Computacional (CFD).

Se realiza una simulación de flujo turbulento monofásico alrededor de un cuerpo romo con fines de validación. Los resultados se comparan con distribuciones experimentales del coeficiente de presión reportadas en la literatura para asegurar la precisión del modelo de turbulencia. Las ecuaciones de Navier–Stokes promediadas de Reynolds se resuelven con el modelo $k-\omega$ SST, permitiendo una adecuada resolución de la capa límite y la separación.

Posteriormente, se simula un flujo bifásico disperso mediante un enfoque lagrangiano implementado en MPPICFoam. El análisis se centra en regímenes diluidos, donde las interacciones entre partículas son despreciables y la fase dispersa no modifica significativamente el flujo. Se evalúa la influencia del número de Reynolds, de Stokes y de la velocidad de corriente libre en la distribución de impactos sobre el TP, con énfasis en la región frontal y su relación con las estructuras del flujo.

A partir de los patrones de impacto, se proponen dos modificaciones geométricas en la región frontal del tubo Pitot: una configuración de generatriz recta y una configuración de generatriz curva. Se realizan análisis paramétricos para evaluar el efecto del ángulo de inclinación, la longitud y el radio de curvatura en la reducción de impactos.

Este trabajo aporta elementos para comprender la interacción entre el flujo y las partículas en instrumentación aeronáutica. Asimismo, presenta evidencia numérica útil para el diseño de estrategias que mitiguen el daño por partículas.

Abstract

Particle-laden turbulent flows interacting with bluff bodies are of significant relevance in aeronautical, industrial, and environmental applications. In aviation, Pitot tubes are directly exposed to atmospheric particulate matter, including supercooled water droplets and solid particles, which may lead to surface impact, erosion, or measurement disturbances. This thesis presents a numerical investigation of a turbulent particle-laden flow around a Pitot tube using Computational Fluid Dynamics (CFD).

A single-phase turbulent airflow simulation around a bluff body is performed for validation purposes. The numerical results are compared against available experimental pressure coefficient distributions reported in the literature to ensure the accuracy of the turbulence modeling approach. The Reynolds-Averaged Navier–Stokes (RANS) equations are solved using the k – ω SST turbulence model, providing reliable resolution of the boundary layer and separation phenomena.

A dispersed two-phase flow is simulated using a Lagrangian particle-tracking approach implemented through the `MPPICFoam` solver. The analysis focuses on dilute regimes, where particle–particle interactions are negligible and the dispersed phase does not significantly modify the carrier flow. The influence of Reynolds number, Stokes number, and free-stream velocity on particle impact distribution over the Pitot tube surface is examined. Particular attention is given to the spatial distribution of impacts along the frontal region and its relationship with local flow structures.

Based on the identified impact patterns, two geometric modification strategies for the Pitot tube tip are proposed: an inclined-tip configuration and a curved-tip configuration with variable radius of curvature. Parametric analyses are conducted to evaluate the effect of geometric parameters such as inclination angle, tip length, and curvature radius on particle impingement reduction. The results demonstrate that

controlled geometric modifications can significantly alter particle trajectories and reduce impact concentration on critical regions without compromising the overall aerodynamic behavior of the device.

This work contributes to the understanding of fluid-particle interaction mechanisms around aeronautical instrumentation and provides numerical evidence supporting alternative design strategies aimed at mitigating particle-induced damage.

Contenido

Agradecimientos	ii
Resumen	iv
Abstract	vi
Lista de Figuras	xv
Lista de Tablas	xvi
Lista de Abreviaturas	xvii
Lista de Símbolos	xviii
Introducción	1
Motivación	1
Justificación	2
Objetivos	3
Objetivo general	3
Objetivos específicos	3
1. Aspectos generales de los flujos cargados con partículas sobre tubos	
Pitot	5
1.1. Estado del arte	5

1.1.1.	Clasificación de flujos cargados con partículas	6
1.1.2.	Interacción entre partículas y estructuras turbulentas	7
1.1.3.	Transporte de partículas alrededor de cuerpos romos	10
1.2.	Principio de funcionamiento del tubo Pitot	11
1.3.	Flujos bifásicos dispersos	13
1.4.	Modelo matemático	16
1.4.1.	Ecuaciones de la fase continua RANS	17
1.4.2.	Movimiento de la fase dispersa	20
1.4.3.	Régimen de acoplamiento	24
2.	Caracterización numérica de un flujo con partículas alrededor de un tubo Pitot aeronáutico	26
2.1.	Modelado, simulación y validación del flujo de partículas alrededor de un cuerpo romo	26
2.1.1.	Caso experimental de referencia para validación	26
2.1.2.	Configuración geométrica y dominio	29
2.1.3.	Implementación del modelo matemático	31
2.1.4.	Esquemas numéricos	32
2.1.5.	Generación de malla	33
2.1.6.	Independencia de malla	34
2.1.7.	Validación del modelo de flujo	36
2.1.8.	Casos de simulación	38
2.1.9.	Resultados de simulación para un cuerpo obtuso	40
2.2.	Modelado y simulación del flujo de partículas alrededor del tubo Pitot .	44
3.	Propuestas de diseño alternativo de tubos Pitot para la reducción de impacto de partículas	51

3.1. Diseños propuestos	52
3.1.1. Modificación geométrica 1	52
3.1.2. Modificación geométrica 2	54
3.2. Comparación preliminar de diseños	56
4. Análisis y discusión de resultados	71
4.1. Campos de velocidad alrededor de los diseños modificados del tubo Pitot	71
4.2. Campos de presión alrededor de los diseños modificados del tubo Pitot	76
4.3. Comparación entre el diseño convencional y las configuraciones modificadas propuestas	81
4.4. Comparación entre la proyección geométrica y la distribución de impactos obtenida mediante CFD	84
Conclusiones	89
Referencias	91

Lista de figuras

1.1. Distribución de partículas inerciales en el canal con flujo turbulento [1].	8
1.2. Definición esquemática del problema desarrollado por Cuthbertson et al. [2].	8
1.3. Principio de funcionamiento de tubo Pitot aeronáutico [3].	12
1.4. Estudio experimental de la formación de hielo en un tubo Pitot [4]. . .	13
1.5. Esquema del comportamiento de partículas en función del número de Stokes [5].	15
1.6. Distribución cualitativa de la función de mezcla F_1	20
1.7. Regímenes de acoplamiento según el volumen de partículas en el flujo [6].	25
2.1. Cuerpo romo bidimensional [7].	28
2.2. Geometría y dimensiones del cuerpo romo.	30
2.3. Condiciones iniciales y de frontera.	31
2.4. Detalle de la malla computacional empleada en la simulación del flujo alrededor del cuerpo obtuso.	34
2.5. Comparación de perfiles de velocidad obtenidos con diferentes configuraciones de malla para evaluar la independencia de la solución respecto a la discretización espacial.	35
2.6. Distribución del coeficiente de presión a lo largo de la superficie del cuerpo romo: comparación entre simulación y experimento.	37

2.7. Distribuciones del coeficiente de presión (C_p) y del coeficiente de fricción (C_f) alrededor de la superficie del cuerpo romo para distintos Re_D	40
2.8. Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para $Re_D = 23,800$	41
2.9. Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para $Re_D = 81,000$	42
2.10. Contornos de velocidad de la fase dispersa de gotas para (a) $Re_D = 23,800$ y (b) $Re_D = 81,000$	43
2.11. Frecuencia de impacto de partículas alrededor de la superficie del cuerpo romo para (a) $Re_D = 23,800$ y (b) $Re_D = 81,000$	44
2.12. Cessna 182 [8].	45
2.13. Dimensiones internas (mm) del tubo Pitot [9].	45
2.14. Dominio axisimétrico para simulación sobre tubo Pitot.	46
2.15. Malla computacional empleada en el estudio.	46
2.16. Simulación de flujo con partículas alrededor del tubo Pitot: campo de velocidades de la fase continua y distribución instantánea de partículas ($Re=81000$, $St=25.7$).	48
2.17. Histograma y representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la punta del tubo Pitot ($Re=81000$, $St=25.7$).	49
2.18. Evidencia experimental de acumulación de hielo sobre el mismo modelo de tubo Pitot [4].	50
3.1. Definición de los parámetros geométricos empleados en las configuraciones del Modelo A con punta curva.	53
3.2. Definición de los parámetros geométricos empleados en las configuraciones del Modelo B con superficie inclinada.	55
3.3. Configuraciones geométricas A1, A2 y A3 correspondientes al Modelo A con punta curva.	56

3.4. Configuraciones geométricas B1, B2 y B3 correspondientes al Modelo B con superficie inclinada.	56
3.5. Histograma de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración A1.	61
3.6. Representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración A1. . . .	61
3.7. Histograma de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración A2.	62
3.8. Representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración A2. . . .	62
3.9. Histograma de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración A3.	63
3.10. Representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración A3. . . .	63
3.11. Histograma de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración B1.	66
3.12. Representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración B1. . . .	67
3.13. Histograma de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración B2.	67
3.14. Representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración B2. . . .	68
3.15. Histograma de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración B3.	68
3.16. Representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración B3. . . .	69
4.1. Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para A1 ($Re=81000$, $St=25.7$).	72

4.2.	Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para A2 ($Re=81000$, $St=25.7$)	73
4.3.	Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para A3 ($Re=81000$, $St=25.7$).	74
4.4.	Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para B1 ($Re=81000$, $St=25.7$).	75
4.5.	Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para B2 ($Re=81000$, $St=25.7$).	75
4.6.	Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para B3 ($Re=81000$, $St=25.7$).	76
4.7.	Contornos de la magnitud de presión normalizada (p/P_∞) para A1 ($Re=81000$, $St=25.7$).	77
4.8.	Contornos de la magnitud de presión normalizada (p/P_∞) para A2 ($Re=81000$, $St=25.7$).	78
4.9.	Contornos de la magnitud de presión normalizada (p/P_∞) para A3 ($Re=81000$, $St=25.7$).	78
4.10.	Contornos de la magnitud de presión normalizada (p/P_∞) para B1 ($Re=81000$, $St=25.7$).	79
4.11.	Contornos de la magnitud de presión normalizada (p/P_∞) para B2 ($Re=81000$, $St=25.7$).	80
4.12.	Contornos de la magnitud de presión normalizada (p/P_∞) para B3 ($Re=81000$, $St=25.7$).	80
4.13.	Comparación entre la distribución de impactos obtenida mediante simulación CFD y la proyección geométrica para la configuración A1, representadas en un solo gráfico.	85
4.14.	Comparación entre la distribución de impactos obtenida mediante simulación CFD y la proyección geométrica para la configuración A2, representadas en un solo gráfico.	85

4.15. Comparación entre la distribución de impactos obtenida mediante simulación CFD y la proyección geométrica para la configuración A3, representadas en un solo gráfico.	86
4.16. Comparación entre la distribución de impactos obtenida mediante simulación CFD y la proyección geométrica para la configuración B1, representadas en un solo gráfico.	86
4.17. Comparación entre la distribución de impactos obtenida mediante simulación CFD y la proyección geométrica para la configuración B2, representadas en un solo gráfico.	87
4.18. Comparación entre la distribución de impactos obtenida mediante simulación CFD y la proyección geométrica para la configuración B3, representadas en un solo gráfico.	87

Índice de tablas

2.1. Esquemas numéricos utilizados en las simulaciones.	33
2.2. Configuración numérica para simulaciones de flujo con gotas.	38
2.3. Parámetros de simulación considerados para el análisis del flujo alrededor del tubo Pitot.	47
3.1. Parámetros geométricos normalizados de las configuraciones del Modelo A con punta curva.	54
3.2. Parámetros geométricos de las configuraciones del Modelo B con superficie inclinada.	55
3.3. Comparación de los parámetros geométricos, la eficiencia de impacto y la relación de ingreso al puerto de estancamiento para las configuraciones del Modelo A con punta redondeada.	58
3.4. Comparación de los parámetros geométricos, la eficiencia de impacto y la relación de ingreso al puerto de estancamiento para las configuraciones del Modelo B con superficie inclinada.	64
4.1. Comparación con las configuraciones evaluadas	81

Lista de Abreviaturas

CFD Computational Fluid Dynamics

DNS Direct Numerical Simulation

LES Large Eddy Simulation

LPT Lagrangian Particle Tracking

MPPIC Multiphase Particle-in-Cell

RANS Reynolds-Averaged Navier–Stokes

SST Shear Stress Transport

SLD Supercooled Large Droplets

TP Tubo Pitot

Re Número de Reynolds

Lista de Símbolos

A Área de referencia.

A_p Área proyectada de la partícula.

C_D Coeficiente de arrastre.

C_f Coeficiente de fricción superficial.

C_p Coeficiente de presión.

d_p Diámetro de la partícula.

D Diámetro característico del TP.

f Frecuencia.

F_D Fuerza de arrastre.

F_{AM} Fuerza de masa virtual.

F_i Fuerza que actúa sobre la partícula.

g Aceleración gravitacional.

k Energía cinética turbulenta.

L Longitud total de la superficie analizada.

L_p Longitud característica de la punta del TP.

m_f Masa del fluido desplazado.

m_p Masa de la partícula.

N_{contacto} Número total de partículas que entran en contacto con el TP.

N_{puerto} Número de partículas que ingresan al puerto de estancamiento.

$N_{\text{superficie}}$ Número de partículas que impactan la superficie externa del TP.

p Presión.

p_s Presión estática.

p_t Presión total.

p_{∞} Presión de corriente libre.

P_k Producción de energía cinética turbulenta.

R Radio de curvatura de la punta.

Re Número de Reynolds.

Re_D Número de Reynolds basado en el diámetro del TP.

Re_p Número de Reynolds de la partícula.

s Longitud recorrida sobre la superficie del TP.

s/L Coordenada adimensional sobre la superficie del TP.

S_p Término fuente de interacción partícula-fluido.

St Número de Stokes.

t Tiempo.

u_f Velocidad del fluido.

u_i Componente instantánea de la velocidad del fluido.

u'_i Fluctuación turbulenta de la velocidad.

U Velocidad promedio del flujo.

U_{∞} Velocidad de corriente libre.

v_n Componente normal de la velocidad de impacto.

v_p Velocidad de la partícula.

v_t Componente tangencial de la velocidad de impacto.

x, y, z Coordenadas cartesianas.

x_p Posición de la partícula.

x_R Distancia horizontal desde la referencia de la punta hasta el centro de curvatura.

y_R Distancia vertical desde la referencia de la punta hasta el centro de curvatura.

η_i Eficiencia de impacto.

η_{ps} Relación de ingreso al puerto de estancamiento.

ε_r Error relativo de la medición de velocidad.

μ Viscosidad dinámica.

μ_t Viscosidad turbulenta.

ν Viscosidad cinemática.

ρ Densidad del fluido.

ρ_f Densidad del fluido portador.

ρ_p Densidad de la partícula.

σ_k Coeficiente de difusión para k .

τ_w Esfuerzo cortante en pared.

θ Ángulo de inclinación de la superficie frontal del TP.

ω Frecuencia específica de disipación turbulenta.

∇ Operador gradiente.

Introducción

Motivación

Los flujos turbulentos cargados de gotas o partículas, caracterizados por el transporte de partículas suspendidas, son de gran relevancia tanto en aplicaciones de ingeniería como en fenómenos naturales, abarcando desde la combustión en sprays hasta la dinámica de nubes en la atmósfera. En el ámbito aeronáutico, estos flujos adquieren especial importancia debido a su impacto en la seguridad de vuelo, ya que las gotas pueden incidir sobre superficies aerodinámicas y sensores. En particular, durante condiciones de formación de hielo, las aeronaves pueden interactuar con gotas de agua que impactan y se acumulan en dispositivos como tubos Pitot, sensores de ángulo de ataque o entradas de motor, lo que puede provocar errores severos de medición y degradación del desempeño.

Debido a la naturaleza de su funcionamiento, el tubo Pitot (TP) debe estar completamente inmerso en el flujo del cual obtiene información. Dado que la funcionalidad del dispositivo se ve afectada por la interacción entre las condiciones del flujo y su geometría, su desempeño depende de las características del flujo circundante, incluyendo la presencia de partículas dispersas.

En flujos con partículas se han observado reducciones anómalas en las lecturas del TP. En estos casos, los errores de medición están relacionados con factores como el diámetro del tubo, el diámetro de las partículas, la velocidad del flujo y la concentración volumétrica de partículas [10]. Estos errores comprometen la confiabilidad del uso del TP en este tipo de entornos.

Dada la importancia del uso del TP para la medición de la velocidad del flujo en una amplia variedad de condiciones, en este estudio se propone un análisis orientado a

caracterizar el comportamiento de flujos con partículas y su interacción con la superficie de un TP expuesto. El objetivo es aprovechar los resultados de dicho análisis para proponer modificaciones de diseño que permitan mitigar el impacto de partículas en el desempeño del tubo.

Justificación

En la aviación, dado que este dispositivo debe estar en contacto directo con su entorno para poder funcionar, se encuentra expuesto a condiciones que pueden afectar su efectividad. Es bien conocido que las fallas en este dispositivo suelen tener consecuencias fatales. Al menos nueve accidentes aéreos han sido atribuidos a fallas en el TP desde 1973 [11]. Las causas de estos accidentes abarcan desde negligencia de la tripulación hasta condiciones meteorológicas adversas y flujos externos que afectan al dispositivo, lo que conduce a errores o a la pérdida total de las lecturas.

Con base en lo anterior, resulta evidente la importancia de realizar investigaciones continuas orientadas a minimizar los errores provocados por el mal funcionamiento de los dispositivos de medición. El objetivo principal de este trabajo es investigar una condición específica de flujo que conduce a este tipo de fallas: el flujo con partículas. El estudio propone el uso de análisis numérico para examinar el fenómeno de impacto de partículas y, a partir de ello, plantear modificaciones de diseño que reduzcan de forma significativa el impacto de partículas sobre la superficie del TP. Estas mejoras de diseño buscan minimizar los errores de lectura derivados de la interacción entre estos dispositivos y los flujos con partículas.

Hipótesis

Las modificaciones geométricas en la región frontal de un tubo Pitot pueden alterar las trayectorias de las partículas transportadas por el flujo, reduciendo la concentración de impactos en zonas críticas de la superficie sin comprometer la capacidad del instrumento para medir la velocidad del flujo.

Objetivos

Objetivo general

Analizar mediante simulaciones computacionales el flujo con partículas alrededor de un tubo Pitot y proponer modificaciones de diseño que reduzcan el impacto de partículas en su superficie.

Objetivos específicos

- Investigar los fundamentos teóricos relacionados con el impacto de partículas sobre superficies.
- Implementar modelos de dinámica de fluidos computacional para simular el comportamiento del flujo con partículas sobre la superficie de un tubo Pitot.
- Validar las simulaciones mediante la comparación con resultados reportados en la literatura existente.
- Analizar la influencia de las condiciones del flujo y de las propiedades de las partículas en la dinámica del flujo y en el impacto sobre la superficie del tubo Pitot.
- Identificar las características de diseño más significativas para reducir el impacto de partículas en la superficie del tubo Pitot.
- Proponer modificaciones de diseño orientadas a minimizar el impacto de partículas sobre la superficie del tubo Pitot.

Organización del trabajo

La tesis se organiza en cuatro capítulos. En el Capítulo 1 se presentan los fundamentos de los flujos con partículas alrededor de tubos Pitot, incluyendo el estado del arte, principio de funcionamiento del TP, y ecuaciones básicas. El Capítulo 2 aborda la caracterización numérica del problema, detallando la configuración computacional, geometría, métodos numéricos y los casos de simulación considerados. En el Capítulo

3 se proponen modificaciones geométricas del TP orientadas a reducir el impacto de partículas y se establecen criterios de diseño. Por último, el Capítulo 4 presenta el análisis y discusión de los resultados, incluyendo la comparación entre los diseños propuestos.

Capítulo 1

Aspectos generales de los flujos cargados con partículas sobre tubos Pitot

En este capítulo se presentan los fundamentos teóricos del estudio de flujos con partículas alrededor de TP, partiendo de una revisión del estado del arte sobre la modelación de flujos bifásicos y la interacción partícula-flujo, así como el principio de funcionamiento del dispositivo. Asimismo, se introducen los conceptos clave necesarios para el análisis del problema, incluyendo el comportamiento de flujos bifásicos dispersos, el número de Stokes y los mecanismos de impacto de partículas sobre superficies, y se establecen los modelos matemáticos de la fase continua y la fase dispersa que constituyen la base para el análisis numérico desarrollado en esta tesis.

1.1. Estado del arte

La dinámica de flujos con partículas implica una combinación compleja de fenómenos en el estudio de los fluidos. En condiciones reales, es común encontrar flujos turbulentos, caracterizados por movimientos caóticos y desordenados, así como flujos multifásicos provocados por la dispersión de partículas en el medio. Esta interacción ha dado lugar al desarrollo de diversos enfoques para modelar el comportamiento de los llamados flujos cargados de partículas.

1.1.1. Clasificación de flujos cargados con partículas

Los flujos cargados con partículas pueden clasificarse de acuerdo con la concentración de la fase dispersa y el grado de interacción entre las partículas y el fluido portador. Una forma común de clasificación distingue entre flujos diluidos, moderadamente cargados y densos.

En los flujos diluidos, la fracción volumétrica de partículas es lo suficientemente baja como para que las interacciones partícula-partícula puedan despreciarse. En este régimen, cada partícula interactúa principalmente con el campo de flujo circundante, mientras que los efectos colectivos entre partículas son mínimos. Este tipo de régimen es común en aplicaciones aeronáuticas y ambientales, donde pequeñas gotas o partículas sólidas se transportan en el aire en concentraciones relativamente bajas.

En contraste, en flujos densos las colisiones entre partículas, así como las interacciones hidrodinámicas entre ellas, juegan un papel dominante en la dinámica del sistema. Estos regímenes suelen encontrarse en aplicaciones como transporte neumático de sólidos o lechos fluidizados.

La clasificación del régimen de flujo es importante porque determina el tipo de modelo numérico que puede emplearse para describir el sistema. En flujos diluidos, los modelos Euler-Lagrange resultan particularmente adecuados, ya que permiten rastrear individualmente el movimiento de cada partícula mientras la fase continua se describe mediante ecuaciones promediadas del flujo turbulento [12].

En muchas aplicaciones ingenieriles y ambientales y la dispersión de partículas juegan un papel fundamental. La dispersión se refiere a la propagación de partículas en el medio fluido. Este fenómeno es relevante en campos como la xerografía, la microelectrónica, el control de la microcontaminación y la gestión de la contaminación del aire, así como en procesos de eliminación de desechos [13].

El desafío en la modelación de estos flujos radica en las interacciones no lineales entre diversos mecanismos dinámicos, tales como el arrastre convectivo, la rotación, la flotabilidad y las interacciones entre partículas y fluido [12]. Por ello, el desarrollo de modelos numéricos precisos representa una tarea compleja.

A lo largo de los años, la investigación se ha enfocado en el desarrollo de modelos

computacionales capaces de representar la dispersión de partículas en superficies. En este contexto, técnicas como DNS, LES y RANS han sido ampliamente utilizadas en CFD para el estudio de estos fenómenos [12].

1.1.2. Interacción entre partículas y estructuras turbulentas

En flujos turbulentos cargados con partículas, la interacción entre la fase dispersa y las estructuras turbulentas del flujo puede producir una amplia variedad de fenómenos físicos. Entre los más importantes se encuentran la dispersión turbulenta, la concentración preferencial y la modulación de la turbulencia.

La dispersión turbulenta describe el transporte aleatorio de partículas inducido por las fluctuaciones de velocidad del flujo. Este mecanismo es responsable de la distribución espacial de las partículas dentro del campo de flujo y depende tanto de las características de la turbulencia como de la inercia de las partículas.

Otro fenómeno ampliamente observado es la denominada concentración preferencial, en la cual las partículas tienden a acumularse en regiones específicas del flujo, particularmente en zonas de baja vorticidad o entre estructuras vorticales coherentes. Este comportamiento surge como consecuencia de la inercia de las partículas y de su incapacidad para seguir exactamente las trayectorias del fluido.

Adicionalmente, la presencia de partículas puede modificar las propiedades estadísticas de la turbulencia, fenómeno conocido como modulación de la turbulencia. Dependiendo del tamaño, densidad y concentración de las partículas, estas pueden incrementar o atenuar la intensidad turbulenta del flujo [14, 12].

Diversos estudios han analizado el comportamiento de partículas en flujos turbulentos. Por ejemplo, Wang et al., 2014 [1] estudiaron la dispersión de partículas inerciales en un canal turbulento, destacando la influencia del número de Stokes y el tamaño de partícula (Figura 1.1).

Asimismo, en Wolde et al., 2023 [15] demostraron la relación entre el número de Stokes y la deposición de partículas en tuberías, mientras que Tu y Zhang [16] analizaron experimentalmente flujos alrededor de cilindros, evidenciando la influencia del Re . Tian y Ahmadi [17] realizaron simulaciones numéricas para estudiar el transporte y la

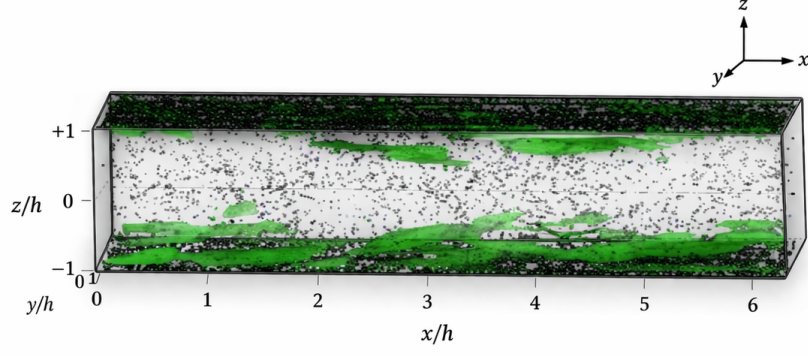


Figura 1.1: Distribución de partículas inerciales en el canal con flujo turbulento [1].

deposición de partículas nano y micrométricas en flujo turbulento, comparando distintos modelos de turbulencia. Sus resultados, validados con datos experimentales, mostraron que la precisión en la predicción de la deposición depende principalmente del modelo de turbulencia y del tratamiento de las fluctuaciones cercanas a la pared, logrando predicciones razonables cuando estos aspectos son adecuadamente considerados.

