



UNIVERSIDAD NACIONAL AUTÓNOMA DE MÉXICO

FACULTAD DE INGENIERÍA

**Estudio hidrodinámico de la
ventilación en un modelo de
vagón de metro**

TESIS

Que para obtener el título de
Ingeniero Mecánico

P R E S E N T A

Carlos Alonso Torres Fernández

DIRECTOR DE TESIS

Dr. Carlos Alberto Palacios Morales



Ciudad Universitaria, Cd. Mx., 2017



Universidad Nacional
Autónoma de México



UNAM – Dirección General de Bibliotecas
Tesis Digitales
Restricciones de uso

DERECHOS RESERVADOS ©
PROHIBIDA SU REPRODUCCIÓN TOTAL O PARCIAL

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

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

Datos del jurado

1. **Presidente:** Dr. Francisco Javier Solorio Ordaz
2. **Vocal:** Dr. Carlos Alberto Palacios Morales
3. **Secretario:** Dr. Gabriel Ascanio Gasca
4. **1er. Suplente:** Dr. José Roberto Zenit Camacho
5. **2o. Suplente:** Dr. José Enrique Guzmán Vázquez

Agradecimientos

A Dios y a mi familia, por siempre apoyarme en todos los sentidos para realizar esta tesis y en darme la oportunidad para estudiar y concluir una carrera profesional. A Lizzie.

A mi asesor, el Dr. Carlos Palacios por su paciencia y tiempo dedicado. Gracias por la orientación y su experiencia para realizar el proyecto, así como por todo el aprendizaje que me permitió obtener.

Así como a mi asesor en la gestión del túnel de viento, al personal de Systelectro que estuvo presente en la operación e instalación del mismo.

A todos mis maestros: el Dr. Jaime Cervantes, Dr. Roberto Zenit, Dr. Rafael Chávez, Ing. Osiris Torres, Dr. Adrián Espinosa, M.E.M. Juan Ocariz, Dr. Federico Vázquez, por mencionar algunos en toda la orientación y apoyo brindados.

Al amable personal del STC metro por su cálido recibimiento. Gracias por la atención brindada.

A todo el personal técnico y académico del laboratorio de Termofluidos, de los talleres de Ingeniería Mecánica de la Facultad y del Instituto de Investigaciones en Materiales que me apoyó en construir y realizar los experimentos.

A mis amigos de la escuela, facultad y en general que me motivaron en momentos difíciles y acompañaron en otros.

Índice general

Datos del jurado	III
Agradecimientos	V
Índice general	VII
Índice de figuras	XI
Índice de tablas	XIII
Resumen	XV
1. Introducción	1
1.1. Motivación	1
1.2. Objetivos	3
1.3. Ventilación	3
1.3.1. Características del aire para el bienestar	4
1.3.2. Requisitos de la ventilación	7
1.3.3. Sistemas de ventilación	9
1.4. Características y ventilación del STC	12
1.4.1. Características generales	13
1.4.2. Ventilación en general y vagones	14
1.5. Estudios y soluciones implementadas	19
1.5.1. Alternativas de solución del STC metro	19
1.5.2. Soluciones en otros metros del mundo	20
1.5.3. Estudios realizados	21

VIII ÍNDICE GENERAL

2. Diseño experimental	29
2.1. Técnica de PIV	29
2.1.1. PIV-2D2C. Principio y método	30
2.1.2. Equipo	33
2.1.3. Procesamiento y filtrado	35
2.2. Equipo experimental	36
2.2.1. Modelo	36
2.2.2. Túnel de viento	47
2.2.3. Estructura	49
2.2.4. Espejo	51
2.2.5. Generador de partículas	51
2.2.6. Generador de humo	52
2.2.7. Posicionador	53
2.2.8. Láser	54
2.2.9. Cámara y óptica	55
2.2.10. Adquisición de datos	56
2.3. Arreglo experimental	57
2.4. Experimentos realizados	64
2.4.1. PIV	64
2.4.2. Visualización	65
2.5. Post-procesamiento de datos	65
3. Resultados	69
3.1. Características del flujo en el túnel de viento	70
3.2. Resultados obtenidos del sistema PIV	72
3.2.1. Ejemplo	73
3.2.2. Campos vectoriales de velocidad	75
Efecto de la velocidad del flujo	75
Efecto del tipo de ventana	78
Efecto de la posición del vagón en el túnel	79
Distribución espacial (planos)	81
3.2.3. Perfiles de velocidad	86
Efecto del tipo de ventana	86
Efecto de la posición del vagón en el túnel	88
3.2.4. Líneas de corriente	88

Efecto del tipo de ventana	89
Efecto de la posición del vagón en el túnel	89
Distribución espacial (planos)	91
3.2.5. Intensidad de turbulencia	92
Efecto de la velocidad del flujo	92
Efecto del tipo de ventana	93
Efecto de la posición del vagón en el túnel	95
Distribución espacial (planos)	96
3.3. Análisis de capacidad de ventilación (plano A)	97
3.3.1. Análisis de conservación de masa por zonas	98
3.3.2. Análisis del gasto instantáneo a través de las ventanas	101
3.4. Visualización	102
3.5. Comparación con un caso de investigación	107
4. Conclusiones	111
Bibliografía	115

Índice de figuras

1.1. Disposición de un sistema de extracción. Adapt.	10
1.2. Extracción por el techo. Adapt.	10
1.3. Formas de inyección de aire. Adapt.	11
1.4. Sistema combinado de inyección y extracción. Adapt.	12
1.5. Modelos de trenes STC. Adapt.	16
1.6. Interior de algunos trenes del STC. Adapt.	16
1.7. Estructura interna vagones del STC. E.P.	18
2.1. Principio de la técnica de PIV. Adapt.	30
2.2. Correlación cruzada empleada en PIV. Adapt.	32
2.3. Dibujo de vagón motriz del convoy modelo MP-82. Adapt.	39
2.4. Planos vista frontal modelo. E.P.	41
2.5. Planos de perfil y superior del modelo. E.P.	42
2.6. Planos con proporciones del modelo. E.P.	43
2.7. Vista en 3D modelo en <i>Catia V5</i> . E.P.	44
2.8. Foto modelo final ensamble. E.P.	44
2.9. Ventanas construidas para el modelo. E.P.	45
2.10. Planos de ventanas construidas. E.P.	46
2.11. Túnel de viento empleado; plano y foto. E.P.	47
2.12. Planos de compuerta lateral réplica. E.P.	48
2.13. Foto tapa original y réplica. E.P.	49
2.14. Estructura y subestructura. E.P.	50
2.15. Foto del espejo. E.P.	51
2.16. Generador de partículas y módulo de control. E.P.	52
2.17. Generador de humo y aceite. E.P.	53
2.18. Posicionador. E.P.	54
2.19. Equipo del láser. E.P.	55
2.20. Cámara <i>HiSense MkII</i> . E.P.	56
2.21. Planos láser separación. E.P.	57
2.22. Planos láser medidos. E. P.	58
2.23. Fotos de modelo en el túnel de viento. E.P.	59
2.24. Recorrido horizontal y vertical del láser. E.P.	60
2.25. Zonas de captura lente pequeño <i>EdmundOptics</i> . E.P.	60

XII ÍNDICE DE FIGURAS

2.26. Enfoque de la hoja láser con la cámara. E.P.	61
2.27. Arreglo experimental general. E.P.	62
2.28. Arreglo experimental general de perfil. E.P.	62
2.29. Arreglo experimental fotografías. E.P.	63
3.1. Ejemplo de PIV. E.P