En el ámbito de la simulación numérica, Cuthbertson et al. [2] estudiaron chorros turbulentos cargados de partículas (Figura 1.2). La figura muestra el esquema del problema, donde un chorro con partículas es descargado horizontalmente en un fluido en reposo, permitiendo observar la trayectoria del flujo y la caída de las partículas. Los autores encontraron que la deposición presenta un máximo cercano a la fuente, asociado a la caída directa desde los bordes del chorro, seguido de una disminución progresiva aguas abajo debido a la dispersión del flujo y la sedimentación.

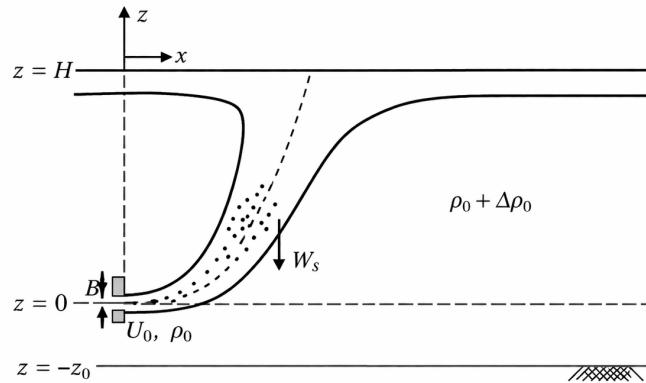


Figura 1.2: Definición esquemática del problema desarrollado por Cuthbertson et al. [2].

De manera complementaria, los modelos RANS han sido ampliamente utilizados en aplicaciones industriales por su estabilidad y bajo costo computacional [18], siendo

aplicados también en flujos con partículas [19, 20]. Asimismo, Sikovsky [21] propuso un modelo estocástico basado en ecuaciones de Langevin para describir la dispersión en flujos turbulentos no homogéneos.

En el contexto aeronáutico, en estudios experimentales y numéricos se ha analizado la formación de hielo en sondas bajo condiciones representativas de vuelo [4]. Se ha observado que, ante fallas en sistemas de calentamiento, pueden formarse rápidamente estructuras de hielo sobre TP en ambientes fríos y húmedos, incluso a velocidades moderadas. Luego, en análisis acoplados numérico–experimentales [9, 22] se caracterizó la respuesta térmica de estos dispositivos e identificaron tiempos críticos de enfriamiento asociados a la formación de hielo. En estudios de revisión como el presentado en [23] se ha destacado la importancia de contar con herramientas predictivas para evaluar la interacción entre gotas, flujo turbulento y superficies expuestas.

1.1.3. Transporte de partículas alrededor de cuerpos romos

El flujo alrededor de cuerpos romos genera estructuras características como capas de cizalla separadas y regiones de recirculación en la estela del cuerpo. Estas estructuras influyen significativamente en el transporte y distribución de partículas dentro del flujo.

Cuando partículas con suficiente inercia interactúan con estas estructuras, su trayectoria puede diferir considerablemente de las líneas de corriente del fluido. En particular, las partículas pueden atravesar regiones de recirculación o impactar sobre la superficie del obstáculo en la región de estancamiento.

Diversos estudios experimentales y numéricos han demostrado que la distribución de partículas alrededor de cuerpos romos depende de parámetros como el Re del flujo, el número de Stokes de las partículas y la intensidad de la turbulencia [1]. Estos factores determinan la probabilidad de impacto de partículas sobre la superficie del cuerpo.

El análisis de estos fenómenos resulta especialmente relevante en aplicaciones aeronáuticas, donde la interacción entre partículas suspendidas en el aire y sensores aerodinámicos, como los tubos Pitot, puede afectar la precisión de las mediciones o provocar fenómenos de acumulación sobre la superficie.

El flujo alrededor de cuerpos romos es particularmente relevante, ya que estas geometrías generan capas de cizalla separadas y estelas turbulentas que modifican el transporte de partículas. Thiria et al. [7] investigaron la estela de un cuerpo romo bidimensional, demostrando que la inclusión de un cilindro de control puede reducir el arrastre mediante la modificación de la región de recirculación.

Los datos experimentales para flujos bifásicos siguen siendo limitados debido a la dificultad de medir trayectorias individuales de partículas. Por ello, la simulación numérica se ha consolidado como una herramienta fundamental para analizar en detalle el transporte e impacto de partículas en condiciones relevantes.

1.2. Principio de funcionamiento del tubo Pitot

El TP recibe su nombre en honor a Henri Pitot (1695–1771), su inventor, quien lo implementó originalmente para medir el caudal del río Sena. Es un instrumento destinado a la medición de la velocidad del flujo mediante la determinación de la presión total p_t y la presión estática p_s . La velocidad se obtiene a partir de la ecuación de Bernoulli para flujo incompresible.

$$V = \sqrt{\frac{2(p_t - p_s)}{\rho}} \quad (1.1)$$

Esta relación supone flujo monofásico, ausencia de obstrucciones y condiciones estacionarias. Sin embargo, en presencia de partículas suspendidas, el campo de presión alrededor del tubo puede verse modificado por efectos inerciales, impacto y posible deposición [6].

Aunque el impacto de partículas sobre la superficie exterior del tubo Pitot no implica necesariamente la obstrucción inmediata del puerto de estancamiento, la acumulación progresiva de material puede modificar la geometría expuesta al flujo. Estas modificaciones tienen el potencial de alterar la distribución de presión alrededor del sensor, modificar localmente las líneas de corriente y favorecer fenómenos posteriores como erosión, deposición o formación de hielo. En consecuencia, el análisis de la localización y frecuencia de los impactos resulta relevante aun cuando las partículas no ingresen directamente al puerto de medición, ya que la reducción de impactos puede contribuir a preservar las condiciones aerodinámicas para las cuales el instrumento fue diseñado.

Por esta razón, el análisis de la localización y frecuencia de los impactos resulta relevante incluso cuando las partículas no ingresan directamente al puerto de medición. La reducción de impactos sobre la superficie frontal puede contribuir a disminuir la acumulación de material en zonas críticas y preservar las condiciones aerodinámicas para las cuales el instrumento fue diseñado.

La Figura 1.3 muestra uno de los diseños más convencionales del TP, el cual consiste en un tubo en ángulo recto con un extremo abierto orientado en dirección al

flujo, encargado de medir la presión total, mientras que una abertura lateral alineada tangencialmente a la dirección del flujo permite medir la presión estática [24].

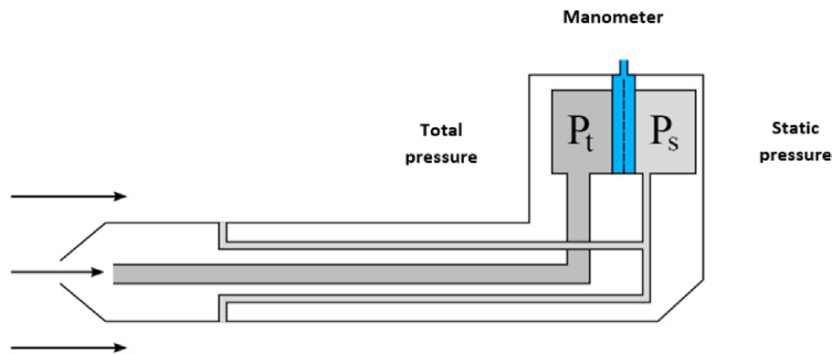


Figura 1.3: Principio de funcionamiento de tubo Pitot aeronáutico [3].

Aunque la invención del TP se remonta a 1732, este dispositivo sigue teniendo numerosas aplicaciones debido a sus características. El TP es ampliamente utilizado para medir la velocidad en aeronaves y embarcaciones; en aplicaciones industriales, se emplea comúnmente para la medición de la velocidad del flujo en sistemas cerrados, como tuberías y canales. Sin embargo, su precisión depende en gran medida de las condiciones del entorno en el que se implemente, ya que estas influyen en la exactitud de sus mediciones. Las causas de las inexactitudes en las lecturas del TP son diversas. [3] propusieron dos clasificaciones fundamentales en el desarrollo de análisis y simulación de tubos Pitot: causas relacionadas con las propiedades del TP (como la forma del tubo, el ángulo de ataque y la calidad de la superficie) y causas relacionadas con las características del flujo circundante (como la naturaleza del flujo, la altitud/densidad del flujo y las condiciones climáticas). Se han realizado numerosos trabajos de investigación centrados en estudiar las causas mencionadas anteriormente para identificar los niveles de inexactitud en las medidas, analizar diversas interacciones que las provocan, desarrollar modelos de estudio o proponer alternativas que reduzcan las fallas en el dispositivo. En el trabajo experimental de [10], investigaron anomalías en las lecturas de TP en flujos de suspensiones de partículas sólidas, proporcionando una base para el estudio de los TP en flujos cargados de partículas. Sus resultados demostraron una correlación entre los errores en las lecturas de los TP y varios factores, como el diámetro de los tubos, el diámetro de las partículas, la velocidad del flujo y la concentración volumétrica de las partículas en el flujo. Como parte de los estudios de flujos multifásicos, se incluye también una situación práctica común como el flujo bifásico de vapor y gotas de

agua. A. En su trabajo White et al., 1997 [25], realizaron un análisis centrado en la interpretación de las lecturas proporcionadas por un TP en un flujo de vapor con gotas. Destacaron que, para obtener lecturas precisas, es necesario aplicar una corrección adecuada que considere los efectos de no equilibrio térmico e inercial que ocurren en la región de estancamiento del tubo. Durante la rápida desaceleración del flujo en la entrada del sensor, las fases no permanecen en equilibrio, lo que genera incrementos de entropía y diferencias entre la presión medida y la presión de estancamiento real. En consecuencia, si estos efectos no se toman en cuenta, las mediciones pueden conducir a errores significativos en la estimación de velocidades y pérdidas. Otros estudios se han centrado en las condiciones climáticas a las que están expuestos los TP. Una de las situaciones más comunes relacionadas con esta problemática involucra a los TP aeronáuticos, que pueden resultar afectados por el congelamiento, lo que lleva a lecturas erróneas. Jäckel et al. en su trabajo [4, 9], presentan un extenso estudio sobre la caracterización de un TP aeronáutico y la formación de hielo en este dispositivo (Figure 1.4), utilizando tanto experimentación como simulaciones numéricas.



Figura 1.4: Estudio experimental de la formación de hielo en un tubo Pitot [4].

1.3. Flujos bifásicos dispersos

En un flujo bifásico disperso, una fase continua actúa como medio de transporte para una fase discreta constituida por partículas. El comportamiento dinámico depende del tiempo de relajación de la partícula (tiempo característico que tarda una partícula en ajustar su velocidad a la del fluido que la rodea) y de su relación con la escala de

tiempo del flujo:

$$\tau_p = \frac{\rho_p d_p^2}{18\mu} \quad (1.2)$$

donde τ_p es el tiempo de relajación de la partícula, ρ_p la densidad de la partícula, d_p su diámetro y μ la viscosidad dinámica del fluido continuo.

Número de Stokes

El comportamiento de las partículas transportadas por un flujo depende en gran medida de la relación entre la inercia de las partículas y la capacidad del fluido para modificar su trayectoria. Esta relación se caracteriza mediante el número de Stokes, un parámetro adimensional ampliamente utilizado en el estudio de flujos con partículas.

El número de Stokes se define como la relación entre el tiempo de respuesta de la partícula y una escala característica del flujo, y puede expresarse como

$$St = \frac{\tau_p U}{L} \quad (1.3)$$

donde τ_p corresponde al tiempo de relajación de la partícula, U es una velocidad característica del flujo y L representa una longitud característica del sistema.

Este número adimensional cuantifica la capacidad de las partículas para responder a los cambios en el flujo circundante, comparando la inercia de la partícula con la escala temporal del flujo. El valor del número de Stokes permite identificar distintos regímenes de comportamiento de las partículas dentro del flujo. Cuando $St \ll 1$, las partículas presentan una baja inercia y tienden a seguir las líneas de corriente del fluido, adaptando rápidamente su velocidad a las variaciones del campo de flujo. En contraste, cuando $St \gg 1$, la inercia de las partículas domina su comportamiento dinámico, lo que provoca que sus trayectorias se desvíen de las líneas de corriente del fluido, como puede verse en la Figura 1.5.

La Figura 1.5 ilustra estos regímenes de comportamiento. Para valores de $St \ll 1$, las trayectorias de las partículas siguen de cerca las líneas de corriente del fluido, mostrando una respuesta rápida a los cambios del campo de flujo. En el caso intermedio, $St \approx 1$, las

partículas comienzan a separarse de dichas trayectorias, evidenciando un balance entre efectos inerciales y de arrastre. Por otro lado, cuando $St \gg 1$, las partículas mantienen su dirección de movimiento original, atravesando las líneas de corriente sin adaptarse a las variaciones del flujo debido a su alta inercia.

Este comportamiento tiene implicaciones directas en fenómenos de impacto de partículas sobre superficies sólidas. Las partículas con números de Stokes elevados presentan una mayor probabilidad de impactar sobre obstáculos presentes en el flujo, ya que su inercia les impide adaptarse rápidamente a los cambios en la dirección del flujo.

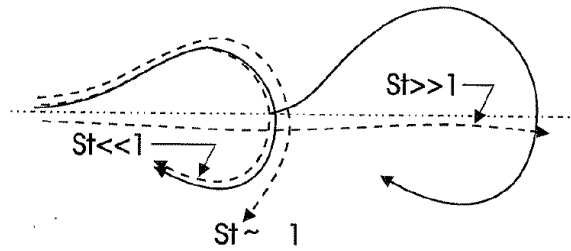


Figura 1.5: Esquema del comportamiento de partículas en función del número de Stokes [5].

En el presente trabajo, el número de Stokes se utiliza como parámetro de referencia para analizar el comportamiento de las partículas en el flujo alrededor del TP y evaluar su tendencia a impactar sobre la superficie del dispositivo.

Eficiencia de impacto

La eficiencia de impacto se define como:

$$\eta_i = \frac{N_{\text{impacto}}}{N_{\text{incidente}}} \quad (1.4)$$

donde N_{impacto} es el número de partículas que impactan sobre la superficie y $N_{\text{incidente}}$ es el número de partículas que se aproximan al cuerpo dentro de la región de interés, en este caso alrededor del tubo en el cual se realiza la inyección y seguimiento de partículas. La eficiencia de impacto η_i depende críticamente del número de Stokes y del campo de velocidades alrededor del cuerpo.

1.4. Modelo matemático

Los flujos turbulentos se caracterizan por presentar fluctuaciones en el tiempo y el espacio, lo que genera estructuras de diferentes escalas que influyen en el transporte de cantidad de movimiento. Para su análisis, es común descomponer las variables del flujo en una componente media y una fluctuante [26]. Por ejemplo, la velocidad puede expresarse como:

$$u_i = \bar{u}_i + u'_i \quad (1.5)$$

donde $\bar{u}_i$ representa la componente media y u'_i la fluctuación turbulenta.

A partir de esta descomposición, surgen magnitudes asociadas a las fluctuaciones turbulentas que permiten describir el efecto de la turbulencia sobre el flujo medio. Entre ellas destaca la energía cinética turbulenta, k , definida como la energía promedio asociada a las fluctuaciones de velocidad:

$$k = \frac{1}{2} \overline{u'_i u'_i} \quad (1.6)$$

Esta magnitud representa la intensidad de la turbulencia en el flujo y está directamente relacionada con la capacidad de las fluctuaciones para transportar cantidad de movimiento.

Asimismo, las tensiones de Reynolds, expresadas como $-\rho \overline{u'_i u'_j}$, representan las contribuciones adicionales al transporte de cantidad de movimiento debidas a las fluctuaciones turbulentas. Estas tensiones aparecen en las ecuaciones RANS y requieren un modelo de cierre para poder ser determinadas.

En modelos de turbulencia de dos ecuaciones, como el modelo k - ω , se introduce además la frecuencia específica de disipación, ω , la cual está asociada a la escala temporal de la turbulencia y describe la tasa a la cual se disipa la energía cinética turbulenta.

Estas variables permiten caracterizar el comportamiento de la turbulencia y son fundamentales en el modelado del flujo en el presente trabajo.

Al aplicar esta descomposición a las ecuaciones de Navier-Stokes y promediar en el tiempo, se obtienen las ecuaciones de Navier-Stokes promediadas de Reynolds (RANS),

las cuales describen el comportamiento medio del flujo. Este proceso introduce términos adicionales asociados a las tensiones de Reynolds, que representan el efecto de las fluctuaciones turbulentas y requieren modelos de cierre.

1.4.1. Ecuaciones de la fase continua RANS

El flujo cargado con partículas alrededor de un TP se modela mediante un enfoque bifásico Euler–Lagrange, en el cual la fase continua (aire) se resuelve en un marco Euleriano, mientras que la fase dispersa (partículas) se rastrea individualmente en un marco Lagrangiano.

Para la fase continua se consideran las ecuaciones RANS, bajo la hipótesis de fluido Newtoniano, incomprensible y con propiedades constantes.

Ecuación de continuidad

La ecuación de conservación de masa, también conocida como ecuación de continuidad, se expresa como

$$\nabla \cdot \mathbf{U} = 0 \quad (1.7)$$

donde $\mathbf{U}$ es el campo de velocidad.

Ecuación de cantidad de movimiento (RANS)

Dado que el régimen de flujo considerado en este estudio es turbulento, las ecuaciones de Navier–Stokes se resuelven en su forma promediada en el tiempo mediante el enfoque RANS. En este enfoque, las variables del flujo se descomponen en una componente promedio y una fluctuante, lo cual introduce términos adicionales asociados a las tensiones de Reynolds, previamente definidas.

$$\rho \left(\frac{\partial \mathbf{U}}{\partial t} + \mathbf{U} \cdot \nabla \mathbf{U} \right) = -\nabla p + \nabla \cdot [\mu (\nabla \mathbf{U} + \nabla \mathbf{U}^T)] - \nabla \cdot (\rho \overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}) + \mathbf{S}_p \quad (1.8)$$

donde ρ es la densidad del fluido, $\mathbf{U}$ la velocidad media, p la presión media y μ la viscosidad dinámica. El término $-\rho\overline{\mathbf{u}'\mathbf{u}'}$ corresponde a las tensiones de Reynolds, las cuales representan el efecto de las fluctuaciones turbulentas sobre el flujo medio, mientras que $\mathbf{S}_p$ corresponde a un término fuente que modela la interacción entre la fase fluida y las partículas, representando el acoplamiento entre ambas fases.

Ecuación para la energía cinética turbulenta k

La resolución de estas ecuaciones requiere el uso de un modelo de turbulencia que permita cerrar el sistema de ecuaciones. En este trabajo se emplea el modelo k - ω SST, el cual se presenta en la ecuación 1.9, la cual describe la evolución de la energía cinética turbulenta k , previamente definida. El primer término del lado izquierdo representa la variación temporal de k , mientras que el segundo término corresponde al transporte convectivo debido al campo de velocidades $\mathbf{U}$.

$$\frac{\partial(\rho k)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho k \mathbf{U}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_k \mu_t) \nabla k] + P_k - \beta^* \rho k \omega \quad (1.9)$$

En el lado derecho, el primer término representa la difusión de la energía turbulenta, la cual incluye contribuciones tanto de la viscosidad molecular μ como de la viscosidad turbulenta μ_t , moduladas por el coeficiente σ_k . El término P_k corresponde a la producción de energía cinética turbulenta asociada a los gradientes de velocidad del flujo medio. Finalmente, el término $-\beta^* \rho k \omega$ representa la disipación de la energía turbulenta, donde ω es la frecuencia específica de disipación y β^* es un coeficiente del modelo.

Ecuación para la frecuencia específica ω

La ecuación 1.10 describe la evolución de la frecuencia específica de disipación ω , la cual está asociada a la escala temporal de la turbulencia, como se describió anteriormente. El primer término del lado izquierdo representa la variación temporal de ω , mientras que el segundo término corresponde al transporte convectivo debido al campo de velocidades $\mathbf{U}$.

$$\frac{\partial(\rho\omega)}{\partial t} + \nabla \cdot (\rho\omega \mathbf{U}) = \nabla \cdot [(\mu + \sigma_\omega \mu_t) \nabla \omega] + \alpha \frac{\omega}{k} P_k - \beta \rho \omega^2 + 2(1 - F_1) \rho \sigma_{\omega 2} \frac{1}{\omega} \nabla k \cdot \nabla \omega \quad (1.10)$$

En el lado derecho, el primer término representa la difusión de ω , considerando tanto la viscosidad molecular μ como la viscosidad turbulenta μ_t , ponderadas por el coeficiente σ_ω . El término $\alpha \frac{\omega}{k} P_k$ representa la producción de ω , asociada a la generación de energía cinética turbulenta. Por otro lado, el término $-\beta \rho \omega^2$ describe la disipación de ω .

Finalmente, el último término corresponde a un término de difusión cruzada, característico del modelo k - ω SST, que depende del gradiente de k y ω , y es activado mediante la función de mezcla F_1 .

En el modelo k - ω SST, las funciones de mezcla F_1 y F_2 permiten realizar una transición suave entre el modelo k - ω , que es más preciso en regiones cercanas a la pared, y el modelo k - ε , que presenta mejor comportamiento en la región externa del flujo. En particular, F_1 actúa como una función de transición que activa el modelo k - ω en la zona próxima a la pared ($F_1 \approx 1$) y lo atenúa gradualmente al alejarse de ella ($F_1 \approx 0$), donde predomina el comportamiento tipo k - ε . Esto permite capturar adecuadamente los efectos viscosos cerca de la pared, como los gradientes pronunciados de velocidad, al mismo tiempo que mantiene una descripción robusta del flujo en la región libre. Como resultado, el modelo mejora la predicción de fenómenos como la separación de flujo y la interacción con superficies sólidas.

Este comportamiento puede visualizarse en la Figura 1.6, donde se muestra cómo la función F_1 varía en función de la distancia a la pared, activando el modelo k - ω en la región cercana a la pared y transitando hacia un comportamiento tipo k - ε en la región externa Menter [27].

La viscosidad turbulenta se calcula como:

$$\mu_t = \frac{\rho k}{\text{máx}(\omega, F_2 S a_1)} \quad (1.11)$$

donde S es la magnitud del tensor de deformación y F_1 , F_2 son funciones de mezcla que permiten la transición suave entre formulaciones.

Este modelo es particularmente adecuado para flujos con gradientes adversos de presión y separación, características presentes en el flujo alrededor de un TP.

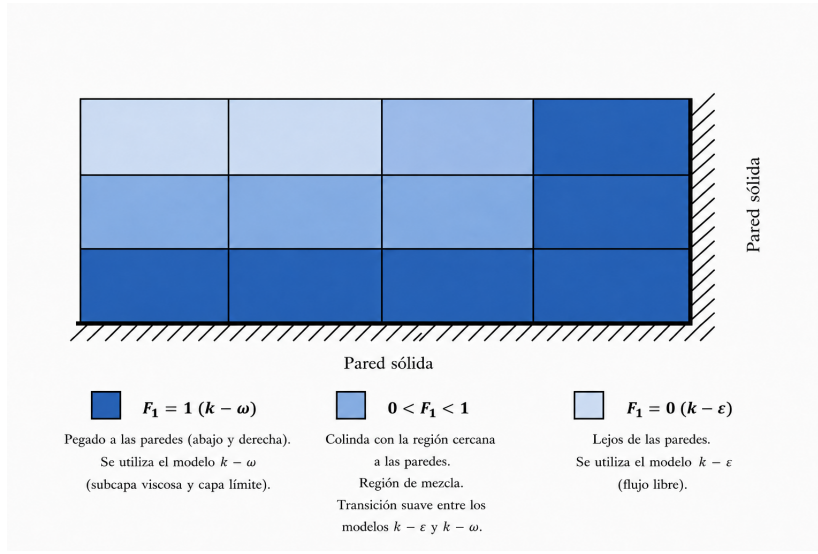


Figura 1.6: Distribución cualitativa de la función de mezcla F_1 en las regiones cercanas y alejadas de paredes sólidas. Elaboración propia con base en Menter [27].

1.4.2. Movimiento de la fase dispersa

La posición de cada partícula se obtiene mediante la 1.12:

$$\frac{dx_p}{dt} = v_p \quad (1.12)$$

donde x_p es la posición de la partícula y v_p su velocidad instantánea.

La dinámica de las partículas se describe a partir de la ecuación de movimiento, la cual se obtiene aplicando la segunda ley de Newton a una partícula individual. En su forma general, esta ecuación puede expresarse como:

$$m_p \frac{dv_p}{dt} = \sum F_i \quad (1.13)$$

donde m_p es la masa de la partícula y $\sum F_i$ representa la suma de las fuerzas que actúan sobre ella, tales como la fuerza de arrastre, la fuerza gravitacional y la fuerza de masa virtual.

Estas ecuaciones constituyen la base para el modelado del movimiento de partículas en flujos bifásicos dispersos [6]. El modelo permite describir la respuesta inercial de las partículas frente a las variaciones del campo de velocidad del flujo. Dependiendo de las propiedades de las partículas y de las condiciones del flujo, las trayectorias pueden diferir significativamente de las líneas de corriente del fluido, lo cual tiene implicaciones importantes en fenómenos como el impacto de partículas sobre superficies sólidas.

La formulación descrita constituye la base del modelo lagrangiano utilizado en este trabajo para analizar la interacción entre el flujo y las partículas transportadas en el dominio de simulación.

Fuerza de arrastre

La fuerza de arrastre F_D representa la interacción entre la fase continua y las partículas, y es uno de los mecanismos dominantes que gobiernan su movimiento [6]. Esta fuerza depende del coeficiente de arrastre C_D , de la densidad del fluido ρ_f , del área proyectada de la partícula A_p y de la velocidad relativa entre el fluido u_f y la partícula v_p .

$$F_D = \frac{1}{2} C_D \rho_f A_p |u_f - v_p| (u_f - v_p) \quad (1.14)$$

El Re de la partícula Re_p caracteriza el régimen de flujo alrededor de la partícula y se define en función de la densidad del fluido ρ_f , el diámetro de la partícula d_p , la viscosidad dinámica μ y la velocidad relativa $|u_f - v_p|$.

$$Re_p = \frac{\rho_f d_p |u_f - v_p|}{\mu} \quad (1.15)$$

El coeficiente de arrastre C_D se calcula mediante una correlación empírica válida para un amplio rango de Re, la cual incorpora efectos no lineales asociados a la inercia del

flujo. Esta expresión permite modelar de manera adecuada la resistencia que el fluido ejerce sobre la partícula en movimiento.

$$C_D = \frac{24}{Re_p}(1 + 0.15Re_p^{0.687}) \quad (1.16)$$

Fuerza gravitacional

La fuerza gravitacional F_G actúa sobre la partícula debido a la acción del campo gravitacional y representa uno de los mecanismos responsables de su movimiento en la dirección vertical [6]. Esta fuerza depende de la masa de la partícula m_p , de la aceleración de la gravedad g , así como de la relación entre la densidad del fluido ρ_f y la densidad de la partícula ρ_p .

$$F_G = m_p g \left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p} \right) \quad (1.17)$$

El término $\left(1 - \frac{\rho_f}{\rho_p} \right)$ incorpora el efecto de flotabilidad, el cual reduce la magnitud de la fuerza gravitacional efectiva cuando la partícula se encuentra inmersa en un fluido. Para partículas con densidad significativamente mayor que la del fluido, este término tiende a la unidad, mientras que para partículas de densidad comparable, la influencia de la flotabilidad se vuelve relevante.

En este sentido, la fuerza gravitacional contribuye al fenómeno de sedimentación de partículas, especialmente en condiciones donde las velocidades del flujo son bajas o donde los efectos inerciales no dominan el movimiento.

Fuerza de masa virtual

La fuerza de masa virtual F_{AM} representa el efecto inercial adicional que experimenta una partícula al acelerar dentro de un fluido, debido a la necesidad de desplazar el fluido circundante [6]. Esta fuerza depende de la masa de fluido desplazado m_f y de la diferencia entre la aceleración del fluido $\frac{Du_f}{Dt}$ y la aceleración de la partícula $\frac{dv_p}{dt}$.

El término $\frac{Du_f}{Dt}$ corresponde a la derivada material de la velocidad del fluido, la cual considera tanto efectos locales como convectivos, mientras que $\frac{dv_p}{dt}$ representa la

aceleración de la partícula. La diferencia entre ambos términos refleja el desacoplamiento dinámico entre la fase continua y la fase dispersa.

$$F_{AM} = \frac{1}{2}m_f \left(\frac{Du_f}{Dt} - \frac{dv_p}{dt} \right) \quad (1.18)$$

La dirección de la fuerza de masa virtual está determinada por la diferencia entre la aceleración del fluido y la aceleración de la partícula. Cuando el fluido acelera más rápidamente que la partícula, esta fuerza tiende a actuar en la dirección de la aceleración del fluido, favoreciendo que la partícula siga el movimiento de la fase continua. Por el contrario, cuando la aceleración de la partícula es mayor, la contribución de la fuerza se opone a dicha diferencia de aceleraciones.

El factor $1/2$ presente en la formulación corresponde al coeficiente clásico de masa añadida para una partícula esférica inmersa en un fluido. Este término representa el efecto inercial asociado al fluido que debe ser acelerado junto con la partícula durante su movimiento. Para las condiciones consideradas en este trabajo, la contribución de la fuerza de masa virtual es significativamente menor que la de la fuerza de arrastre debido a la elevada relación entre la densidad de las partículas y la densidad del aire, así como al carácter predominantemente estacionario del flujo analizado. No obstante, se incluye dentro de la formulación por formar parte de las fuerzas que pueden intervenir en la dinámica de partículas dispersas.

Interacción partícula–pared

La interacción entre las partículas y la superficie del tubo se modela mediante condiciones de rebote que dependen de los coeficientes de restitución normal y tangencial. La componente normal de la velocidad después del impacto se expresa como:

$$v_{n,después} = -e_n v_{n,antes} \quad (1.19)$$

mientras que la componente tangencial se define como:

$$v_{t,después} = e_t v_{t,antes} \quad (1.20)$$

donde e_n y e_t son los coeficientes de restitución normal y tangencial, respectivamente, los cuales caracterizan la pérdida de energía durante el impacto. Estos coeficientes dependen de las propiedades del material de la partícula y de la superficie, así como de las condiciones del impacto. Esto permite describir de manera simplificada el comportamiento de rebote de las partículas sobre superficies sólidas [6].

Energía de impacto

La energía cinética asociada al impacto de la partícula sobre la superficie se calcula como:

$$E_k = \frac{1}{2} m_p v_{\text{impacto}}^2 \quad (1.21)$$

donde E_k es la energía de impacto, m_p es la masa de la partícula y v_{impacto} es la velocidad de la partícula en el instante de contacto con la superficie.

Esta magnitud es fundamental para evaluar el potencial de erosión o daño sobre la superficie, así como para analizar la severidad de los impactos en función de las condiciones del flujo y de las propiedades de las partículas.

1.4.3. Régimen de acoplamiento

El régimen de acoplamiento entre fases depende de la fracción volumétrica de partículas α_p y de la carga másica, como se representa en la Figura 1.7.

En flujos diluidos, $\alpha_p < 10^{-3}$, el efecto de las partículas sobre el flujo continuo es despreciable, permitiendo un acoplamiento unidireccional (one-way coupling).

El valor de la fracción volumétrica seleccionado corresponde a un flujo diluido, condición bajo la cual las interacciones entre partículas pueden despreciarse y la fase continua mantiene un comportamiento prácticamente inalterado por la presencia de la fase dispersa. Esta hipótesis resulta consistente con el enfoque de acoplamiento unidireccional empleado durante las simulaciones.

Cuando la concentración aumenta y el intercambio de cantidad de movimiento es significativo, se requiere un acoplamiento de bidireccional (two-way coupling),

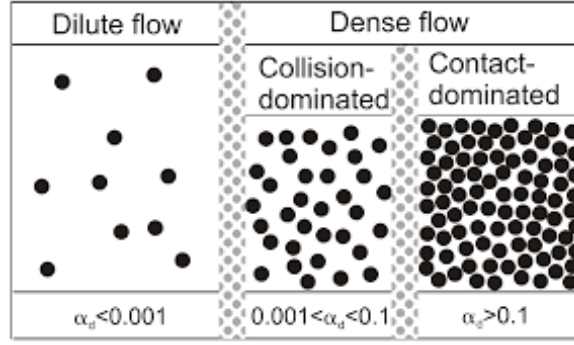


Figura 1.7: Regímenes de acoplamiento según el volumen de partículas en el flujo [6].

incorporando el término fuente $\mathbf{S}_p$ en la ecuación de cantidad de movimiento del fluido.

En concentraciones aún mayores, donde las colisiones partícula-partícula son relevantes, el sistema entra en un régimen de cuatro vías (four-way coupling), el cual puede modelarse mediante enfoques como el método MPPIC (Multi-Phase Particle-In-Cell).

El parámetro clave que gobierna el grado de interacción es el número de Stokes y la fracción volumétrica de partículas, determinando si las partículas siguen fielmente las líneas de corriente o presentan inercia suficiente para impactar la superficie del TP.

Resumen del capítulo

Los fundamentos y antecedentes sobre el comportamiento de flujos con partículas alrededor de TP permiten describir la dinámica del impacto de partículas sobre la superficie del sensor. A pesar de los avances presentados, los aspectos aerodinámicos relacionados con la interacción entre gotas y estelas turbulentas aún no han sido explorados completamente. La física de estos flujos es compleja, ya que involucra la interacción entre estructuras turbulentas de la fase continua y dispersa. Dependiendo de su tamaño y densidad, las partículas pueden desviarse significativamente de las líneas de corriente, generando fenómenos como concentración preferencial, agrupamiento o incremento en el impacto sobre superficies. Estos efectos se describen comúnmente mediante el número de Stokes, que cuantifica la capacidad de respuesta de las partículas frente a cambios en el flujo. Para valores altos de este número, las trayectorias inerciales favorecen la deposición, como se verá en los siguientes capítulos.

Capítulo 2

Caracterización numérica de un flujo con partículas alrededor de un tubo Pitot aeronáutico

En este capítulo se describe la configuración numérica empleada, incluyendo la geometría, la malla y el dominio computacional. Se realiza una simulación de flujo turbulento monofásico alrededor de un cuerpo romo con fines de validación, se presentan los esquemas numéricos, y se definen los casos de estudio considerados. Asimismo, se analiza el comportamiento del flujo y la interacción con partículas alrededor de un TP convencional bajo condiciones representativas de vuelo.

2.1. Modelado, simulación y validación del flujo de partículas alrededor de un cuerpo romo

2.1.1. Caso experimental de referencia para validación

Con el fin de verificar la capacidad del modelo numérico para reproducir adecuadamente las características aerodinámicas del flujo alrededor de cuerpos romos, se empleó como referencia el estudio experimental realizado por Thiria et al. [7].

Este experimento constituye un caso ampliamente documentado para el análisis de

la dinámica de estelas turbulentas y la distribución de presión sobre cuerpos obtusos, por lo que resulta adecuado como referencia para validar las simulaciones de la fase continua. Una vez verificada la capacidad del modelo para reproducir correctamente el campo de flujo mediante una malla adecuada, condiciones de frontera apropiadas y una buena concordancia con resultados experimentales, el seguimiento de partículas se realizó utilizando el enfoque Lagrangiano disponible en ANSYS Fluent, el cual ha sido ampliamente utilizado y validado en numerosos estudios de transporte y deposición de partículas. Por tanto, la predicción de las trayectorias e impactos de las partículas se basa en modelos consolidados y no en desarrollos numéricos propios. Aunque existen diversos estudios experimentales sobre transporte de partículas, las condiciones de flujo, los números de Reynolds y Stokes, así como las geometrías empleadas, varían considerablemente entre aplicaciones. No se encontró en la literatura un caso experimental que reproduzca simultáneamente el régimen turbulento, la geometría y las condiciones de operación consideradas en este trabajo. Por ello, se seleccionaron parámetros representativos de las condiciones reales de operación de una aeronave, correspondientes al rango de altitud y tamaño de partículas de interés. Esta elección permite analizar un escenario de mayor relevancia práctica, aun cuando no exista una configuración experimental idéntica disponible para comparación directa. En consecuencia, el objetivo de este trabajo no es desarrollar un modelo general para cualquier combinación de Re y St , sino estudiar una condición de operación representativa y de interés práctico, empleando modelos numéricos cuya validez ha sido ampliamente demostrada en la literatura.

El experimento fue llevado a cabo en un túnel de viento tipo Eiffel de circuito abierto, diseñado para generar un flujo de aire uniforme con baja intensidad de turbulencia. En la sección de prueba del túnel se obtiene una región de flujo con homogeneidad aproximada del orden de 0.4 % y una intensidad de turbulencia inferior a 0.3 %, condiciones que permiten estudiar con precisión las estructuras del flujo generadas por el cuerpo de prueba.

El objeto principal del experimento es un cuerpo romo bidimensional (Figura 2.1), el cual puede considerarse representativo de una clase amplia de cuerpos aerodinámicos con frente redondeado y parte posterior abrupta. La geometría consiste en un cilindro simétrico cuya cara frontal presenta un perfil semicircular, mientras que la parte

posterior termina en una superficie plana perpendicular a la dirección del flujo. El ancho característico de esta superficie posterior es $D = 25$ mm, parámetro que se emplea como longitud característica para definir el Re del flujo.

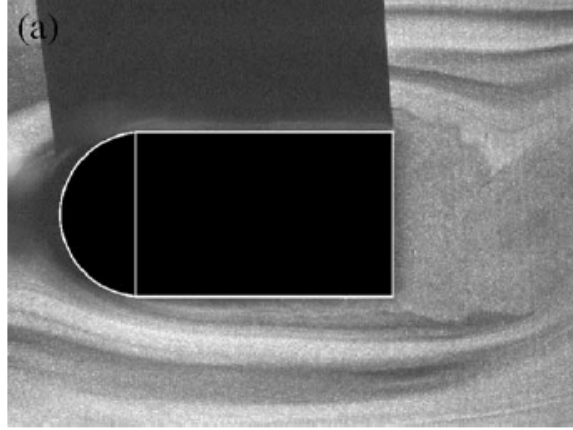


Figura 2.1: Cuerpo romo bidimensional [7].

La longitud total del cuerpo en la dirección del flujo es aproximadamente $1.92D$. Otras dimensiones geométricas asociadas a la región frontal y lateral se escalan con respecto a esta misma longitud característica. Durante los experimentos, el flujo incidente se caracteriza mediante la velocidad libre del aire, medida aguas arriba del modelo mediante un TP. Con base en esta velocidad y en el diámetro característico del cuerpo, el Re se define como

$$Re = \frac{UD}{\nu} \quad (2.1)$$

donde U es la velocidad del flujo libre, D es el ancho del cuerpo obtuso y ν es la viscosidad cinemática del aire. En el estudio experimental se investigó el comportamiento del flujo en un rango de Re comprendido aproximadamente entre 5×10^3 y 5×10^4 , lo que corresponde a un régimen turbulento moderado característico de flujos alrededor de cuerpos romos de pequeña escala.

El flujo alrededor del modelo se caracteriza mediante diversas técnicas de medición experimental. En primer lugar, se emplea una balanza aerodinámica para medir las fuerzas de arrastre y sustentación generadas por el cuerpo. Asimismo, el cuerpo principal cuenta con una serie de tomas de presión distribuidas a lo largo de su superficie central, conectadas a un sistema de adquisición de datos tipo Scanivalve, lo que permite obtener

la distribución espacial del coeficiente de presión sobre el cuerpo.

La estructura del flujo en la estela se analiza mediante técnicas de visualización y mediciones de velocidad empleando velocimetría por imágenes de partículas (PIV). Para ello se utiliza un sistema de iluminación basado en láser Nd:YAG que genera un plano de luz en el cual se registran las trayectorias de partículas trazadoras introducidas en el flujo. Estas mediciones permiten caracterizar la formación de vórtices, la extensión de la región de recirculación y la dinámica de la estela turbulenta generada por el cuerpo romo.

Entre los resultados experimentales más relevantes se encuentra la distribución del coeficiente de presión a lo largo de la superficie del cuerpo. La distribución del coeficiente de presión proporciona información fundamental sobre la interacción entre el flujo y el cuerpo, así como sobre los procesos de separación de la capa límite y la formación de la estela turbulenta. Debido a que el arrastre aerodinámico en cuerpos romos está dominado principalmente por efectos de presión, la correcta predicción de esta distribución constituye un criterio confiable para evaluar la precisión de los modelos numéricos utilizados en simulaciones CFD.

En este trabajo, este caso experimental se emplea exclusivamente como referencia para validar el modelo numérico antes de aplicarlo al estudio del flujo con partículas alrededor de un TP. Comparar datos experimentales de la literatura con resultados de simulación es la forma de comprobar si el modelo reproduce las principales características aerodinámicas del flujo alrededor de cuerpos romos, tales como la distribución de presión sobre la superficie y la estructura de la estela.

2.1.2. Configuración geométrica y dominio

La geometría empleada para la validación del modelo numérico corresponde al cuerpo obtuso utilizado en el estudio experimental descrito en la sección anterior.

Este cuerpo consiste en una configuración bidimensional (Figura 2.2) caracterizada por una superficie frontal semicircular seguida de un segmento recto en la dirección del flujo. El ancho característico del cuerpo se define como $D = 25$ mm, parámetro que se emplea como longitud de referencia para la definición de magnitudes adimensionales

como el Re.

Con el fin de reproducir numéricamente las condiciones del experimento, se construyó un dominio computacional bidimensional en el cual el cuerpo se ubica dentro de una región de flujo suficientemente extensa para evitar efectos artificiales asociados a las condiciones de frontera. Las dimensiones del dominio se definieron en función de la longitud característica D , considerando una extensión suficiente aguas arriba y aguas abajo del cuerpo para permitir el desarrollo adecuado del flujo y de la estela generada por el obstáculo.

La longitud total del dominio en la dirección del flujo se establece como $L_s = 21.5D$, mientras que la altura del dominio se fija en $W = 8D$. Esta configuración permite minimizar la influencia de las fronteras laterales sobre la solución numérica y asegurar que las estructuras de la estela puedan desarrollarse sin restricciones impuestas por el tamaño del dominio computacional.

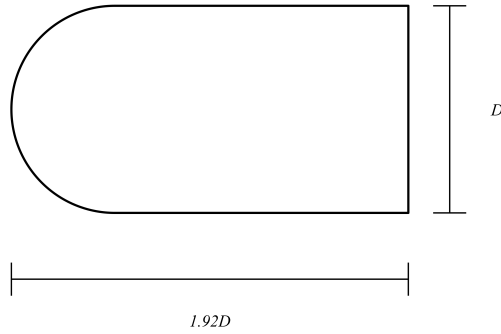


Figura 2.2: Geometría y dimensiones del cuerpo romo.

La representación esquemática del dominio utilizado en las simulaciones se muestra en la Figura 2.3, donde se indican las principales dimensiones geométricas y la ubicación del cuerpo dentro del dominio. Esta configuración se emplea posteriormente para generar la malla computacional y definir las condiciones de frontera utilizadas en las simulaciones.

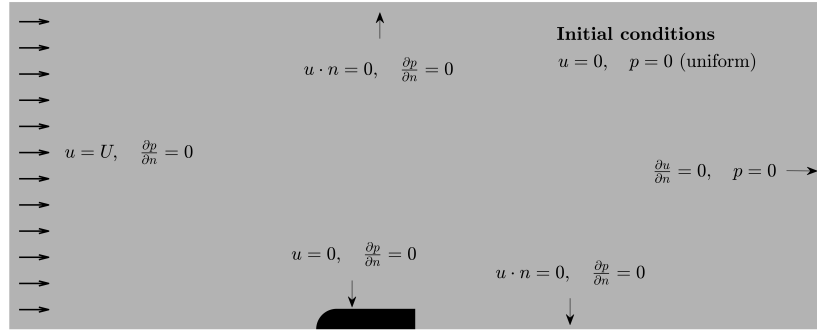


Figura 2.3: Condiciones iniciales y de frontera.

2.1.3. Implementación del modelo matemático

Fase continua

El flujo de la fase continua se resolvió mediante las ecuaciones RANS, cuya formulación se presenta en el Capítulo 1 (véanse las ecuaciones de continuidad y cantidad de movimiento allí definidas). El cierre turbulento se realizó mediante el modelo $k-\omega$ SST (Ecs. 1.9 y 1.10).

El acoplamiento entre la fase continua y la fase dispersa se abordó mediante un enfoque Euler-Lagrange, en el cual el campo de flujo se resuelve en un marco Euleriano, mientras que las partículas se rastrean individualmente en un marco Lagrangiano.

Fase dispersa

El movimiento de las partículas se obtuvo a partir de la integración de la ecuación de movimiento, considerando las principales fuerzas que actúan sobre ellas, incluyendo arrastre, gravedad y masa virtual, también descritas en el Capítulo 1 (Ecs. 1.12 y la ecuación de cantidad de movimiento de la fase dispersa).

Asimismo, se consideró la interacción partícula-pared mediante condiciones de rebote, caracterizadas por coeficientes de restitución normal y tangencial, según las relaciones (Ecs. 1.19 y 1.20) también ya definidas.

La energía de impacto de las partículas se evaluó a partir de su velocidad en el instante de contacto con la superficie, de acuerdo con la expresión correspondiente Ec. 1.21.

2.1.4. Esquemas numéricos

Las ecuaciones gobernantes de la fase portadora y de la fase dispersa se discretizaron mediante el método de volúmenes finitos dentro del entorno foam-extend. Se adoptó una formulación colocalizada centrada en celda para todas las variables. Los esquemas numéricos empleados en las simulaciones se resumen en la Tabla 2.1.

La discretización temporal se realizó utilizando el esquema de Crank–Nicolson con un factor de ponderación de 0.5, correspondiente al promedio entre las formulaciones explícita e implícita del método. Esto proporciona una precisión de segundo orden en el tiempo, manteniendo la estabilidad numérica en simulaciones de flujo turbulento.

Los gradientes espaciales se evaluaron mediante un enfoque de mínimos cuadrados con limitación basada en celdas, con el fin de controlar oscilaciones numéricas en regiones con fuertes gradientes de velocidad. Para el campo de velocidad, se empleó un esquema Gauss lineal limitado por celda, garantizando precisión espacial de segundo orden y preservando la acotación cerca de la superficie del cuerpo romo y dentro de las capas de cizalladura separadas.

Los términos convectivos en las ecuaciones de momento se discretizaron utilizando un esquema upwind lineal con corrección de gradiente, lo que proporciona precisión de segundo orden y limita la difusión numérica excesiva en la estela y la región de recirculación. Los términos difusivos se discretizaron mediante esquemas de diferencias centrales, adecuados para resolver esfuerzos viscosos en regiones cercanas a la pared cuando se combinan con una malla suficientemente refinada.

Las ecuaciones de transporte de las cantidades turbulentas se discretizaron mediante esquemas upwind lineales, asegurando estabilidad numérica y consistencia con la discretización de las ecuaciones de momento. Los términos laplacianos se evaluaron mediante un esquema Gauss lineal con limitación de coeficientes, con el fin de mantener la acotación y evitar difusión no física.

Los gradientes normales a la superficie se calcularon utilizando esquemas limitados para reducir errores numéricos cerca de las fronteras, particularmente en regiones con fuerte curvatura y gradientes de presión adversos. El cálculo de la distancia a la pared, requerido por el modelo de turbulencia, se realizó mediante el método meshWave, que garantiza una evaluación precisa de las variables turbulentas en la región cercana a la pared.

El acoplamiento presión-velocidad se resolvió mediante una estrategia segregada basada en el algoritmo SIMPLE. La convergencia se evaluó a través de los residuos de todas las variables resueltas, los cuales debían disminuir al menos tres órdenes de magnitud. Adicionalmente, se monitorearon magnitudes integrales, como las distribuciones del coeficiente de presión en la superficie, para asegurar que se alcanzara un estado estadísticamente estacionario antes de la inyección de partículas.

Tabla 2.1: Esquemas numéricos utilizados en las simulaciones.

Término	Esquema utilizado
Discretización temporal	Crank–Nicolson
Gradientes	Least squares
Términos convectivos	Linear upwind
Términos difusivos	Gauss linear

2.1.5. Generación de malla

Una vez definida la geometría del dominio computacional, se procedió a la generación de la malla empleada para discretizar el dominio de cálculo. La malla se construyó con el objetivo de capturar adecuadamente las principales características del flujo alrededor del cuerpo obtuso, en particular las regiones de alta gradiente de velocidad presentes cerca de la superficie del cuerpo y en la estela generada aguas abajo.

Para este propósito se utilizó una malla estructurada con refinamiento local en las proximidades del cuerpo (Figura 2.4), donde se espera la presencia de fuertes gradientes de velocidad asociados al desarrollo de la capa límite y a los procesos de separación del flujo. Este refinamiento permite mejorar la resolución de las variables de flujo en la región cercana a la pared, donde el comportamiento del flujo tiene una influencia

directa en la predicción de la distribución de presión y de los coeficientes aerodinámicos.

En contraste, en las regiones alejadas del cuerpo se empleó una discretización más gruesa, ya que en estas zonas las variaciones espaciales del flujo son menores. Esta estrategia de refinamiento progresivo permite obtener una representación adecuada del campo de flujo manteniendo un compromiso razonable entre precisión numérica y costo computacional.

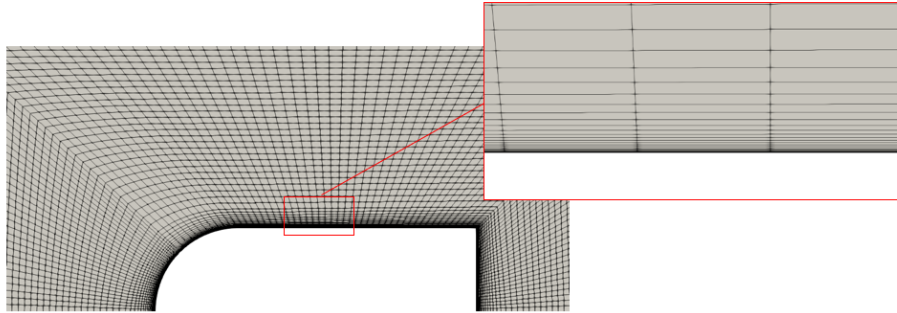


Figura 2.4: Detalle de la malla computacional empleada en la simulación del flujo alrededor del cuerpo obtuso.

La Figura 2.4 muestra un detalle de la malla computacional generada alrededor del cuerpo obtuso, donde puede observarse el refinamiento aplicado en la región cercana a la superficie y en la zona de desarrollo de la estela. La configuración de la malla utilizada en las simulaciones fue posteriormente evaluada mediante un estudio de independencia de malla, el cual se presenta en la siguiente sección.

2.1.6. Independencia de malla

Con el fin de garantizar que los resultados obtenidos en las simulaciones no dependan de la resolución espacial del dominio, se realizó un estudio de independencia de malla. Para este propósito se generaron varias configuraciones de malla con diferentes niveles de refinamiento, particularmente en la región cercana a la superficie del cuerpo y en la zona de desarrollo de la estela.

Las distintas mallas se construyeron variando el número de elementos en la capa límite y en las regiones donde se presentan gradientes significativos de velocidad. Posteriormente, se realizaron simulaciones para cada una de las configuraciones y se

compararon los perfiles de velocidad en la región de la estela, así como las distribuciones de presión sobre la superficie del cuerpo.

La comparación de los resultados obtenidos con las diferentes configuraciones de malla se muestra en la Figura 2.5, donde se observa la convergencia de los perfiles de velocidad en la región de la estela a medida que aumenta la resolución de la malla.

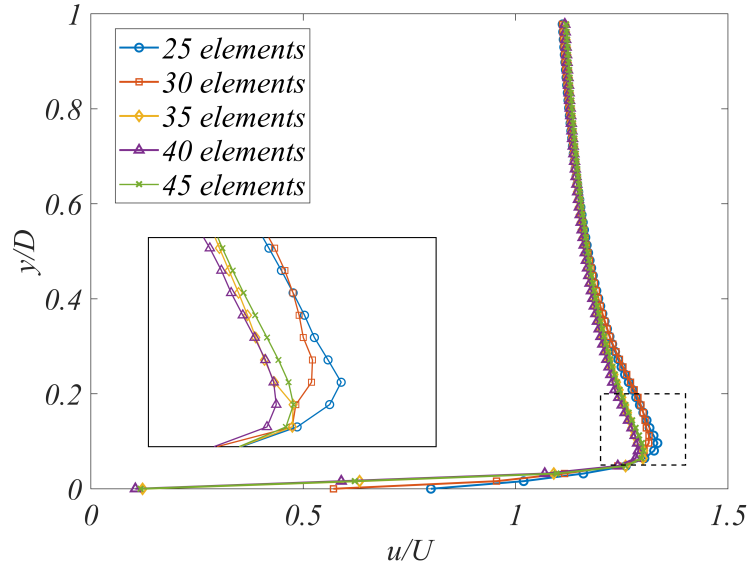


Figura 2.5: Comparación de perfiles de velocidad obtenidos con diferentes configuraciones de malla para evaluar la independencia de la solución respecto a la discretización espacial.

Los resultados obtenidos muestran que, si se incrementa el nivel de refinamiento de la malla, las diferencias entre las soluciones numéricas se reducen progresivamente. Las soluciones correspondientes a las mallas más refinadas presentan variaciones mínimas entre sí, lo cual indica que la solución ha alcanzado un estado de independencia respecto a la discretización espacial.

Con base en este análisis, se seleccionó la malla que ofrece un compromiso adecuado entre precisión numérica y costo computacional, la cual fue empleada en todas las simulaciones presentadas en los capítulos posteriores.

2.1.7. Validación del modelo de flujo

Coeficiente de presión (C_p)

Una de las variables más utilizadas para evaluar el comportamiento aerodinámico de un cuerpo sumergido en un flujo es el coeficiente de presión. Este parámetro permite describir la distribución de presión a lo largo de la superficie del cuerpo y constituye una magnitud adimensional adecuada para comparar resultados experimentales y numéricos.

El coeficiente de presión se define como

$$C_p = \frac{p - p_\infty}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (2.2)$$

donde p representa la presión local sobre la superficie del cuerpo, p_∞ corresponde a la presión del flujo libre, ρ es la densidad del fluido y U_∞ es la velocidad característica del flujo incidente.

Además de la distribución de presión, otro parámetro relevante para caracterizar el comportamiento del flujo sobre la superficie del cuerpo es el coeficiente de fricción. Este coeficiente permite evaluar los efectos de las tensiones cortantes generadas por el flujo en la pared.

El coeficiente de fricción se define como

$$C_f = \frac{\tau_w}{\frac{1}{2}\rho U_\infty^2} \quad (2.3)$$

donde τ_w representa el esfuerzo cortante en la pared, ρ corresponde a la densidad del fluido y U_∞ es la velocidad del flujo libre.

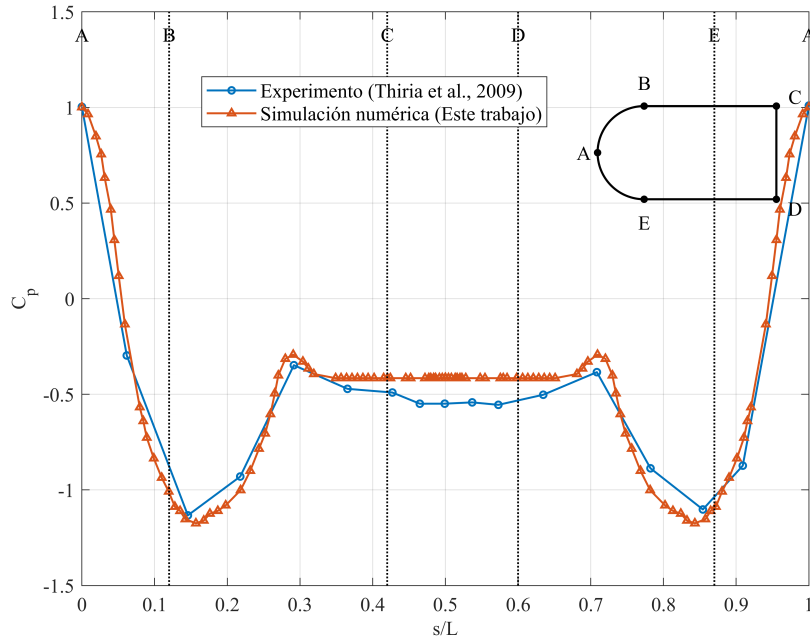


Figura 2.6: Distribución del coeficiente de presión a lo largo de la superficie del cuerpo romo: comparación entre simulación y experimento.

La distribución del coeficiente de presión obtenida mediante las simulaciones se comparó con los datos experimentales reportados en la literatura para el caso de flujo alrededor de un cuerpo obtuso. La comparación se muestra en la Figura 2.6, donde se observa una buena correspondencia entre los resultados numéricos y experimentales a lo largo de la superficie del cuerpo.

La concordancia es muy buena en la mayor parte de la superficie. El punto de estancamiento y la recuperación de presión en los lados del cuerpo romo se capturan con precisión. Se observan pequeñas diferencias en la región posterior, donde la separación del flujo y las fluctuaciones no estacionarias pueden contribuir a discrepancias entre el modelo RANS y las mediciones experimentales. No obstante, la distribución global de C_p es consistente con la referencia experimental, lo que confirma que el modelo de turbulencia y la resolución de malla seleccionados proporcionan una representación confiable del flujo monofásico alrededor del cuerpo romo.

2.1.8. Casos de simulación

Con el fin de evaluar el desempeño del modelo numérico, se definieron tres configuraciones de simulación que permiten analizar tanto el flujo monofásico como el comportamiento del flujo con gotas. Estas configuraciones se resumen en la Tabla 2.2.

Las condiciones del flujo consideradas en las simulaciones se definieron a partir de dos escenarios atmosféricos representativos del entorno operativo de aeronaves ligeras. El primer escenario corresponde a condiciones cercanas al nivel del mar, mientras que el segundo representa condiciones de gran altitud, donde la densidad del aire disminuye de manera significativa. Las propiedades del fluido empleadas en cada caso se estimaron a partir del modelo de atmósfera estándar internacional (ISA), lo cual permite obtener valores representativos de densidad y viscosidad del aire en función de la altitud.

Tabla 2.2: Configuración numérica para simulaciones de flujo con gotas.

Categoría / Magnitud	Caso A	Caso B	Caso C
Geometría			
Ancho del cuerpo $D = 25$ mm; Largo del cuerpo $l = 1.92D$;			
Altura del dominio $W = 8D$; Largo del dominio $L_s = 21.5D$.			
Fase continua (Aire)			
Velocidad de entrada U [m/s]	22	22	75
Densidad ρ [kg/m ³]	1.204	0.696	0.696
Viscosidad cinemática ν [m ² /s]	1.5×10^{-5}	2.31×10^{-5}	2.31×10^{-5}
Número de Reynolds Re_D [-]	36700	23800	81000
Fase discreta (Gotas)			
Diámetro de las gotas d_p [μ m]	—	50	50
Densidad de las gotas ρ_p [kg/m ³]	—	993.124	993.124
Concentración volumétrica α [-]	—	1.249×10^{-8}	3.665×10^{-9}
Número de Stokes $St^\dagger$ [-]	—	7.54	25.7

Nota. Geometría es idéntica para todos los casos. Caso A corresponde a un flujo de una sola fase (aire), mientras que los Casos B y C incluyen gotas bajo propiedades de gran altitud.

Asimismo, las velocidades características del flujo se seleccionaron considerando valores típicos de operación de aeronaves ligeras. Se tomó como referencia la velocidad de crucero de aeronaves como el Cessna 182, la cual se encuentra cercana a 75 m/s. Esta consideración permite analizar el comportamiento del flujo y de las partículas bajo condiciones representativas de operación real de un TP instalado en una aeronave.

Configuración de inyección

Para analizar la interacción entre el flujo y las partículas transportadas en el dominio de simulación, se definió una configuración de inyección que permite introducir partículas en el flujo incidente de forma controlada. En el enfoque Euler-Lagrange empleado en este trabajo, las partículas se liberan en una región específica del dominio y posteriormente se rastrean individualmente conforme interactúan con el campo de velocidad del fluido.

Las partículas se introducen en el dominio desde una región ubicada aguas arriba del cuerpo analizado, de modo que su movimiento inicial se encuentre influenciado por el flujo incidente principalmente. Esta configuración permite reproducir una condición en la que las partículas son transportadas por el flujo antes de interactuar con el obstáculo presente en el dominio.

Cada partícula se caracteriza mediante propiedades físicas definidas previamente, tales como su diámetro, densidad y velocidad inicial (Tabla 2.2). La velocidad inicial de las partículas se considera igual a la velocidad del flujo en la región de inyección, lo cual permite representar una condición en la que las partículas se encuentran inicialmente acopladas al movimiento del fluido.

Durante la simulación, las trayectorias de las partículas se calculan resolviendo su ecuación de movimiento en función del campo de velocidad obtenido para la fase continua. A medida que las partículas se desplazan dentro del dominio, se evalúa su interacción con las superficies sólidas, permitiendo identificar eventos de impacto sobre la superficie del cuerpo analizado.

Esta configuración permite analizar el comportamiento de las partículas transportadas por el flujo y evaluar su tendencia a impactar sobre la superficie del TP bajo diferentes condiciones de flujo y propiedades de partícula.

2.1.9. Resultados de simulación para un cuerpo obtuso

Los resultados obtenidos de los distintos casos de simulación, así como de la configuración de inyección, simulación C_p y C_f se presentan a continuación.

La simulación reproduce adecuadamente el comportamiento característico del flujo en la región frontal (Figura 2.7), donde se presenta un máximo de presión asociado al punto de estancamiento. Asimismo, se observa una disminución progresiva del coeficiente de presión a lo largo de la superficie del cuerpo conforme el flujo acelera alrededor del obstáculo.

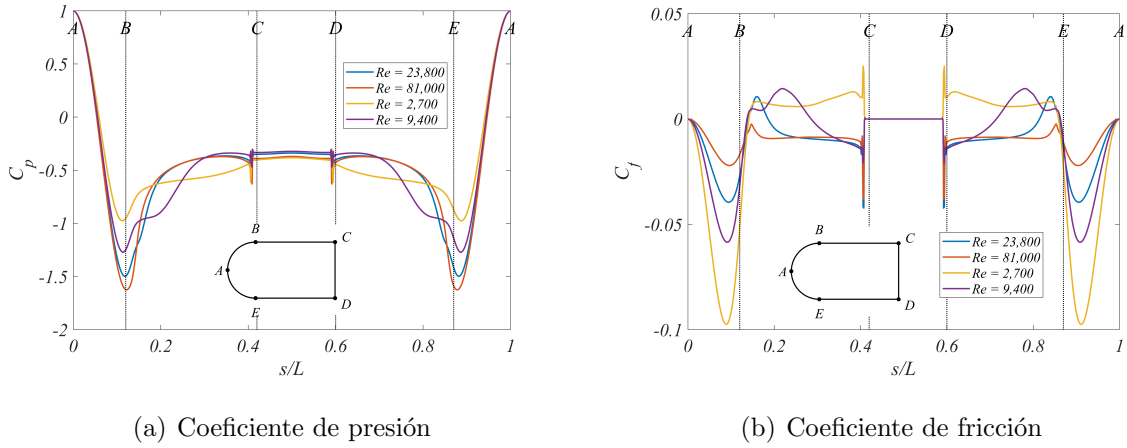


Figura 2.7: Distribuciones del coeficiente de presión (C_p) y del coeficiente de fricción (C_f) alrededor de la superficie del cuerpo romo para distintos Re_D .

Estos resultados indican que el modelo numérico es capaz de capturar de manera adecuada las principales características del campo de presión alrededor del cuerpo obtuso, lo cual constituye un primer paso en la validación del modelo empleado en este estudio.

La distribución del coeficiente de fricción obtenida a partir de las simulaciones se presenta también en la Figura 2.7. Este parámetro permite identificar las regiones donde el flujo permanece adherido a la superficie del cuerpo y aquellas donde se producen fenómenos de separación. Se observa que el coeficiente de fricción presenta valores máximos en la región cercana al punto de estancamiento, donde los gradientes de velocidad son más pronunciados. Conforme el flujo se desplaza a lo largo de la superficie del cuerpo, el valor de C_f disminuye gradualmente hasta alcanzar valores cercanos a

cero en la región donde ocurre la separación del flujo.

El análisis de esta distribución proporciona información adicional sobre el comportamiento del flujo en la capa límite y complementa la validación del modelo numérico obtenida mediante la comparación de la distribución de presión.

Por otro lado, los resultados del flujo monofásico evidencian una región de estancamiento claramente definida en la punta del tubo, seguida por la aceleración del flujo sobre la superficie lateral y la formación de una estela con recirculación aguas abajo. La distribución del coeficiente de presión presenta un máximo en la región frontal y un mínimo asociado a la aceleración en los hombros, en concordancia con la teoría clásica de flujo alrededor de cuerpos romos.

Campo de flujo

Con el fin de analizar de manera cualitativa la estructura del flujo alrededor del cuerpo obtuso, se presentan en las Figuras 2.8 y 2.9 los contornos de velocidad normalizada junto con las líneas de corriente obtenidas a partir de las simulaciones numéricas. Esta representación permite visualizar las principales características del campo de flujo y evaluar la capacidad del modelo para reproducir el comportamiento observado.

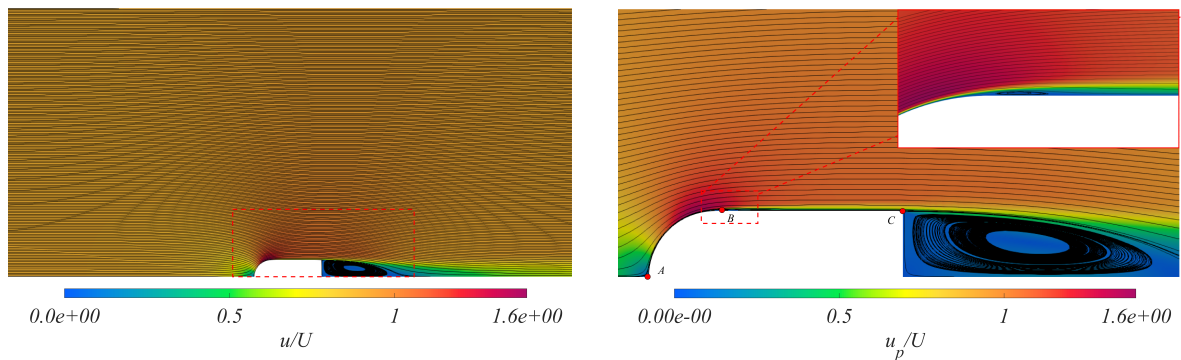


Figura 2.8: Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para $Re_D = 23,800$.

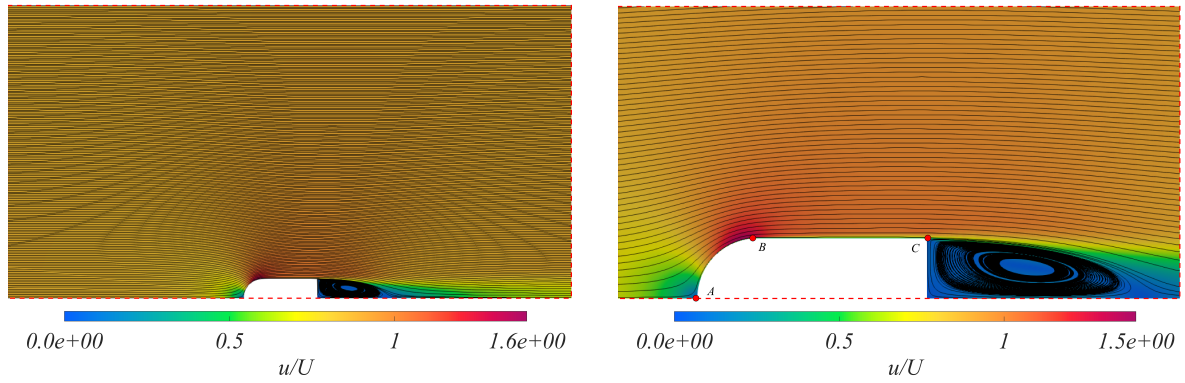


Figura 2.9: Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para $Re_D = 81,000$.

En la región frontal del cuerpo se identifica claramente el punto de estancamiento, donde la velocidad del flujo se reduce significativamente debido al impacto directo del flujo incidente sobre la superficie. A partir de esta región, el flujo se acelera a lo largo de la superficie del cuerpo conforme las líneas de corriente se desvían alrededor del obstáculo.

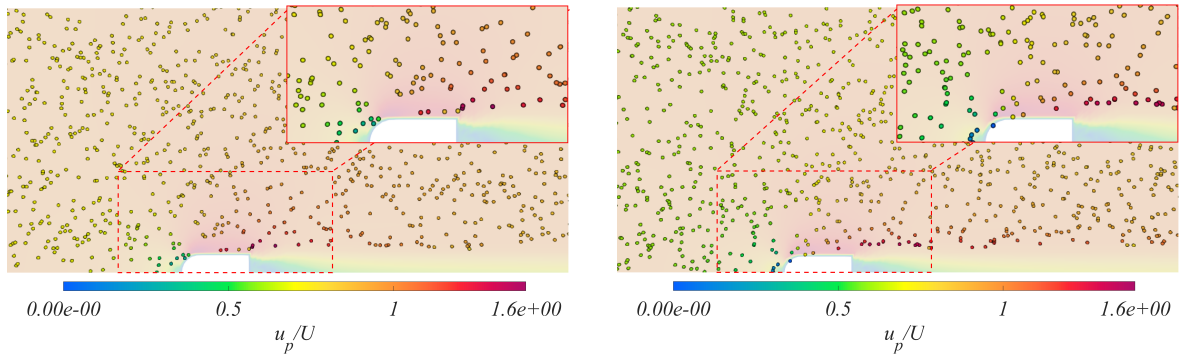
Posteriormente, al avanzar hacia la parte posterior del cuerpo, se observa una reducción de la velocidad del flujo asociada al desarrollo de gradientes adversos de presión. Este fenómeno hace que la capa límite se separe y se forme una zona de recirculación detrás del cuerpo. En esa región aparecen vórtices típicos del flujo alrededor de cuerpos romos.

La estructura general del campo de flujo obtenida mediante las simulaciones reproduce adecuadamente las características principales reportadas en el estudio experimental de referencia, particularmente en lo que respecta a la posición de la separación del flujo y la extensión de la región de recirculación. Estos resultados, junto con la comparación de los coeficientes aerodinámicos presentados en las secciones anteriores, confirman que el modelo numérico es capaz de representar de forma satisfactoria el comportamiento del flujo alrededor del cuerpo utilizado en el proceso de validación.

Los campos de velocidad de las gotas para los dos Re se muestran en la Figura 2.10. La fase dispersa sigue el patrón general del flujo portador, pero presenta desviaciones claras respecto a las líneas de corriente en la región de estancamiento y a lo largo de las capas de cizalladura separadas. Para el caso de menor Re ($Re_D = 23,800$), las gotas

experimentan una desaceleración más gradual y son desviadas en un rango angular más amplio, lo que resulta en una distribución más difusa de trayectorias hacia el cuerpo. En el caso de mayor Re ($Re_D = 81,000$), las trayectorias de las gotas se alinean más con la dirección del flujo libre, lo que indica efectos inerciales más intensos que limitan su capacidad para seguir las líneas de corriente curvadas. Este comportamiento es consistente con el mayor número de Stokes del caso, donde el tiempo de respuesta de las gotas permanece constante mientras que la escala temporal del flujo disminuye con el aumento de la velocidad.

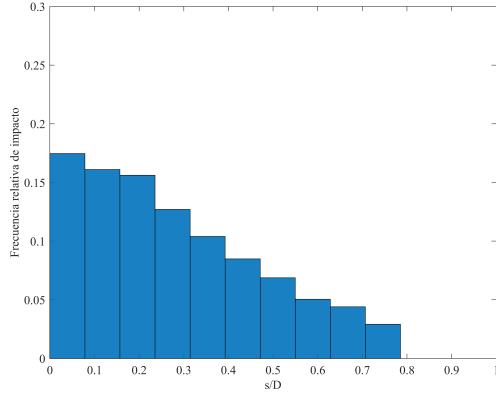
Las distribuciones correspondientes de frecuencia de impacto se presentan en la Figura 2.11. Para $Re_D = 23,800$, la impingencia de gotas se extiende sobre una región amplia de la superficie frontal, con una frecuencia máxima localizada cerca del punto de estancamiento y una disminución gradual hacia los hombros. En contraste, para $Re_D = 81,000$, la impingencia se concentra en una zona más estrecha centrada cerca del borde de ataque, y la frecuencia decrece de manera más pronunciada aguas abajo. Este cambio en el perfil de impacto refleja el aumento de la inercia de las gotas en relación con la curvatura local del flujo, lo que favorece el impacto directo en lugar de la dispersión lateral. Por lo tanto, los resultados demuestran la sensibilidad de los patrones de impingencia de gotas al Re , incluso cuando las propiedades de las gotas se mantienen constantes.



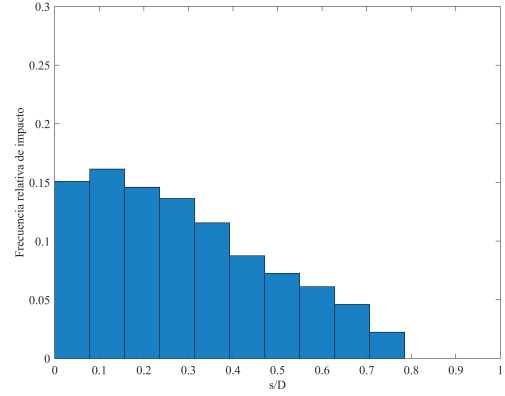
(a) $Re_D = 23,800$ y $St = 7.54$

(b) $Re_D = 81,000$ y $St = 25.7$

Figura 2.10: Contornos de velocidad de la fase dispersa de gotas para (a) $Re_D = 23,800$ y (b) $Re_D = 81,000$.



(a) $Re_D = 23,800$ and $St = 7.54$



(b) $Re_D = 81,000$ and $St = 25.7$

Figura 2.11: Frecuencia de impacto de partículas alrededor de la superficie del cuerpo romo para (a) $Re_D = 23,800$ y (b) $Re_D = 81,000$.

La correcta representación del campo fluido garantiza que la dinámica de partículas se desarrolla sobre una base aerodinámica físicamente consistente.

2.2. Modelado y simulación del flujo de partículas alrededor del tubo Pitot

Una vez validado el modelo numérico para el caso de flujo alrededor de un cuerpo obtuso, se procedió a aplicar la metodología desarrollada al estudio del flujo con partículas alrededor de un TP. Con el fin de abordar la problemática principal del proyecto, se delimitaron las condiciones de análisis a escenarios representativos del entorno operativo de aeronaves ligeras, donde este tipo de sensores se emplea comúnmente para la medición de la velocidad del aire.

Como referencia, se consideró el desempeño de la aeronave Cessna 182, debido a su amplia utilización y a que opera en un rango adecuado de velocidades y altitudes para el análisis del impacto de partículas sobre instrumentos aerodinámicos. Se adoptó una velocidad de crucero máxima de 269 km/h y un techo de servicio de 18100 ft (5517 m) [28], valores utilizados para definir las condiciones de simulación.



Figura 2.12: Cessna 182 [8].

Bajo estas condiciones, el flujo incidente se caracteriza mediante una velocidad uniforme del aire, seleccionada de acuerdo con los valores típicos de operación en vuelo. El Re se define en función del diámetro característico del TP, permitiendo analizar el comportamiento aerodinámico del flujo en régimen turbulento.

Con base en estas condiciones, se seleccionó un TP compatible con este tipo de aeronaves, siendo el modelo AN5814 una opción representativa. Este dispositivo, clasificado como tubo Pitot tipo L debido a su geometría, se empleó como caso base para el estudio. El análisis de su diseño convencional se llevó a cabo considerando una geometría representativa de sonda aerodinámica (Figura 2.13), expuesta a flujo externo turbulento bajo condiciones potenciales de formación de hielo en vuelo.

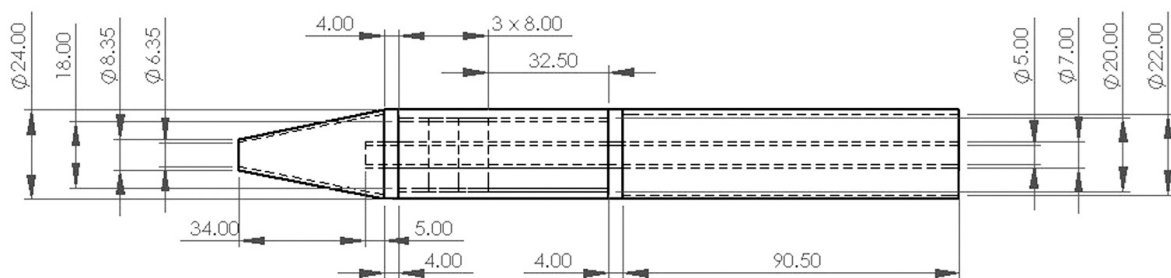


Figura 2.13: Dimensiones internas (mm) del tubo Pitot [9].

Para el desarrollo del modelo CFD, se generó un dominio axisimétrico que reproduce la geometría del TP seleccionado, como se muestra en la Figura 2.14.

El empleo de un dominio axisimétrico se justifica por la geometría de revolución del

tubo Pitot y por las condiciones uniformes del flujo incidente. Bajo estas condiciones, la hipótesis de simetría permite reducir significativamente el costo computacional sin alterar los principales mecanismos físicos asociados a la distribución de presión ni a las trayectorias de las partículas alrededor del sensor.

Las propiedades del fluido se definieron considerando aire como fluido de trabajo, con valores constantes de densidad y viscosidad dinámica correspondientes a condiciones atmosféricas estándar a una altitud de 5517 m, lo que equivale a una temperatura de 252.29 K (-20.86 °C).

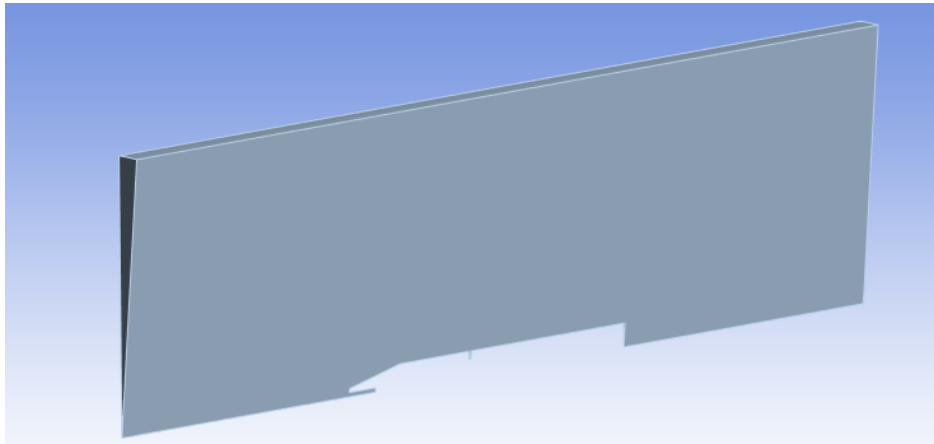


Figura 2.14: Dominio axisimétrico para simulación sobre tubo Pitot.

Con el fin de garantizar una adecuada resolución del flujo en las regiones de mayor gradiente, se implementó un refinamiento local de la malla en la zona cercana a la superficie del tubo, particularmente en la punta y en la región frontal expuesta al flujo (Figura 2.15). A partir de la variación del número de elementos en esta región, se llevó a cabo un análisis iterativo de convergencia de malla para asegurar la independencia de los resultados respecto a la discretización espacial.

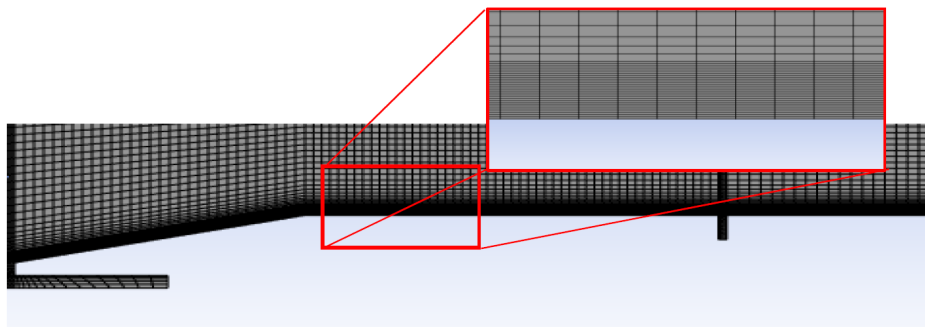


Figura 2.15: Malla computacional empleada en el estudio.

Una vez establecido el dominio y validada la malla, se configuró la simulación con partículas para esta geometría. Las condiciones de simulación empleadas, incluyendo las propiedades del flujo continuo y las características de la fase dispersa, se resumen en la Tabla 2.3. Se seleccionó el caso correspondiente a la mayor velocidad y Re , con el objetivo de aproximarse a condiciones de vuelo reales y más exigentes para el instrumento. Para el análisis de la fase dispersa, se consideró la presencia de partículas transportadas por el flujo incidente, caracterizadas por su diámetro, densidad y velocidad inicial. Estas se introducen en el dominio desde una región ubicada aguas arriba del TP, y sus trayectorias se determinan resolviendo su ecuación de movimiento en función del campo de velocidad del fluido, bajo el supuesto de acoplamiento unidireccional entre fases.

Tabla 2.3: Parámetros de simulación considerados para el análisis del flujo alrededor del tubo Pitot.

Parámetro	Valor
Velocidad del flujo (U_∞)	75 m/s
Densidad del aire (ρ)	0.69 kg/m ³
Viscosidad dinámica (μ)	2.31×10^{-5} Pa·s
Diámetro característico (D)	24 mm
Número de Reynolds	7.8×10^4
Diámetro de partículas	50 μ m
Densidad de partículas	993.12 kg/m ³

Las condiciones de frontera del dominio se establecieron para reproducir un flujo externo alrededor del dispositivo. En la entrada se impone una velocidad uniforme, mientras que en la salida se utiliza una condición de gradiente nulo. Las superficies sólidas del TP se modelan mediante una condición de no deslizamiento.

Se seleccionó el caso correspondiente a la mayor velocidad y Re , con el objetivo de aproximarse a condiciones de vuelo reales y más exigentes para el instrumento. En la Figura 2.16 se presenta un instante representativo de la simulación, donde se muestra el campo de velocidades de la fase continua junto con la distribución espacial de las partículas.

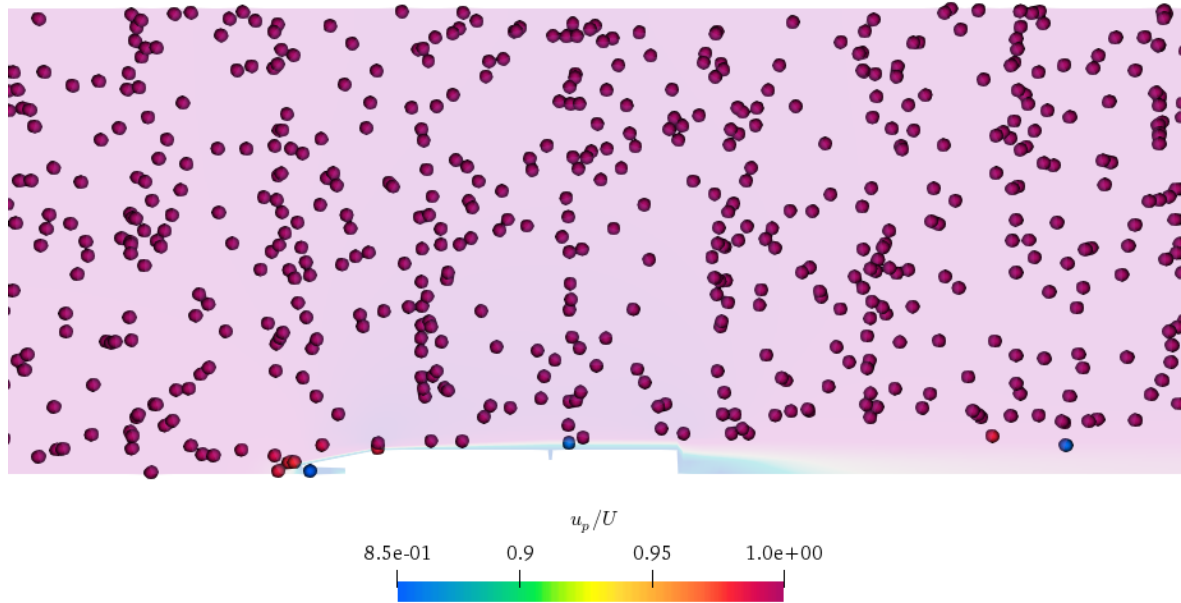


Figura 2.16: Simulación de flujo con partículas alrededor del tubo Pitot: campo de velocidades de la fase continua y distribución instantánea de partículas ($Re=81000$, $St=25.7$).

Esta configuración permite analizar la interacción entre el flujo y las partículas transportadas, así como evaluar la tendencia de impacto sobre la superficie del TP bajo distintas condiciones de operación.

Estos resultados permitirán identificar las zonas críticas de impacto, las cuales sirven como base para justificar los criterios de diseño orientados a reducir el impacto de partículas en este importante instrumento de medición de velocidad.

A partir de la simulación, se obtuvo la estadística de impactos de partículas sobre la superficie del tubo. La Figura 2.17 muestra un histograma de la distribución de impactos a lo largo de la superficie del TP, considerando una región desde el punto de estancamiento hasta aproximadamente 48 mm sobre el cuerpo del tubo. Los resultados indican que la mayor concentración de impactos se localiza en la punta, cuya geometría es casi cónica, mientras que se observa una reducción significativa en la captación de partículas en el puerto de presión de estancamiento y en la sección horizontal posterior.

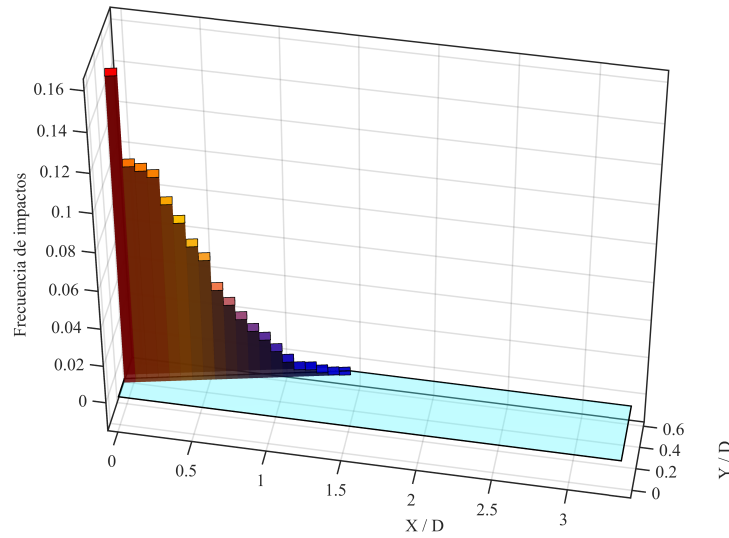


Figura 2.17: Histograma y representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la punta del tubo Pitot ($Re=81000$, $St=25.7$).

La distribución espacial de impactos obtenida numéricamente presenta concordancia cualitativa con observaciones experimentales realizadas sobre el mismo modelo de TP. En la Fig. 2.18 se muestra una evidencia experimental de acumulación de hielo reportada por Jäckel et al. (2018) [4]. Aunque el fenómeno observado corresponde a formación de hielo, y no directamente a deposición de partículas sólidas, ambos procesos dependen del transporte de partículas o gotas por el flujo y de su impacto sobre la superficie del sensor. La acumulación se concentra principalmente en la región frontal de la punta, mientras que la sección posterior del tubo presenta una deposición mucho menor. Este comportamiento es consistente con la distribución numérica mostrada en la Figura 2.18 en la cual la frecuencia de impactos se concentra en la punta del TP y disminuye rápidamente hacia la región posterior.



Figura 2.18: Evidencia experimental de acumulación de hielo sobre el mismo modelo de tubo Pitot [4].

Resumen del capítulo

En este capítulo se presenta la caracterización numérica del problema estudiado en esta tesis. Las simulaciones emplearon el modelo de turbulencia $k-\omega$ SST con tratamiento de pared mejorado y un enfoque lagrangiano para el seguimiento de partículas con acoplamiento unidireccional. La validación con datos experimentales confirmó que la configuración numérica reproduce adecuadamente las características aerodinámicas de la configuración de referencia. El campo de flujo simulado se validó exitosamente mediante la comparación con distribuciones experimentales del coeficiente de presión reportadas por [7], mostrando una excelente concordancia en el punto de estancamiento y a lo largo de las regiones laterales, lo cual confirma la idoneidad de la resolución de la malla y de la estrategia de modelado de la turbulencia para captar la estela separada detrás del cuerpo romo. Además, se incorporó el análisis del flujo con partículas alrededor de un TP convencional, permitiendo evaluar la distribución de impactos y su comportamiento aerodinámico bajo condiciones representativas de vuelo. Esta formulación constituye la base metodológica para el análisis de los resultados presentados en los capítulos posteriores.

Capítulo 3

Propuestas de diseño alternativo de tubos Pitot para la reducción de impacto de partículas

Este capítulo presenta propuestas de diseño alternativo de TP orientadas a reducir el impacto de partículas en el sensor. Se parte del análisis del comportamiento del diseño convencional, cuya configuración numérica y resultados se exponen en el Capítulo 2. En el presente capítulo se propone y compara diversas modificaciones geométricas como soluciones iniciales. Con el fin de mantener una secuencia lógica en la presentación de la información, el Capítulo 4 describe el análisis del flujo y se dedica al análisis comparativo de los resultados, evaluando el desempeño de las distintas propuestas de diseño e identificando aquellas con mayor potencial de aplicación.

Identificación de las zonas críticas de impacto

El análisis de las partículas reveló que la mayoría de los impactos ocurren alrededor de la zona de estancamiento. Este efecto se vuelve mucho más fuerte a medida que aumenta el número de Stokes, definido por la ecuación 1.3.

Para Re moderados, el impacto se reparte en una zona más amplia alrededor de la punta. A mayor velocidad, esa zona se hace más estrecha y se concentra cerca del eje frontal, lo que indica que domina la inercia.

Las zonas críticas son la región de estancamiento en la punta, la transición hacia los hombros del tubo y la zona cercana al puerto estático. En estas regiones es más probable que se acumulen partículas y que el desempeño del instrumento se vea afectado.

Criterios de diseño para la reducción de impacto

Con base en estas observaciones, se establecieron criterios de diseño considerando: la reducción de gradientes de presión locales en la zona de estancamiento, la modificación de la curvatura geométrica para redistribuir las líneas de corriente, el incremento del radio de transición frontal, el desplazamiento del punto de estancamiento y la minimización de superficies perpendiculares al flujo incidente.

3.1. Diseños propuestos

A partir del análisis de los resultados de las simulaciones del flujo con partículas alrededor del TP, y considerando los criterios de diseño establecidos, se plantea la evaluación de nuevas configuraciones geométricas. Si bien las normas aeronáuticas vigentes, como la SAE AS8006A, no imponen restricciones geométricas directas sobre parámetros como el diámetro, la longitud o el ángulo de la punta, sí establecen requisitos de desempeño y confiabilidad bajo condiciones operativas representativas. Estos parámetros pueden modificarse en el diseño mediante cambios geométricos, siempre que el instrumento siga funcionando correctamente y cumpla con los criterios de certificación. Sobre esta base, se proponen dos configuraciones geométricas alternativas orientadas a modificar la interacción partícula-superficie sin comprometer el desempeño aerodinámico ni la calidad de la medición de presión.

3.1.1. Modificación geométrica 1

Consiste en el incremento del radio de curvatura en la punta del tubo. Esta modificación busca suavizar la desaceleración del flujo en la región frontal, reduciendo la intensidad del gradiente de presión y favoreciendo una desviación más progresiva de las partículas.

Se espera que estas modificaciones:

- Modifiquen el campo de flujo en la región frontal del TP.
- Reduzcan la concentración de impactos de partículas cerca del puerto de estancamiento.
- Mantengan una distribución de presión similar a la del diseño convencional, evitando alteraciones importantes en la medición del sensor.

La Figura 3.1 presenta la definición geométrica de la modificación correspondiente al Modelo A. En esta configuración, la superficie frontal se representa mediante un arco de radio R , cuyo centro de curvatura se localiza mediante las distancias horizontal y vertical x_R y y_R , respectivamente. Asimismo, L_p representa la distancia horizontal comprendida entre el inicio y el final de la región curva de la punta.

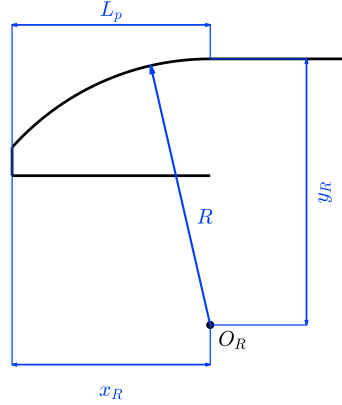


Figura 3.1: Definición de los parámetros geométricos empleados en las configuraciones del Modelo A con punta curva.

La Tabla 3.1 resume los valores normalizados de los parámetros empleados para construir las configuraciones A1, A2 y A3. El radio de curvatura R define la forma de la superficie curva, mientras que las distancias x_R y y_R permiten localizar el centro de curvatura respecto a las referencias geométricas de la punta. La longitud L_p corresponde a la proyección horizontal de la región curva. Todos los parámetros dimensionales se normalizan con respecto al diámetro característico D del TP.

Tabla 3.1: Parámetros geométricos normalizados de las configuraciones del Modelo A con punta curva.

Parámetro	A1	A2	A3
R/D	2.00	1.125	0.75
x_R/D	1.102	0.7925	0.6187
y_R/D	1.99	1.124	0.75
L_p/D	1.25	0.83	0.625

3.1.2. Modificación geométrica 2

El segundo diseño propone una transición geométrica más gradual en la región frontal, mediante la incorporación de una superficie inclinada con generatriz recta previa al cuerpo principal del TP. Esta modificación altera de manera directa la estructura del flujo en la zona de impacto, afectando tanto la distribución de presión como las trayectorias de las partículas.

Esta estrategia tiene como objetivos:

- Favorecer la desviación de las partículas respecto a la geometría.
- Reducir la concentración de impactos en la región axial sin alterar significativamente la distribución de presión asociada al funcionamiento del sensor.

La Figura 3.2 presenta la definición geométrica de la modificación correspondiente al Modelo B. En esta configuración, el parámetro θ representa el ángulo formado entre la superficie inclinada y la dirección de referencia horizontal, mientras que L_p corresponde a la longitud horizontal de la punta modificada.

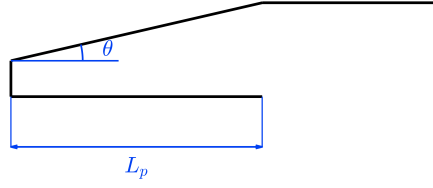


Figura 3.2: Definición de los parámetros geométricos empleados en las configuraciones del Modelo B con superficie inclinada.

La Tabla 3.2 presenta los valores del ángulo de inclinación y de la longitud de punta considerados para las configuraciones B1, B2 y B3. A diferencia del Modelo A, estas configuraciones no se definen mediante un radio de curvatura ni requieren la localización de un centro geométrico, ya que la superficie frontal está formada por una generatriz recta.

Tabla 3.2: Parámetros geométricos de las configuraciones del Modelo B con superficie inclinada.

Parámetro	B1	B2	B3
θ	12°	20°	35°
L_p/D	1.53	0.89	0.56

En ambos modelos, la longitud de la punta L_p se modifica de acuerdo con la geometría de cada configuración. En el Modelo A, su variación se combina con el radio y la posición del centro de curvatura, mientras que en el Modelo B se relaciona con el ángulo de inclinación de la superficie frontal. De esta manera, cada conjunto de parámetros define una geometría específica para evaluar su influencia sobre el campo de flujo y la distribución de impactos de partículas.

Las Figuras 3.3 y 3.4 muestran las geometrías completas correspondientes a las configuraciones evaluadas de los Modelos A y B, respectivamente.

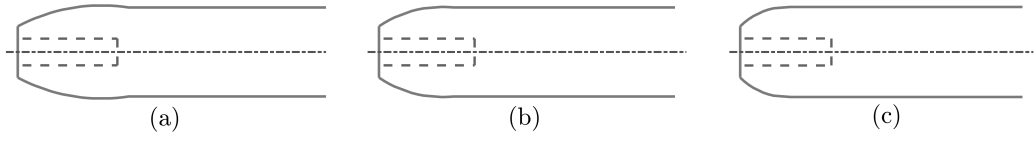


Figura 3.3: Configuraciones geométricas A1, A2 y A3 correspondientes al Modelo A con punta curva.

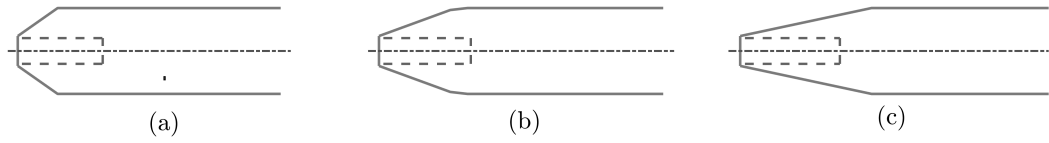


Figura 3.4: Configuraciones geométricas B1, B2 y B3 correspondientes al Modelo B con superficie inclinada.

La separación de los parámetros geométricos en dos tablas permite describir de manera específica las variables propias de cada modelo. En el Modelo A se consideran el radio de curvatura, la localización de su centro y la longitud de la punta, mientras que en el Modelo B únicamente se requieren el ángulo de inclinación y la longitud de la superficie frontal. Esta clasificación facilita una comparación consistente entre los distintos casos simulados y permite aislar el efecto de cada variable de diseño sobre la trayectoria y el impacto de las partículas.

3.2. Comparación preliminar de diseños

La comparación preliminar se realizó considerando:

- Frecuencia de impacto.
- Longitud de arco afectada (s/D).
- Valor máximo local de impacto.

Como se mencionó, se definieron tres configuraciones del Modelo A con el objetivo de evaluar el efecto del radio de curvatura en la punta del TP, mostradas en la Figura 3.3, donde se presentan las variaciones geométricas normalizadas con respecto al diámetro característico D .

La Tabla 3.3 resume los parámetros geométricos y los indicadores empleados para comparar las configuraciones del Modelo A. Además del radio de curvatura y la longitud de la punta, se incluyen la eficiencia de impacto, η_i , y la relación de ingreso al puerto de estancamiento, η_{ps} .

La eficiencia de impacto representa la fracción de partículas que impactan sobre la superficie externa del TP respecto al número total de partículas que entran en contacto con el dispositivo. Esta relación se define como

$$\eta_i = \frac{N_{\text{superficie}}}{N_{\text{contacto}}}, \quad (3.1)$$

donde $N_{\text{superficie}}$ es el número de partículas que impactan sobre la superficie externa del TP y N_{contacto} es el número total de partículas que establecen contacto con el dispositivo.

Por otra parte, la relación de ingreso al puerto de estancamiento indica qué fracción del total de partículas que entran en contacto con el TP ingresa al canal interno del puerto de estancamiento. Esta relación se calcula mediante

$$\eta_{ps} = \frac{N_{\text{puerto}}}{N_{\text{contacto}}}, \quad (3.2)$$

donde N_{puerto} es el número de partículas que ingresan al canal del puerto de estancamiento. Ambas relaciones se calculan respecto al mismo número total de partículas que entran en contacto con el TP, lo que permite distinguir entre las partículas que impactan sobre su superficie externa y aquellas que alcanzan el conducto interno.

Para las configuraciones del Modelo A se registraron 17,074 partículas que impactaron sobre la superficie del TP en el caso A1, 16,537 en A2 y 16,941 en A3. La diferencia máxima entre estas configuraciones es aproximadamente del 3.1 %, por lo que las variaciones del radio de curvatura producen cambios relativamente pequeños en el

número total de impactos superficiales.

A pesar de las ligeras diferencias entre las configuraciones, los resultados no muestran una tendencia monotonía asociada con la reducción del radio de curvatura. Esto indica que, dentro del intervalo geométrico evaluado, el radio de la punta ejerce una influencia limitada sobre el número total de partículas que impactan la superficie del TP. Sin embargo, las modificaciones geométricas sí alteran la región de la superficie donde ocurren los impactos, por lo que su efecto principal corresponde a una redistribución espacial de las colisiones.

Tabla 3.3: Comparación de los parámetros geométricos, la eficiencia de impacto y la relación de ingreso al puerto de estancamiento para las configuraciones del Modelo A con punta redondeada.

Configuración	Radio de curvatura R/D	Longitud de punta L_p/D	Eficiencia de impacto η_i	Relación de ingreso al puerto de estancamiento η_{ps}
A1	2.0	1.25	0.73	0.27
A2	1.125	0.83	0.72	0.28
A3	0.75	0.625	0.72	0.28

Los valores de la Tabla 3.3 muestran que la eficiencia de impacto permanece entre 0.72 y 0.73. Esto significa que entre el 72 % y el 73 % de las partículas que entran en contacto con el TP impactan sobre su superficie externa. Por su parte, la relación de ingreso al puerto de estancamiento se encuentra entre 0.27 y 0.28, lo que indica que entre el 27 % y el 28 % de las partículas que establecen contacto con el dispositivo ingresan al canal del puerto.

Las pequeñas diferencias entre A1, A2 y A3 confirman que las modificaciones del radio de curvatura no alteran de manera importante la distribución global de partículas entre la superficie externa y el puerto de estancamiento. No obstante, como se observa posteriormente en los histogramas, estas configuraciones sí modifican la localización de los impactos sobre la punta.

Para analizar la localización de los impactos sobre la superficie del TP, se emplea una coordenada adimensional definida como s/L . El parámetro s representa la distancia medida a lo largo de la superficie analizada, siguiendo el contorno de la geometría desde la punta del sensor hasta el extremo final de la región considerada. La magnitud L corresponde a la longitud total de dicha superficie. De esta manera, un valor de $s/L = 0$ corresponde a la punta frontal del TP, mientras que $s/L = 1$ representa el extremo final de la superficie analizada. Los valores intermedios indican posiciones ubicadas entre ambas regiones. Esta normalización permite comparar directamente la distribución de impactos entre geometrías con diferentes dimensiones e identificar las zonas donde las partículas presentan una mayor tendencia a colisionar con la superficie.

Es importante señalar que durante las simulaciones también se detectaron partículas que ingresaron al puerto de estancamiento del TP. Sin embargo, dichos eventos no fueron considerados en los histogramas de distribución espacial presentados en esta sección. El análisis de frecuencia relativa se realizó únicamente sobre la superficie externa de la punta, ya que su objetivo es evaluar cómo las modificaciones geométricas alteran la localización de los impactos sobre la región frontal expuesta al flujo.

Las partículas que ingresaron al puerto se contabilizaron de manera independiente mediante la relación η_{ps} . Debido a que estos eventos ocurren en una región interna diferente de la superficie utilizada para construir la coordenada adimensional s/L , fueron excluidos de los histogramas. No obstante, su contabilización resulta relevante para evaluar el posible ingreso de partículas y el riesgo de obstrucción del puerto de estancamiento.

La frecuencia relativa utilizada en los histogramas representa la proporción de impactos registrados dentro de cada intervalo de la coordenada adimensional s/L respecto al número total de impactos considerados sobre la superficie externa. Esta magnitud permite comparar la distribución espacial de los impactos independientemente del número absoluto de partículas registrado en cada configuración.

En los histogramas, los valores elevados de frecuencia relativa indican regiones de la superficie donde una mayor proporción de partículas tiende a impactar, mientras que los valores bajos corresponden a zonas donde las colisiones ocurren con menor frecuencia. Por lo tanto, la forma de la distribución permite identificar las regiones preferenciales

de impacto y evaluar cómo las modificaciones geométricas redistribuyen las colisiones sobre la superficie del TP.

A continuación se presentan los histogramas de frecuencia de impacto correspondientes a los diferentes diseños modificados del TP. Estas representaciones permiten analizar cómo se distribuyen las colisiones a lo largo de la superficie de cada geometría e identificar las regiones donde las partículas se concentran con mayor frecuencia. La distribución observada proporciona información sobre la dinámica de las partículas, su relación con el campo de flujo y la influencia de la geometría del sensor.

La distribución de la frecuencia de impacto en función de la posición adimensional s/L , junto con su respectiva representación espacial, se presenta para las configuraciones A1, A2 y A3 en las Figuras 3.5 a 3.10. Estas figuras muestran cómo se distribuyen las colisiones a lo largo de la superficie frontal del TP, desde la región cercana a la punta hacia las zonas laterales.

En las configuraciones con punta redondeada, la distribución de impactos presenta su mayor frecuencia en la región frontal de la geometría y disminuye gradualmente conforme aumenta la posición adimensional s/L . Esto indica que una parte importante de las partículas colisiona al aproximarse a la zona frontal, mientras que la frecuencia de impactos decrece hacia las regiones laterales debido a la desviación de las trayectorias por efecto del flujo alrededor de la superficie.

Las tres configuraciones presentan una reducción de la frecuencia de impacto conforme aumenta la distancia sobre la superficie, pero difieren en la forma de su distribución. La configuración A1 concentra una mayor proporción de impactos en la zona frontal; A2 los distribuye de manera ligeramente más uniforme; y A3 reduce el máximo inicial y distribuye los impactos sobre una región más amplia. Estos resultados sugieren que las modificaciones geométricas no alteran significativamente el número total de partículas que impactan, pero sí influyen en su localización sobre la superficie del sensor.

Para la configuración A1, mostrada en la Figura 3.5, la distribución presenta un máximo pronunciado en los valores más bajos de s/L , seguido de una disminución rápida de la frecuencia de impactos conforme aumenta la distancia sobre la superficie. Esto indica que una fracción importante de las partículas colisiona en una región

muy próxima a la punta del sensor, mientras que la cantidad de impactos en las zonas posteriores es considerablemente menor. Por lo tanto, los impactos se encuentran altamente concentrados en la región frontal, lo que produce una distribución espacial poco uniforme.

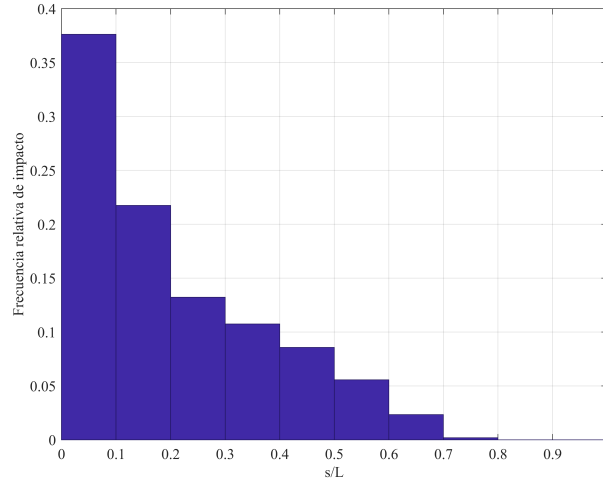


Figura 3.5: Histograma de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración A1.

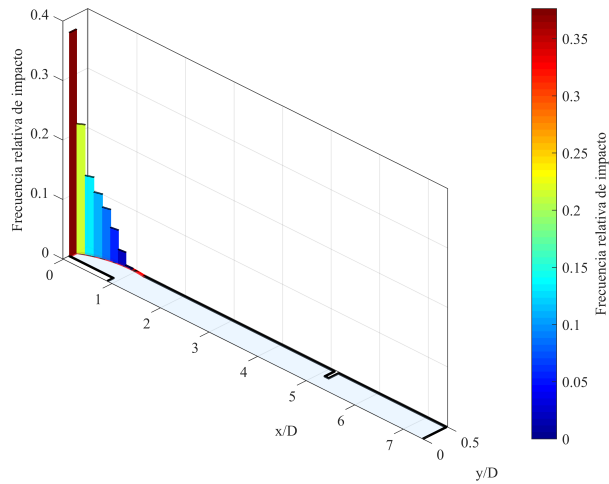


Figura 3.6: Representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración A1.

Para la configuración A2, mostrada en la Figura 3.7, la distribución conserva la tendencia observada en A1, con una mayor frecuencia de impactos en la región frontal y una disminución progresiva conforme aumenta s/L . Sin embargo, el máximo inicial es menos pronunciado y la frecuencia se distribuye de manera más uniforme a lo largo

de la superficie. Esto indica que, aunque la punta sigue recibiendo una proporción importante de las partículas, una mayor cantidad de impactos se distribuye hacia la zona intermedia, reduciendo la concentración en la región frontal.

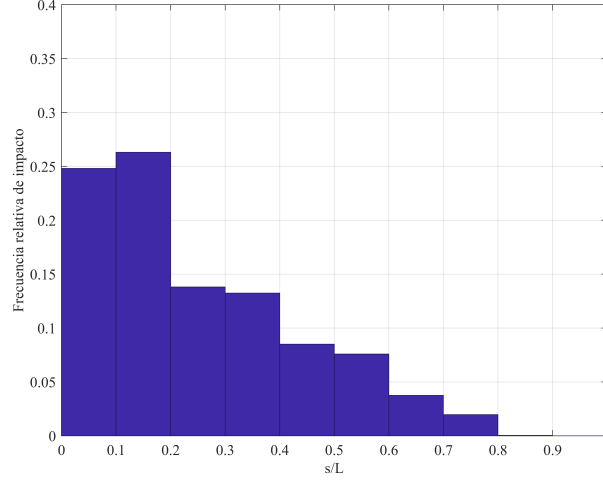


Figura 3.7: Histograma de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración A2.

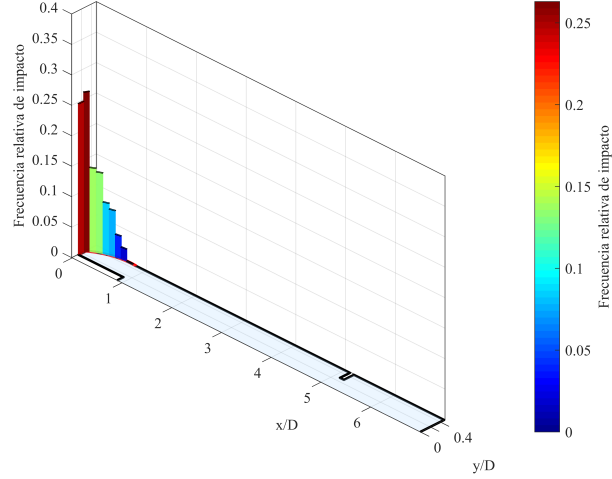


Figura 3.8: Representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración A2.

En la configuración A3, mostrada en la Figura 3.9, la distribución presenta el comportamiento más uniforme de los tres casos analizados. La frecuencia máxima ya no se concentra exclusivamente en la vecindad inmediata de la punta, sino que se distribuye sobre un intervalo más amplio de s/L . Aunque la frecuencia de impactos sigue disminuyendo hacia las regiones laterales, la reducción es más gradual que en A1

y A2. Esto muestra que los impactos superficiales se redistribuyen sobre una región más extensa, reduciendo su concentración en la parte frontal.

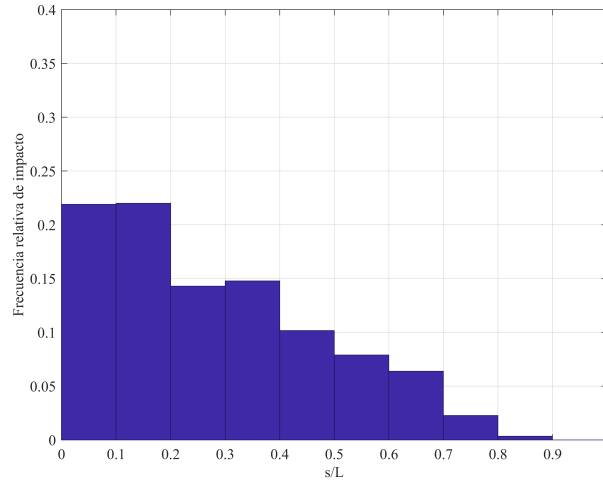


Figura 3.9: Histograma de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración A3.

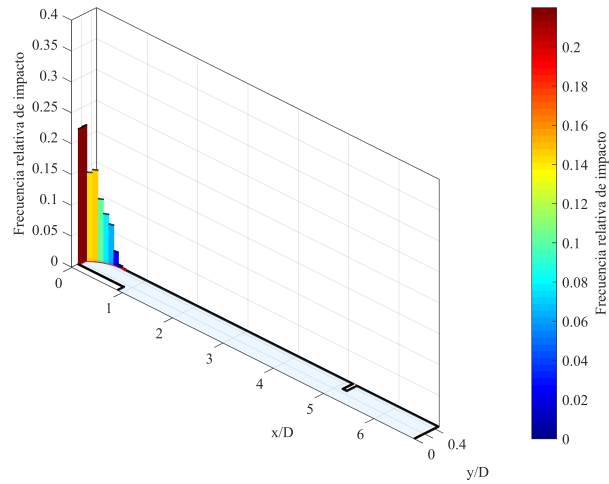


Figura 3.10: Representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración A3.

La transición entre las configuraciones A1, A2 y A3 muestra que los impactos pasan gradualmente de una concentración predominante en la parte frontal a una distribución más uniforme sobre la superficie analizada. La configuración A1 acumula una mayor proporción de partículas en valores bajos de s/L , mientras que A3 presenta la distribución más homogénea. Estos resultados indican que los cambios geométricos influyen principalmente en la localización de los impactos, mientras que el número total

de partículas que impacta la superficie se mantiene relativamente próximo entre las tres configuraciones.

La Tabla 3.4 presenta los parámetros geométricos y los indicadores correspondientes a las configuraciones del Modelo B. Al igual que para el Modelo A, se incluyen la eficiencia de impacto y la relación de ingreso al puerto de estancamiento, con el propósito de evaluar cómo la modificación del ángulo de inclinación influye tanto en los impactos superficiales como en el ingreso de partículas al canal interno.

Para las configuraciones del Modelo B se registraron 16,071 partículas que impactaron sobre la superficie externa del TP en B1, 16,581 en B2 y 17,408 en B3. Estos valores muestran una tendencia creciente conforme aumenta el ángulo de inclinación. La diferencia entre B1 y B3 es aproximadamente del 8.3 %, por lo que las configuraciones del Modelo B presentan una mayor sensibilidad a los cambios geométricos que las configuraciones del Modelo A.

Tabla 3.4: Comparación de los parámetros geométricos, la eficiencia de impacto y la relación de ingreso al puerto de estancamiento para las configuraciones del Modelo B con superficie inclinada.

Configuración	Ángulo de inclinación θ	Longitud de punta L_p/D	Eficiencia de impacto η_i	Relación de ingreso al puerto de estancamiento η_{ps}
B1	12°	1.53	0.71	0.29
B2	20°	0.89	0.72	0.28
B3	35°	0.56	0.73	0.27

Los valores de eficiencia de impacto muestran una tendencia creciente conforme aumenta el ángulo de inclinación de la superficie frontal. La configuración B1 presenta la menor eficiencia de impacto, con $\eta_i = 0.71$, lo que indica que el 71 % de las partículas que entran en contacto con el TP impactan sobre su superficie externa. En B2 esta proporción aumenta a 0.72, mientras que B3 alcanza un valor de 0.73, consistente con el mayor número de impactos superficiales registrado.

La relación de ingreso al puerto de estancamiento presenta la tendencia opuesta. La configuración B1 alcanza el mayor valor, con $\eta_{ps} = 0.29$, mientras que B2 y B3 presentan valores de 0.28 y 0.27, respectivamente. Esto indica que B1 reduce el número de impactos sobre la superficie externa, pero permite que una fracción ligeramente mayor de las partículas que entran en contacto con el TP alcance el canal del puerto de estancamiento.

En consecuencia, la evaluación de las configuraciones no debe basarse únicamente en el número de impactos externos. Una geometría que reduzca la cantidad de partículas que impactan sobre la superficie puede incrementar simultáneamente la proporción que ingresa al puerto. Por ello, la eficiencia de impacto y la relación de ingreso deben analizarse de manera conjunta al seleccionar la configuración más adecuada.

Cabe destacar que la desviación porcentual observada entre las configuraciones del Modelo B es mayor que la registrada entre las variantes del Modelo A. Esto indica que las modificaciones geométricas introducidas en los diseños con superficie inclinada tienen un efecto más significativo sobre la respuesta de las partículas y muestran una mayor sensibilidad a los cambios geométricos.

En cuanto a los histogramas, los diseños con superficies inclinadas presentan un comportamiento diferente. Estos muestran una distribución más uniforme de impactos a lo largo de la cara inclinada, sin una concentración tan pronunciada en una región específica para las configuraciones de menor ángulo. Este resultado es consistente con el elevado número de Stokes considerado en las simulaciones, ya que las partículas están dominadas principalmente por su inercia. En consecuencia, una proporción importante de partículas impacta directamente sobre la superficie inclinada en lugar de seguir las líneas de corriente alrededor de la geometría.

En el diseño B1, la punta más aguda favorece una desviación más gradual del flujo antes de que este entre en contacto directo con la superficie. En cambio, al aumentar el ángulo de inclinación, especialmente en B3, las partículas encuentran una superficie más expuesta al flujo incidente, lo que favorece una mayor concentración de impactos en la región frontal.

La distribución de la frecuencia de impacto para las configuraciones B1, B2 y B3 se presenta en las Figuras 3.11 a 3.16. A diferencia de las configuraciones con

punta redondeada, los histogramas del Modelo B muestran cambios más notorios en la localización de los impactos conforme se modifica la inclinación de la superficie frontal. Mientras que algunas configuraciones presentan una distribución relativamente uniforme sobre la superficie analizada, otras concentran una proporción importante de los impactos en la región cercana a la punta. Esto indica una mayor influencia de la geometría frontal sobre la distribución espacial de las partículas.

Para la configuración B1, mostrada en la Figura 3.11, la frecuencia de impactos se distribuye de manera relativamente uniforme a lo largo de la superficie analizada. No se observa una concentración dominante en una región específica, lo que indica que las partículas impactan sobre una zona amplia de la geometría.

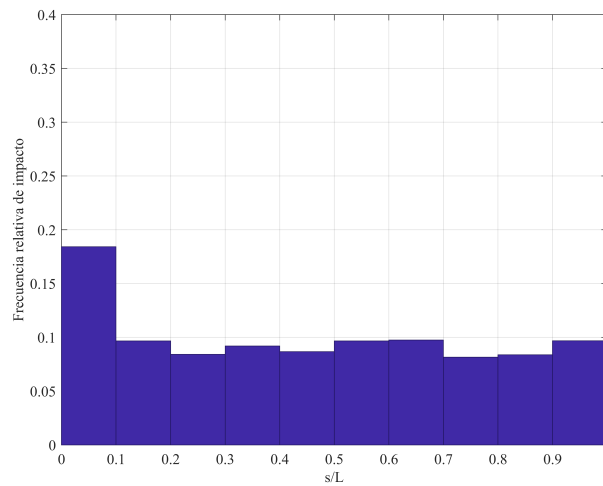


Figura 3.11: Histograma de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración B1.

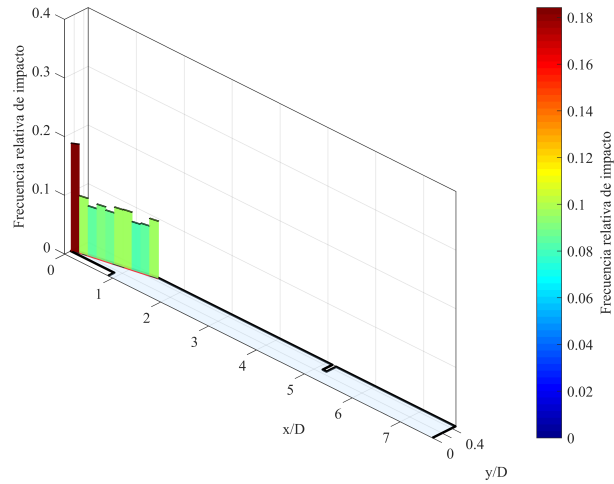


Figura 3.12: Representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración B1.

En la configuración B2, mostrada en la Figura 3.13, se observa un aumento de la frecuencia de impactos cerca de la punta. Aunque los impactos siguen distribuyéndose sobre toda la superficie, comienza a apreciarse una mayor concentración en los primeros valores de s/L , mostrando una tendencia hacia una distribución menos uniforme que la observada en B1.

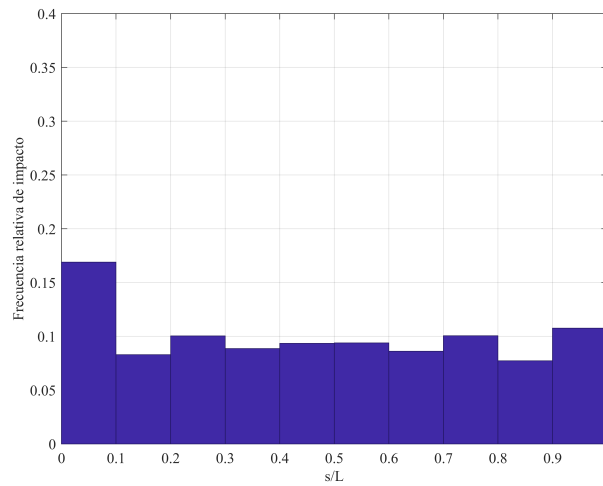


Figura 3.13: Histograma de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración B2.

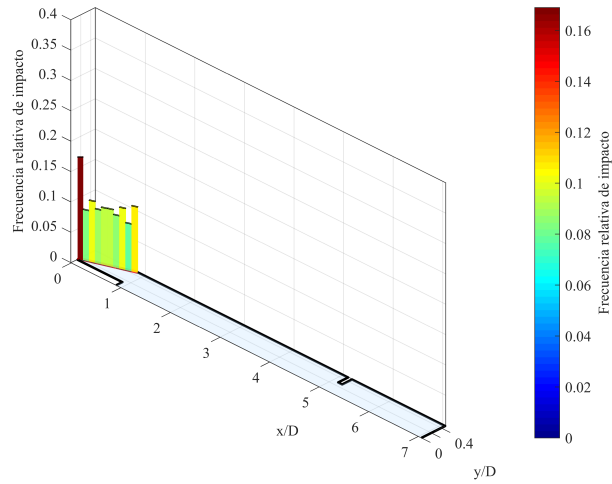


Figura 3.14: Representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración B2.

La configuración B3, mostrada en la Figura 3.15, presenta la mayor concentración de impactos en la región frontal. La frecuencia alcanza su valor máximo en los primeros intervalos de s/L y disminuye gradualmente conforme aumenta la distancia sobre la superficie. Esto indica que una parte importante de las partículas impacta cerca de la punta, mientras que una menor proporción alcanza las regiones posteriores.

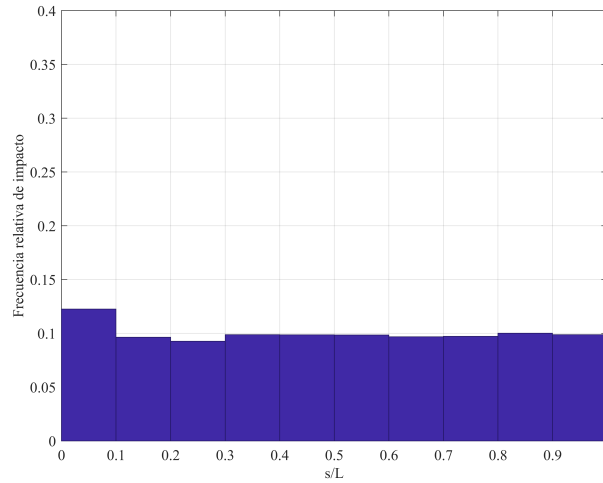


Figura 3.15: Histograma de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración B3.

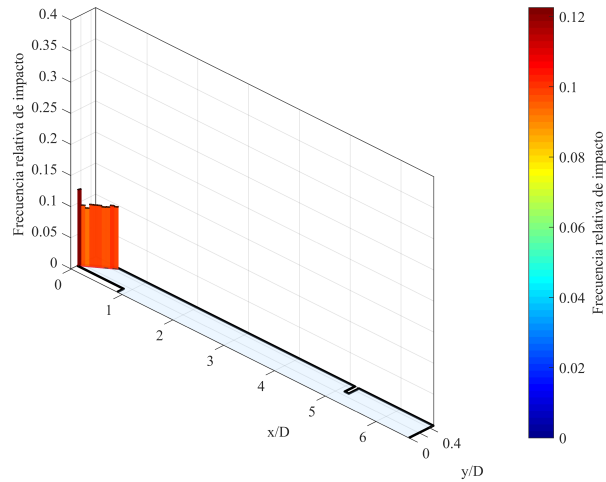


Figura 3.16: Representación espacial de la distribución de impactos de partículas sobre la superficie externa de la punta del TP para la configuración B3.

Al comparar las tres configuraciones, se observa una transición desde una distribución relativamente uniforme en B1 hacia una concentración progresivamente mayor de impactos en la región frontal en B2 y B3. Esto muestra que las modificaciones geométricas del Modelo B influyen de manera importante en la ubicación de los impactos sobre la superficie, efecto que resulta más evidente que el observado en las configuraciones del Modelo A.

En conjunto, los histogramas y los indicadores de las Tablas 3.3 y 3.4 muestran que ambas estrategias geométricas modifican la distribución de las partículas respecto al diseño convencional. Sin embargo, la evaluación de cada configuración debe considerar tanto la redistribución de los impactos externos como la proporción de partículas que ingresa al puerto de estancamiento. Una reducción de la eficiencia de impacto no necesariamente representa una mejora global si se acompaña de un aumento en la relación de ingreso al canal interno del TP.

Resumen del capítulo

Se analizaron seis propuestas de diseño, agrupadas en dos configuraciones denominadas Modelo A y Modelo B. El Modelo A correspondió a variaciones en el radio de curvatura de la punta, mientras que el Modelo B consideró modificaciones en el ángulo de inclinación de la superficie frontal.

Mediante el análisis de la distribución de la frecuencia relativa de impacto en función de la posición adimensional s/L , se observó que las modificaciones geométricas alteran principalmente la localización de las colisiones sobre la superficie del TP. En las configuraciones del Modelo A, las variaciones del radio de curvatura producen cambios relativamente pequeños en el número total de impactos y en los valores de eficiencia de impacto e ingreso al puerto de estancamiento, aunque modifican la concentración de partículas en la región frontal.

En el Modelo B se identificó una mayor sensibilidad a los cambios geométricos. Conforme aumenta el ángulo de inclinación, se incrementa el número de impactos sobre la superficie externa y se modifica su distribución espacial. La configuración B1 presenta la menor eficiencia de impacto superficial, aunque también muestra la mayor relación de ingreso al puerto de estancamiento, por lo que ambos indicadores deben analizarse de manera conjunta.

En términos generales, los resultados muestran que una reducción de los impactos sobre la superficie externa no necesariamente implica una mejora global del diseño, ya que puede estar acompañada por un incremento en la proporción de partículas que ingresa al canal del puerto de estancamiento. Por ello, la evaluación de las configuraciones debe considerar tanto la distribución espacial de los impactos como la eficiencia de impacto y la relación de ingreso al puerto.

Capítulo 4

Análisis y discusión de resultados

El presente capítulo reúne y analiza los resultados obtenidos de las simulaciones numéricas del flujo alrededor del TP, con el objetivo de evaluar la interacción entre la fase continua y las partículas, así como su efecto sobre la deposición y el comportamiento del flujo. Se examinan los campos de flujo, las trayectorias de las partículas y las zonas de impacto, considerando el efecto de las condiciones de operación. Además, para cada variante geométrica se evalúa el error asociado a la medición de velocidad producido por las modificaciones del diseño. Para ello, se compara la velocidad estimada a partir de las presiones medidas en los puertos del TP con la velocidad real del flujo. A partir de estos resultados, se establece una base de comparación entre el diseño convencional y las configuraciones modificadas propuestas en el Capítulo 3, con el fin de evaluar su desempeño tanto en términos de reducción de impacto como de preservación de la precisión de medición.

4.1. Campos de velocidad alrededor de los diseños modificados del tubo Pitot

En el capítulo 3 se presentaron los resultados sobre la frecuencia de los impactos. A partir de esto, el análisis comparativo se centra en el comportamiento del campo de flujo y de presión en los seis diseños modificados, considerando que los cambios geométricos alteran principalmente dónde se concentran dichos impactos.

En las gráficas mostradas, las variaciones responden a las diferencias en las relaciones radio-diámetro (R/D) y longitud de punta-diámetro (L_p/D). Los valores exactos de estos parámetros, junto con el número de partículas que impactan, se detallan en la tabla 3.2. Dichos valores disminuyen progresivamente en las gráficas, siendo A1 el de mayor magnitud (punta más larga y radio más grande) y el A3 el menor.

En las Figuras 4.1 a 4.6, la escala de colores dentro de las gráficas muestra que el color azul representa las velocidades más bajas. La velocidad se vuelve prácticamente nula, en tono azul intenso, cuando el aire entra en la abertura del TP y se produce el estancamiento del flujo.

Las gráficas de abajo presentan un acercamiento de la zona de la punta, permitiendo ver cómo el aire se divide y fluye alrededor del instrumento, con las líneas de corriente asociadas. Al analizar el comportamiento del flujo y los contornos de velocidad normalizada, se observa la desaceleración del aire en la parte frontal del cuerpo y que la estructura del flujo se representa adecuadamente.

El número de Stokes considerado para todos los casos fue de 25.7, mientras que el Re fue de 81000.

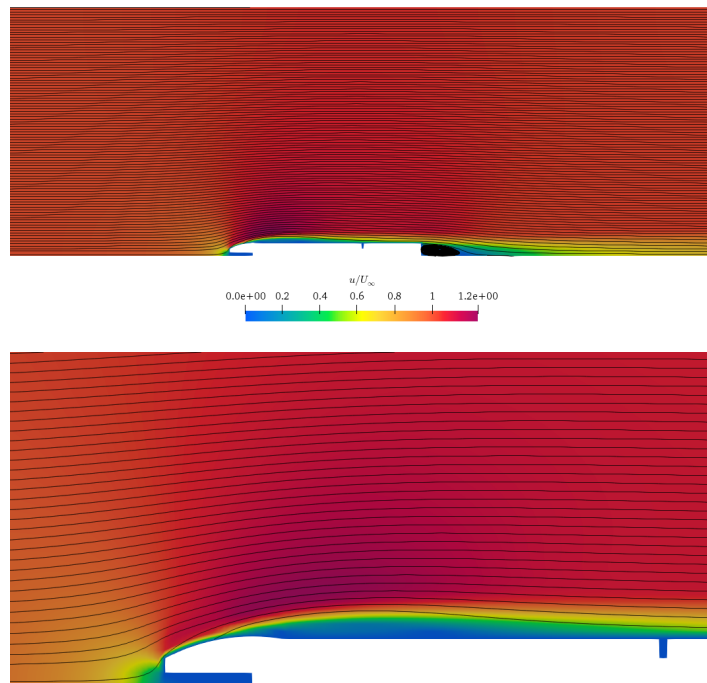


Figura 4.1: Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para A1 (Re=81000, St=25.7).

En los diseños A1 a A3 (Figuras 4.1 a 4.3) se observa una diferencia importante en la región de recirculación formada sobre la superficie superior del tubo Pitot. Esta zona, identificada por la región azul cercana a la punta, disminuye gradualmente conforme la geometría de la punta se vuelve más roma o achatada.

En el diseño A1, la punta más aguda favorece la formación de una región de recirculación más amplia, lo que genera una mayor desviación del flujo antes de que este entre en contacto directo con la superficie. En cambio, en los diseños posteriores, especialmente en A3, esta región se reduce considerablemente, permitiendo que el flujo incidente impacte de manera más directa sobre una mayor área del cuerpo.

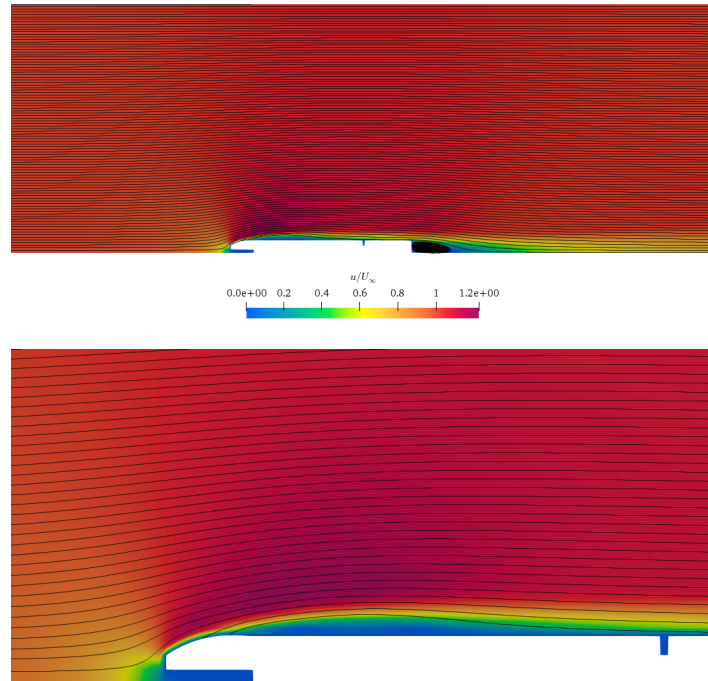


Figura 4.2: Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para A2 ($Re=81000$, $St=25.7$)

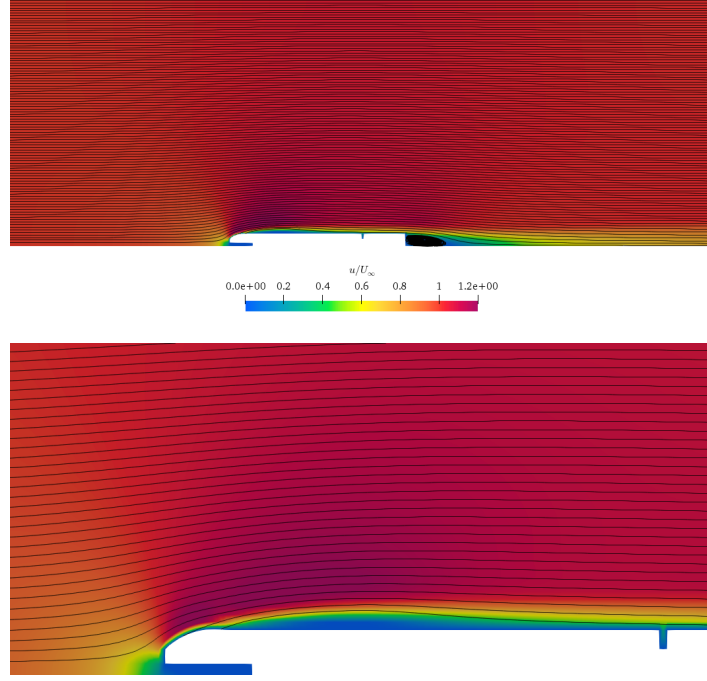


Figura 4.3: Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para A3 ($Re=81000$, $St=25.7$).

En este segundo conjunto de diseños (Figuras 4.4 a 4.6), caracterizados por una punta cónica definida mediante una generatriz recta y distintos ángulos de inclinación, el comportamiento del flujo es diferente al observado en las geometrías redondeadas. A diferencia de las configuraciones con curvatura continua, la superficie cónica frontal produce una desviación más gradual de las líneas de corriente, por lo que el flujo tiende a adaptarse de forma más directa a la geometría del cuerpo.

En los casos con punta redondeada, la curvatura genera una desviación gradual de las líneas de corriente y zonas de recirculación más evidentes. Sin embargo, en las configuraciones de punta inclinada, el flujo permanece más adherido a la superficie y sigue con mayor cercanía la inclinación del ángulo.

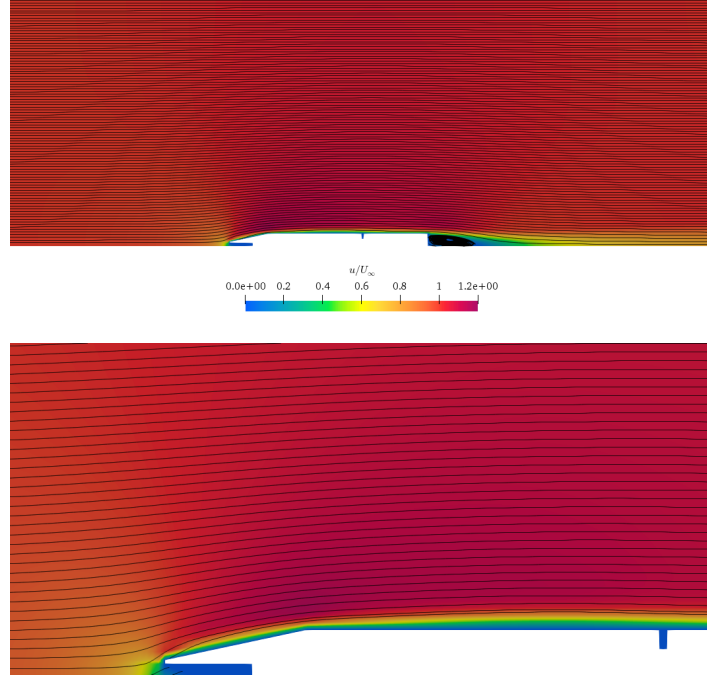


Figura 4.4: Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para B1 ($Re=81000$, $St=25.7$).

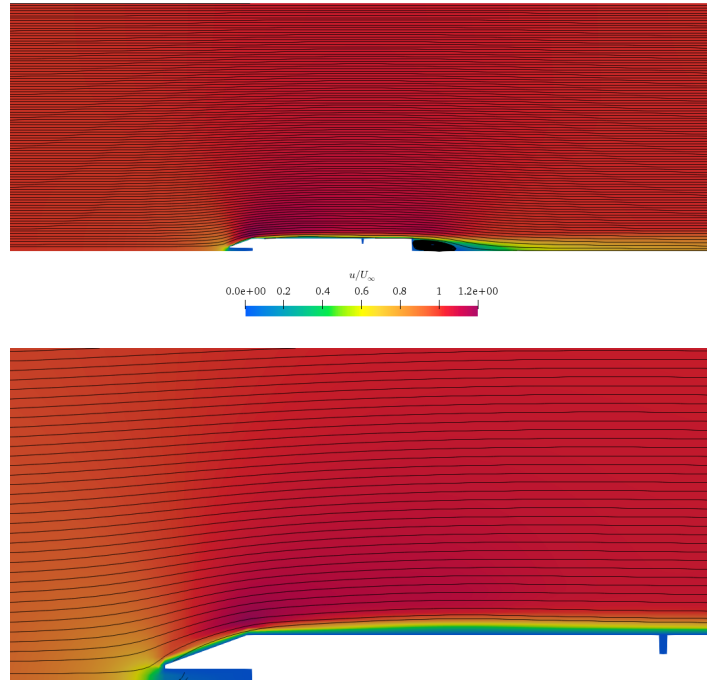


Figura 4.5: Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para B2 ($Re=81000$, $St=25.7$).

Debido a la inercia de las partículas analizadas, estas no logran seguir completamente las líneas de corriente, especialmente cuando el ángulo de la punta es más abierto. Como

consecuencia, las trayectorias de las partículas se separan del comportamiento del flujo y aumentan las probabilidades de impacto sobre la superficie. Este efecto es más notable en el caso B3, donde el ángulo más abierto favorece el mayor número de colisiones de partículas.

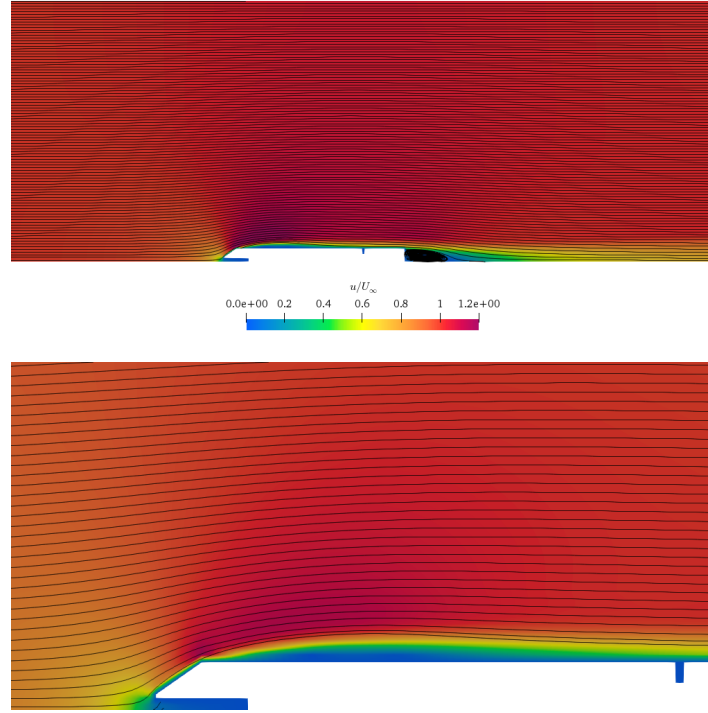


Figura 4.6: Contornos de la magnitud de velocidad normalizada (u/U) con líneas de corriente superpuestas para B3 ($Re=81000$, $St=25.7$).

4.2. Campos de presión alrededor de los diseños modificados del tubo Pitot

Las Figuras 4.7 a 4.12 presentan los contornos de presión normalizada P/P_∞ alrededor de los diferentes diseños del TP. El análisis de estos campos de presión permite identificar cómo la geometría modifica la distribución de presiones en la región frontal del cuerpo, especialmente en las zonas de impacto directo del flujo y en las regiones donde se generan gradientes de presión más pronunciados.

Además, el comportamiento de la presión está relacionado con la desviación de las líneas de corriente y con la trayectoria de las partículas, por lo que este análisis ayuda a comprender las diferencias observadas en la acumulación e impacto de partículas entre

los distintos casos.

En las figuras presentadas, la presión se muestra en forma adimensional. Para ello, los valores de presión fueron normalizados utilizando como referencia la presión promedio del flujo alejado del tubo, cuyo valor es aproximadamente 0.132 kPa. De esta manera, los resultados representan la variación relativa de la presión alrededor de la geometría y facilitan la comparación entre las diferentes configuraciones.

En los casos tipo A, correspondientes a las puntas redondeadas, la distribución de presión presenta un comportamiento gradual a lo largo de la curvatura. Las mayores presiones se presentan en la región frontal de la punta, donde el flujo se desacelera al aproximarse a la superficie. Esta misma zona coincide con la región donde los histogramas muestran la mayor frecuencia de impactos de partículas. Conforme se avanza sobre la curvatura, la presión disminuye y las líneas de corriente comienzan a rodear la geometría, reduciendo la probabilidad de que las partículas choquen directamente contra la superficie. Como resultado, la frecuencia de impactos disminuye gradualmente hacia las regiones laterales.

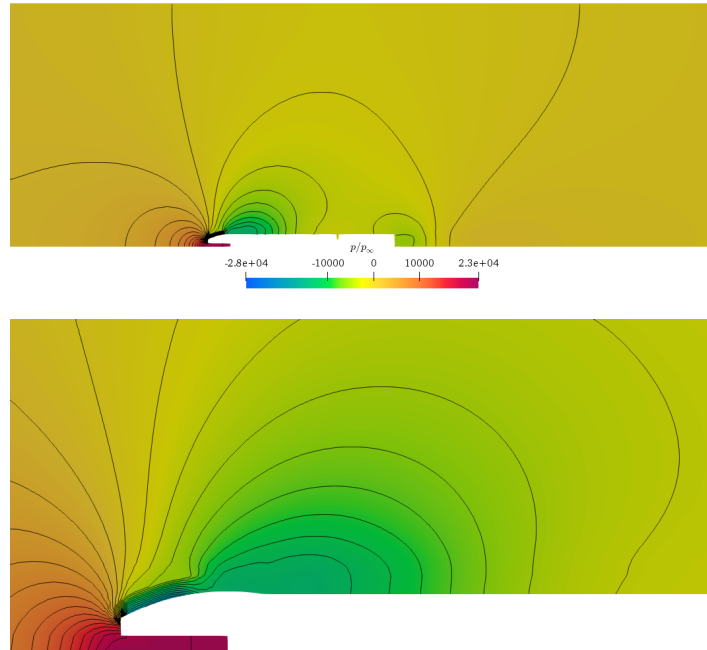


Figura 4.7: Contornos de la magnitud de presión normalizada (p/P_∞) para A1 (Re=81000, St=25.7).

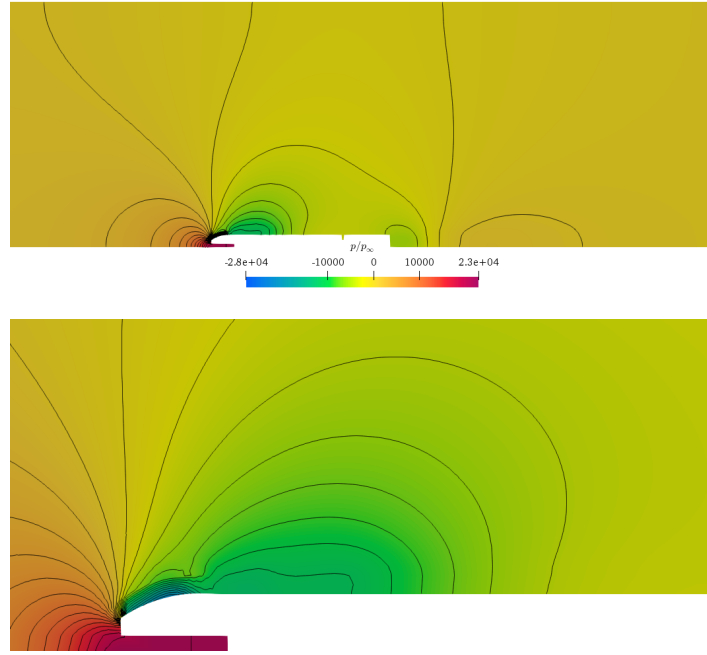


Figura 4.8: Contornos de la magnitud de presión normalizada (p/P_∞) para A2 (Re=81000, St=25.7).

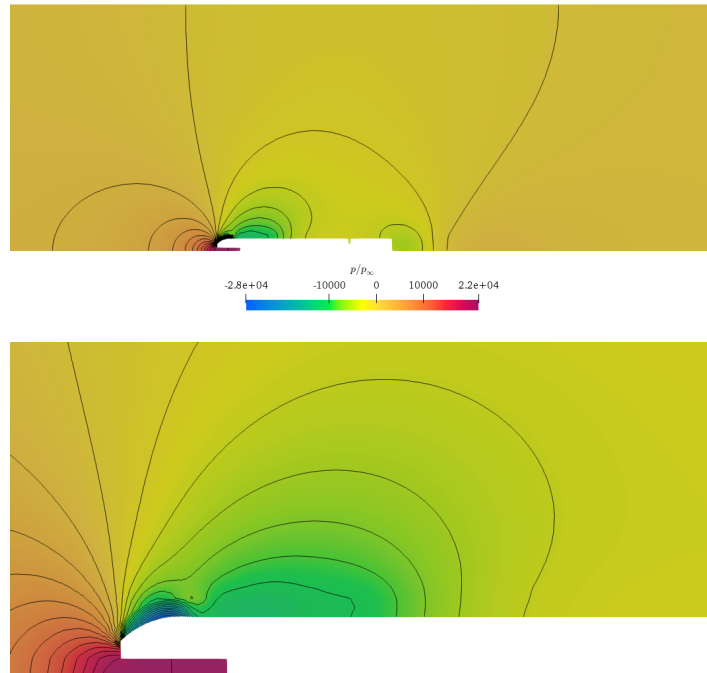


Figura 4.9: Contornos de la magnitud de presión normalizada (p/P_∞) para A3 (Re=81000, St=25.7).

Esta observación coincide con los histogramas de acumulación de partículas presentados anteriormente. En las geometrías redondeadas, la mayor concentración de impactos

ocurre cerca de la punta, mientras que la acumulación disminuye conforme aumenta la distancia sobre la superficie. Esto sugiere que una parte de las partículas logra seguir el movimiento del flujo y rodear parcialmente la geometría sin impactar. Por lo tanto, la distribución de impactos observada puede explicarse por la presencia de una región frontal de estancamiento y por la desviación progresiva de las líneas de corriente a lo largo de la curvatura.

Para los casos tipo B (Figuras 4.10 a 4.12) la distribución de presión muestra un comportamiento diferente al observado en las geometrías redondeadas. Las zonas de alta presión se identifican por las regiones rojas y por la concentración de líneas de contorno de presión.

En estas configuraciones con punta cónica se observan diferencias importantes en la distribución del campo de presión sobre la superficie frontal. En el modelo B1, que previamente mostró la menor dispersión de partículas, la región de baja presión se extiende de manera más uniforme a lo largo de la superficie cónica frontal. Esta distribución sugiere una transición más gradual del flujo sobre la geometría.

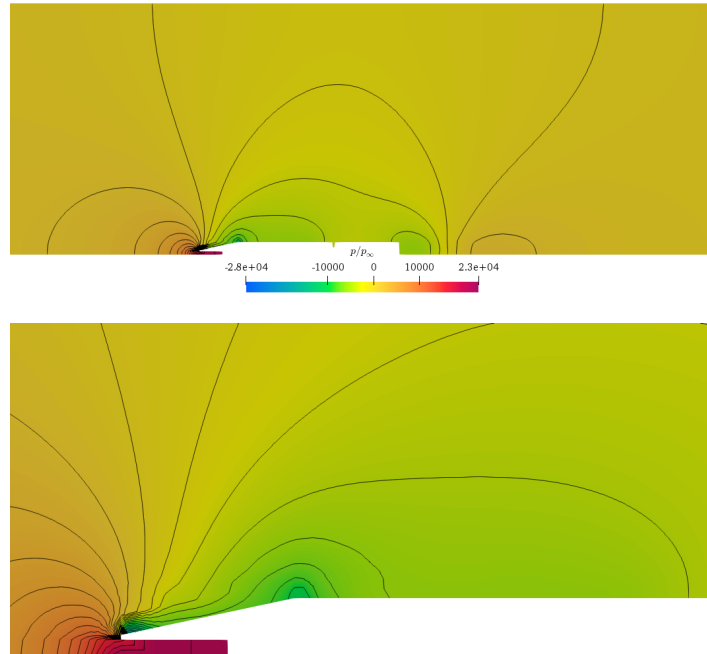


Figura 4.10: Contornos de la magnitud de presión normalizada (p/P_∞) para B1 ($Re=81000$, $St=25.7$).

Conforme aumenta la inclinación de la punta en las configuraciones B2 y B3, la

distribución de presión comienza a modificarse.

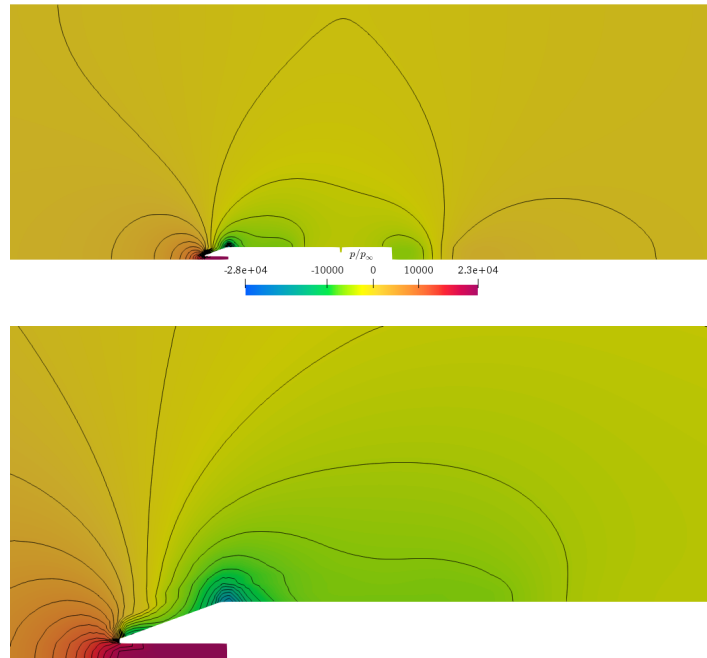


Figura 4.11: Contornos de la magnitud de presión normalizada (p/P_∞) para B2 (Re=81000, St=25.7).

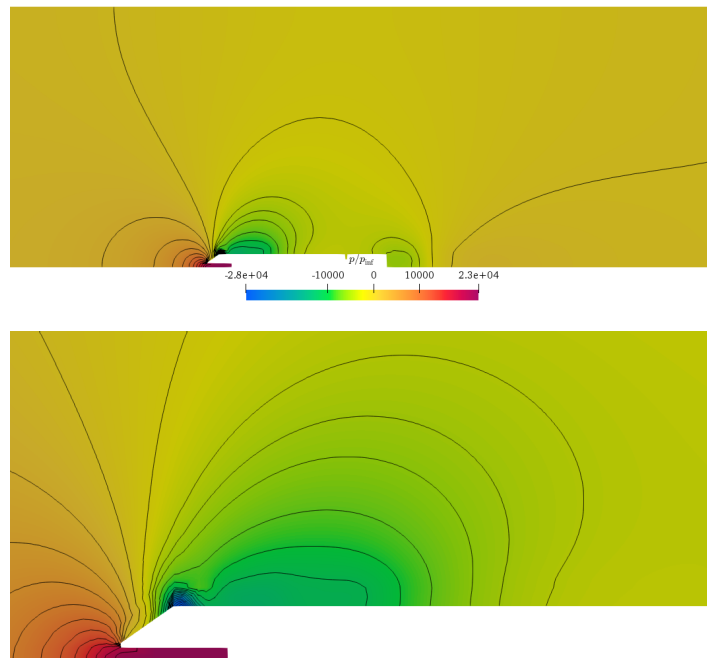


Figura 4.12: Contornos de la magnitud de presión normalizada (p/P_∞) para B3 (Re=81000, St=25.7).

En el modelo B3 se identifica una región con cambio de presión localizada entre

la punta y el cambio de sección de la pared inclinada. Esta acumulación indica una interacción más intensa entre el flujo y la superficie en esa zona, generando un campo de presión menos uniforme que el observado en B1.

En las configuraciones con mayor inclinación, estas zonas de baja presión se desplazan hacia la parte frontal de la geometría, modificando la forma en que las partículas interactúan con la superficie.

Estos resultados muestran una correspondencia con los patrones de impacto observados previamente. Mientras que B1 presenta una distribución de presión más uniforme sobre la punta, las configuraciones B2 y B3 desarrollan regiones localizadas de mayor presión que favorecen una concentración más elevada de impactos en determinadas zonas de la superficie. Esto sugiere que las modificaciones geométricas no sólo alteran la magnitud de la presión local, sino también la distribución espacial de las trayectorias de las partículas y, en consecuencia, los patrones de acumulación observados.

4.3. Comparación entre el diseño convencional y las configuraciones modificadas propuestas

Tabla 4.1: Comparación con las configuraciones evaluadas

Configuración	Variación porcentual de impactos respecto al diseño original (%)	Error relativo en la medición de velocidad (%)
A1	+3.92	1.13
A2	+1.81	1.03
A3	+3.01	0.92
B1	-2.41	0.59
B2	+0.90	3.45
B3	+7.30	3.57

La comparación presentada en la Tabla 4.1 permite evaluar las configuraciones modificadas mediante dos criterios principales: la variación porcentual del número total de impactos respecto al diseño original y el error relativo introducido en la medición de velocidad.

La velocidad correspondiente a cada configuración fue obtenida a partir de la diferencia entre la presión total y la presión estática empleando la ecuación del TP presentada en el Capítulo 1 (Ec. 1.1). Para cada geometría se utilizaron las presiones obtenidas mediante la simulación numérica para calcular la velocidad indicada por el TP y posteriormente compararla con la velocidad obtenida para la geometría convencional.

El error relativo asociado a la medición de velocidad se calculó mediante la siguiente expresión:

$$\varepsilon_r = \left| \frac{V_{\text{mod}} - V_{\text{ref}}}{V_{\text{ref}}} \right| \times 100 \quad (4.1)$$

donde V_{mod} representa la velocidad calculada para cada una de las configuraciones modificadas del TP y V_{ref} corresponde a la velocidad obtenida para el TP convencional. De esta manera, el error relativo cuantifica la desviación porcentual introducida por cada modificación geométrica respecto al diseño de referencia.

En términos de impactos totales, la configuración B1 es la única que presenta una reducción respecto al diseño convencional, mientras que B3 muestra el mayor aumento. Las variantes del Modelo A y la configuración B2 permanecen próximas al comportamiento del diseño original, sin indicar una mejora significativa en la cantidad global de impactos.

En relación con el error de medición de velocidad, B1 también presenta el menor valor entre las configuraciones evaluadas, lo que indica que esta modificación afecta en menor medida la estimación de velocidad obtenida mediante el TP. Por el contrario, B3 presenta el mayor error relativo, seguido de cerca por B2, lo que sugiere que estas variantes alteran de manera más significativa la distribución de presión empleada para la determinación de la velocidad.

Los resultados obtenidos muestran que las modificaciones geométricas propuestas redistribuyen la localización de los impactos sin producir variaciones significativas en

el error de medición respecto a la configuración original. Esto indica que los cambios introducidos en la región frontal modifican principalmente las trayectorias de las partículas, manteniendo prácticamente inalterado el comportamiento aerodinámico responsable de la generación de la presión de estancamiento utilizada para la estimación de la velocidad del flujo.

Además de los valores globales mostrados en la tabla, las figuras anteriores indican que las modificaciones geométricas afectan de forma importante la distribución espacial de los impactos sobre la punta del TP. Aunque algunas variantes no modifican de manera considerable la cantidad total de partículas retenidas, sí alteran la localización e intensidad de las zonas de mayor impacto. Este aspecto es relevante porque una configuración puede no reducir sustancialmente el número total de impactos, pero aun así desplazar la deposición hacia regiones menos críticas del sensor.

De forma general, los resultados indican que B1 es la configuración más prometedora, ya que combina la menor retención de partículas con el menor error de medición. Las variantes del Modelo A, aunque no reducen la cantidad total de impactos, mantienen errores relativamente bajos y pueden considerarse aceptables desde el punto de vista de la precisión de la medición. En cambio, B2 y, especialmente, B3 no resultan favorables, debido al mayor error introducido en la medición de velocidad y, en el caso de B3, al incremento más pronunciado del número de impactos.

Debe señalarse que el presente estudio se desarrolló para una condición representativa de velocidad de crucero. Aunque los resultados obtenidos muestran un comportamiento consistente para dicha condición de operación, el efecto de las modificaciones geométricas sobre el error de medición a diferentes velocidades constituye una línea de investigación futura que permitirá evaluar la robustez de las configuraciones propuestas bajo un rango más amplio de condiciones de operación.

4.4. Comparación entre la proyección geométrica y la distribución de impactos obtenida mediante CFD

Con el propósito de evaluar el efecto del campo de flujo sobre las trayectorias de las partículas, se comparó la distribución geométrica esperada de impactos con la distribución obtenida mediante las simulaciones CFD. La proyección geométrica representa la localización de impactos que se obtendría si las partículas mantuvieran una trayectoria rectilínea hasta intersectar la superficie del tubo Pitot, mientras que la simulación considera la modificación de dichas trayectorias debido a la interacción con el flujo alrededor del cuerpo.

La comparación entre ambas distribuciones permite identificar las regiones donde el flujo desvía las partículas antes de alcanzar la superficie y evaluar el efecto de cada modificación geométrica sobre la redistribución espacial de los impactos. Como resultado, en la mayoría de casos de simulación se observa menos impactos en la región más cercana a la punta y un incremento relativo en posiciones intermedias de la superficie. Esto indica que el flujo modifica la localización de los impactos sin alterar significativamente su tendencia general, redistribuyendo las partículas hacia regiones más alejadas del punto de estancamiento. Si el movimiento de las partículas estuviera gobernado únicamente por la geometría, ambas distribuciones serían prácticamente idénticas. Las diferencias observadas indican que el modelo reproduce la influencia del campo de flujo sobre las trayectorias de las partículas.

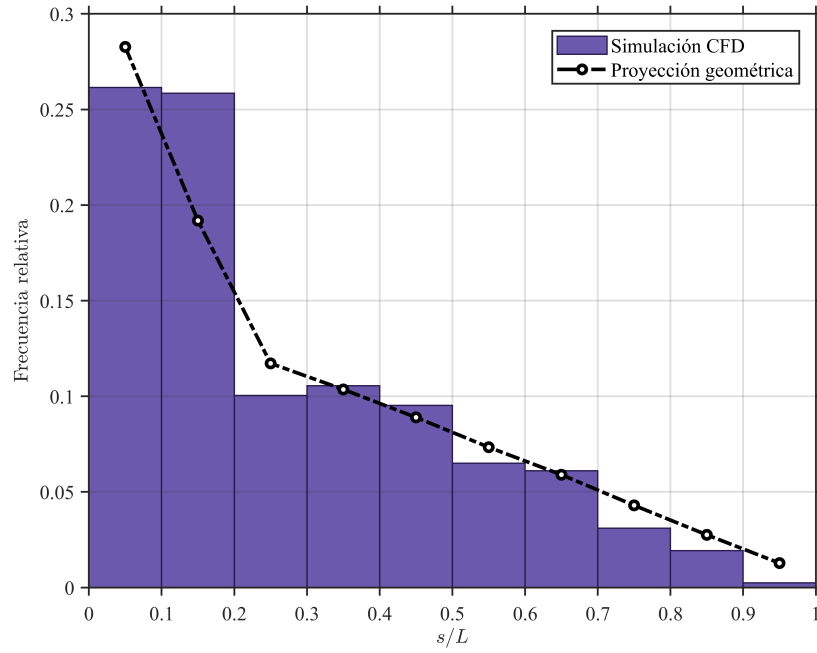


Figura 4.13: Comparación entre la distribución de impactos obtenida mediante simulación CFD y la proyección geométrica para la configuración A1, representadas en un solo gráfico.

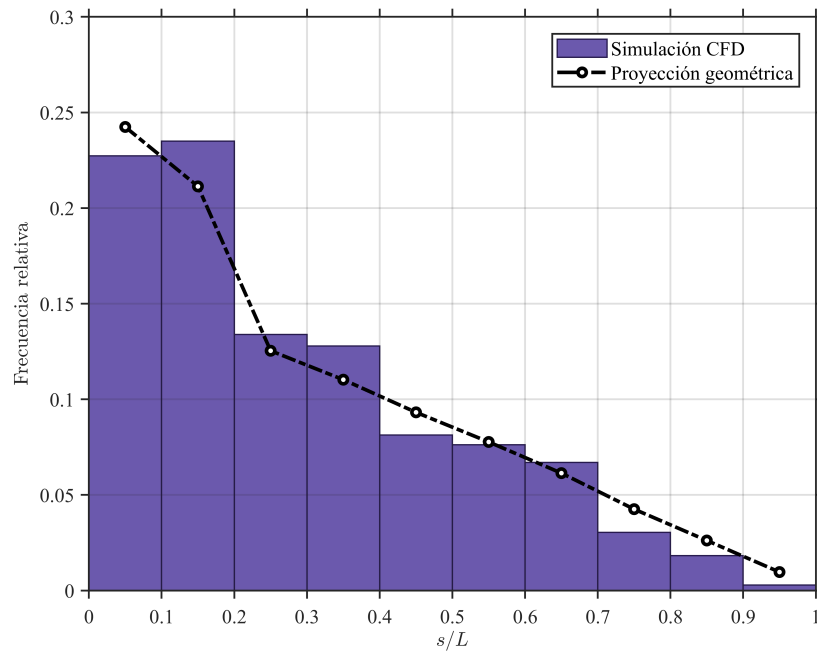


Figura 4.14: Comparación entre la distribución de impactos obtenida mediante simulación CFD y la proyección geométrica para la configuración A2, representadas en un solo gráfico.

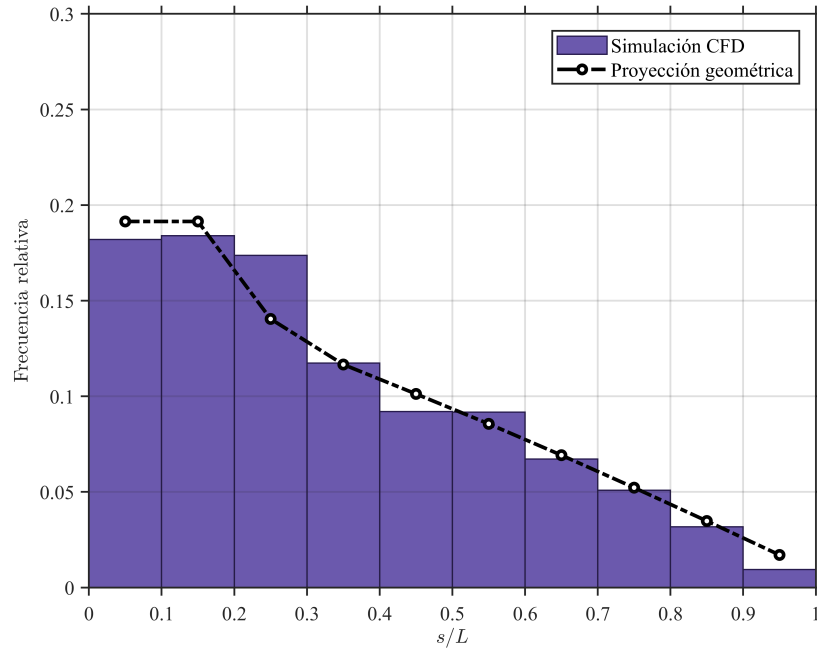


Figura 4.15: Comparación entre la distribución de impactos obtenida mediante simulación CFD y la proyección geométrica para la configuración A3, representadas en un solo gráfico.

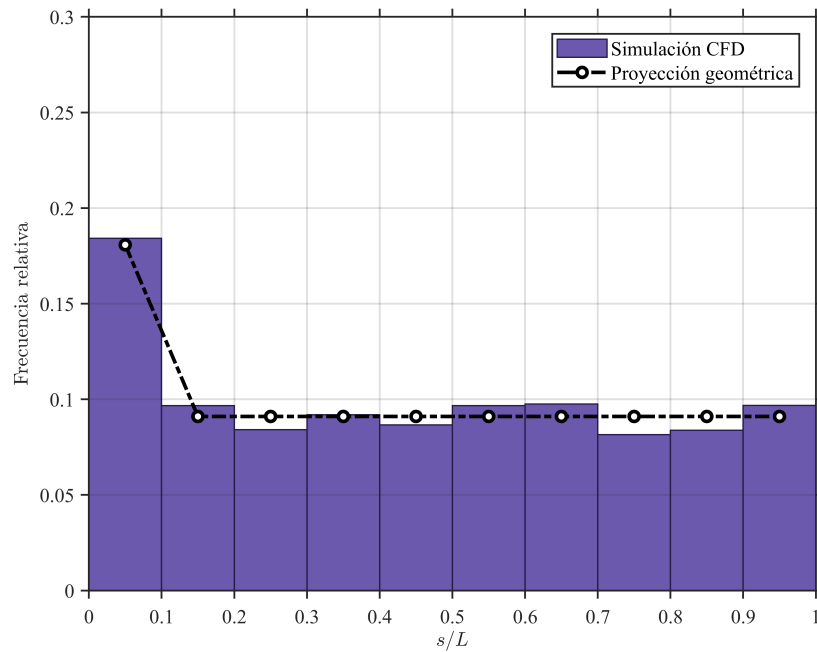


Figura 4.16: Comparación entre la distribución de impactos obtenida mediante simulación CFD y la proyección geométrica para la configuración B1, representadas en un solo gráfico.

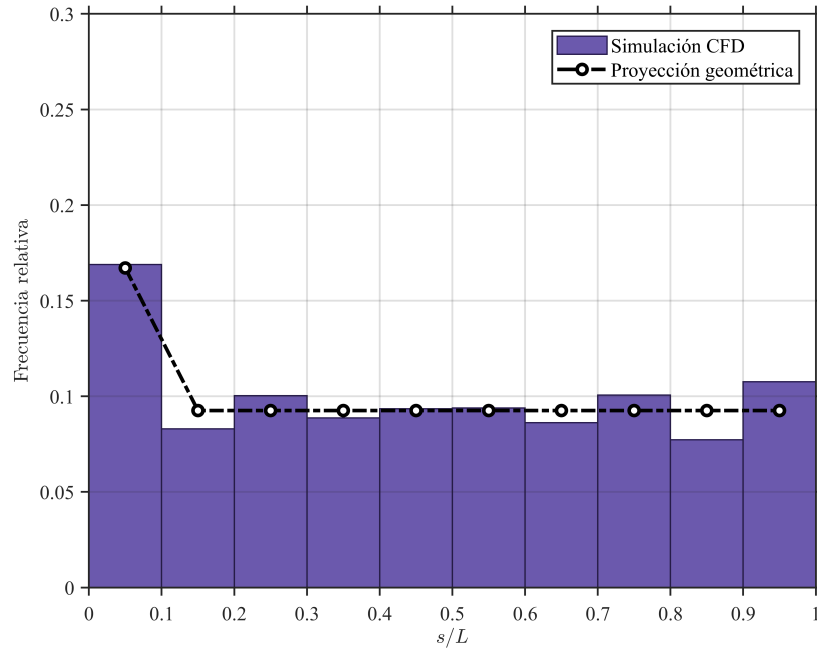


Figura 4.17: Comparación entre la distribución de impactos obtenida mediante simulación CFD y la proyección geométrica para la configuración B2, representadas en un solo gráfico.

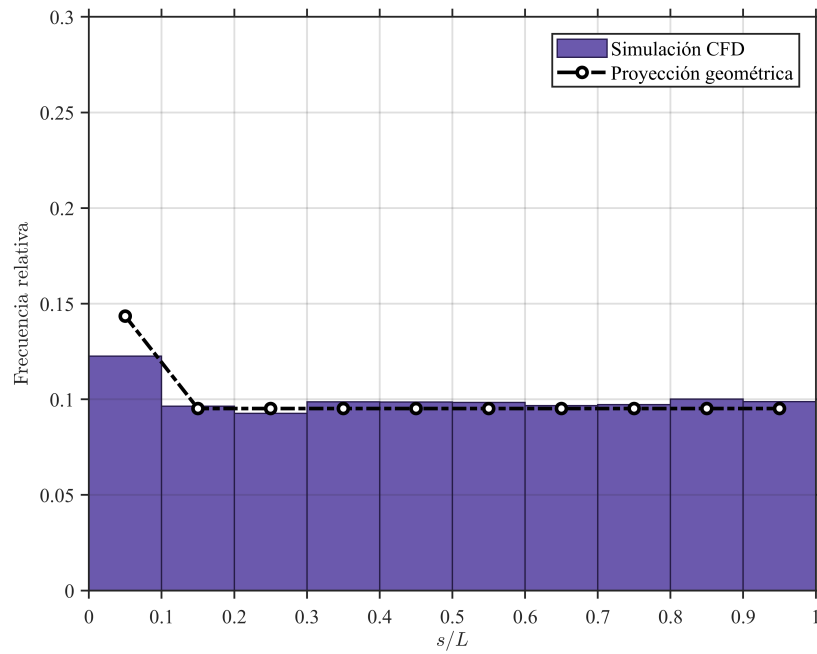


Figura 4.18: Comparación entre la distribución de impactos obtenida mediante simulación CFD y la proyección geométrica para la configuración B3, representadas en un solo gráfico.

Resumen del capítulo

En este capítulo se analizaron los efectos de las modificaciones geométricas propuestas sobre el flujo, la distribución de impactos de partículas y la medición de velocidad en el tubo Pitot. Los resultados mostraron que las variantes evaluadas no producen, en general, grandes cambios en la cantidad total de impactos respecto al diseño convencional. Sin embargo, sí modifican de forma importante la distribución espacial de los impactos sobre la punta, lo que puede desplazar las zonas de mayor deposición hacia regiones menos críticas del sensor.

La comparación final indicó que la configuración B1 presentó el mejor desempeño global, al ser la única variante que redujo la cantidad total de impactos y, al mismo tiempo, produjo el menor error relativo en la medición de velocidad. Las variantes del modelo A mantuvieron errores relativamente bajos, aunque no redujeron la cantidad total de impactos. En cambio, B2 y B3 resultaron menos favorables debido al mayor error introducido en la medición, siendo B3 la configuración con el aumento más pronunciado de impactos.

Por lo tanto, la evaluación de las propuestas de diseño debe considerar simultáneamente la reducción o redistribución de impactos y la preservación de la precisión de medición. Bajo este criterio combinado, B1 se destaca como la alternativa más prometedora entre las variantes analizadas.

La comparación con la proyección geométrica permitió demostrar que el campo de flujo modifica la ubicación de los impactos respecto al caso de trayectorias rectilíneas, redistribuyendo las partículas sobre la superficie del tubo Pitot y confirmando la importancia de considerar la interacción fluido-partícula en este tipo de análisis.

Conclusiones

El presente trabajo desarrolló y validó un marco numérico para el análisis de flujos turbulentos cargados con partículas alrededor de tubos Pitot. Además, se evaluó el efecto de diferentes modificaciones geométricas orientadas a reducir la incidencia de partículas sobre su superficie y a preservar la capacidad de medición del sensor. La metodología combinó la resolución de las ecuaciones RANS con el modelo de turbulencia k -SST y el seguimiento lagrangiano de partículas.

Se implementó un modelo de CFD para analizar el comportamiento aerodinámico alrededor de un tubo Pitot. La validación consistió en comparar la distribución del coeficiente de presión con datos experimentales de la literatura para un cuerpo romo, obteniéndose una buena concordancia. Esto confirmó que la malla y el modelo de turbulencia seleccionados son adecuados para reproducir las principales características del flujo, incluyendo la separación y la región de recirculación.

El análisis del flujo con partículas mostró que, para los números de Stokes considerados, la inercia domina la dinámica de las partículas. Como consecuencia, los impactos se concentran principalmente en la zona frontal del tubo Pitot convencional. Este comportamiento también presentó concordancia cualitativa con observaciones experimentales de acumulación de hielo reportadas para el mismo modelo de tubo Pitot, en las cuales la deposición se concentra en la región de la punta y disminuye hacia la sección posterior.

Con base en este comportamiento, se propusieron y evaluaron seis configuraciones geométricas, divididas en dos estrategias principales: modificaciones con punta redondeada y modificaciones con superficies inclinadas. Los resultados indicaron que las variantes evaluadas no producen, en general, grandes reducciones en la cantidad total de impactos respecto al diseño convencional. Sin embargo, las modificaciones geométricas sí alteran de manera importante la distribución espacial de los impactos sobre la punta, modificando

la localización e intensidad de las zonas de mayor deposición.

La comparación final entre las configuraciones mostró que la variante B1 presentó el mejor desempeño global, al ser la única que redujo la cantidad total de impactos y, al mismo tiempo, generó el menor error relativo en la medición de velocidad. Las variantes del modelo A mantuvieron errores de medición relativamente bajos, aunque no redujeron la cantidad total de impactos. Por otro lado, B2 y B3 resultaron menos favorables debido al mayor error introducido en la medición, siendo B3 la configuración con el aumento más pronunciado de impactos. Por lo tanto, la evaluación de las propuestas debe considerar simultáneamente la reducción o redistribución de impactos y la preservación de la precisión de medición del tubo Pitot.

Como trabajo futuro, se propone ampliar el análisis más allá de la frecuencia y distribución de impactos, incorporando el estudio de la acumulación de partículas sobre la superficie del sensor. Esto podría realizarse mediante modelos que consideren interacciones partícula-superficie más complejas, incluyendo fenómenos de adhesión, rebote o deposición. Asimismo, sería de interés evaluar partículas con diferentes propiedades físicas y materiales, de manera que puedan reproducirse mecanismos de acumulación observados en condiciones reales de operación. Esto permitiría analizar no solo dónde impactan las partículas, sino también su permanencia sobre la superficie y su posible influencia en el desempeño del tubo Pitot a largo plazo.

Referencias

- [1] B. Wang, M. Manhart, and H. Zhang. Analysis of inertial particle drift dispersion by direct numerical simulation of two-phase wall-bounded turbulent flows. *Engineering Applications of Computational Fluid Mechanics*, 5, 2014. doi: 10.1080/19942060.2011.11015376.
- [2] A. J. S. Cuthbertson, D. D. Apsley, P. A. Davies, G. Lipari, and P. K. Stansby. Deposition from particle-laden, plane, turbulent, buoyant jets. *Journal of Hydraulic Engineering*, 134(8):1110, 2008. doi: 10.1061/(ASCE)0733-9429(2008)134:8(1110).
- [3] W. Ezzeddine, J. Schutz, and N. Rezg. Pitot sensor air flow measurement accuracy: Causal modelling and failure risk analysis. *Flow Measurement and Instrumentation*, 63:140–150, 2018. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2018.10.021.
- [4] R. Jäckel, G. L. Gutiérrez Urueta, F. Tapia Rodríguez, J. B. R. Loureiro, and C. Monreal Jiménez. Experimental study of ice formation on an aeronautical pitot probe. In *Proceedings of the 3rd Thermal and Fluids Engineering Conference*, pages 61–66, Connecticut, 2018. Begell House. doi: 10.1615/TFEC2018.asp.024485.
- [5] Eric Loth. Numerical approaches for motion of dispersed particles, droplets and bubbles. *Progress in Energy and Combustion Science*, 26:161–223, 2000.
- [6] C. T. Crowe, J. D. Schwarzkopf, M. Sommerfeld, and Y. Tsuji. *Multiphase Flows with Droplets and Particles*. CRC Press, 2011.
- [7] Benjamin Thiria, Olivier Cadot, and J-F Beaudoin. Passive drag control of a blunt trailing edge cylinder. *Journal of fluids and structures*, 25(5):766–776, 2009.
- [8] Info Aviación. El cessna 182 “skylane” cumple 70 años de legado aeronáutico,

September 2025. URL <https://infoaviacion.com.mx/vuela/general/el-cessna-182-skylane-cumple-70-anos-de-legado-aeronautico/>.

- [9] R. Jäckel, G. L. Gutiérrez Urueta, F. Tapia Rodríguez, and C. Monreal Jiménez. Numerical and experimental characterisation of an aeronautic pitot probe. *The Aeronautical Journal*, 123:890–911, 2019. doi: 10.1017/aer.2019.33.
- [10] V. N. Kalashnikov and A. M. Kudin. Anomalous readings of pitot tubes in suspensions of solid particles and in solutions of polymers, lowering the turbulent friction. *Fluid Dynamics*, 7:232–237, 1972. doi: 10.1007/BF01186463.
- [11] L. A. Rodert. An investigation of the prevention of ice on the airplane windshield. Technical Report NACA-SR-105, National Advisory Committee for Aeronautics (NACA), 1939. URL <https://digital.library.unt.edu/ark:/67531/metadc65037/>.
- [12] S. Balachandar and J. K. Eaton. Turbulent dispersed multiphase flow. *Annual Review of Fluid Mechanics*, 42:111–133, 2010. doi: 10.1146/annurev.fluid.010908.165243.
- [13] G. Ahmadi. *Computational Fluid Dynamics of Particle Transport and Deposition*. Elsevier, 2012. doi: 10.1016/B978-1-4377-7883-0.00002-X.
- [14] V. Armenio. Eulerian–lagrangian modeling of particle dispersion. *International Journal of Multiphase Flow*, 2001.
- [15] B. Wolde, L. F. Mortimer, and M. Fairweather. Stokes number effects on deposition in particle-laden turbulent pipe flows. *Chemical Engineering and Technology*, 2023. doi: 10.1002/ceat.202200606.
- [16] C.-X. Tu and J. Zhang. Characteristic distribution of submicron and nano-particles laden flow around circular cylinder. *Thermal Science*, 16, 2012. doi: 10.2298/TSCI1205386T.
- [17] L. Tian and G. Ahmadi. Particle deposition in turbulent duct flows: Comparisons of different model predictions. *Journal of Aerosol Science*, 16, 2006. doi: 10.1016/j.jaerosci.2006.12.003.

- [18] K. Hanjalic. Will rans survive les? a view of perspectives. *Journal of Fluids Engineering*, 2005. doi: 10.1115/1.2037084.
- [19] A. Jaiswal, M. D. Bui, and P. Rutschmann. Evaluation of rans-dem and les-dem methods in openfoam for simulation of particle-laden turbulent flows. *Fluids*, 7: 337, 2022. doi: 10.3390/fluids7100337.
- [20] H. Shi, X. Wang, Q. Xiang, G. Zhang, and L. Xue. Experimental and numerical study of the discharge performance of particle-laden turbulent flow. *Journal of Marine Science and Engineering*, 10:85, 2022. doi: 10.3390/jmse10010085.
- [21] D. P. Sikovsky. *Stochastic Lagrangian Simulation of Particle Deposition in Turbulent Channel Flows*. Springer, 2015. doi: 10.1007/s10494-015-9634-0.
- [22] R. Jäckel, F. Tapia, G. Gutiérrez-Urueta, and C. Monreal Jiménez. Design of an aeronautic pitot probe with a redundant heating system incorporating phase change materials. *Flow Measurement and Instrumentation*, 76:101817, 2020. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2020.101817.
- [23] R. Jäckel, G. Gutiérrez-Urueta, and F. Tapia. A review on pitot tube icing in aeronautics: Research, design and characterization – future trends. *Flow Measurement and Instrumentation*, 81:102033, 2021. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2021.102033.
- [24] S. Chevula, A. Sanz-Andres, and S. Franchini. Estimation of the correction term of pitot tube measurements in unsteady (gusty) flows. *Flow Measurement and Instrumentation*, 47:142–152, 2015. doi: 10.1016/j.flowmeasinst.2015.08.011.
- [25] A. J. White and J. B. Young. Loss measurements and interpretation of pitot pressures in two-phase vapor-droplet flow. *Experimental Thermal and Fluid Science*, 14(1):83–92, 1997. doi: 10.1016/S0894-1777(97)00011-3.
- [26] Stephen B. Pope. *Turbulent Flows*. Cambridge University Press, 2000.
- [27] F. R. Menter. Two-equation eddy-viscosity turbulence models for engineering applications. *AIAA Journal*, 32(8):1598–1605, 1994. doi: 10.2514/3.12149.

- [28] Textron Aviation. Cessna Skylane: Specifications. <https://cessna.txtav.com/en/piston/cessna-skylane>, 2025. [En línea; accedido el 15 de octubre de 2024].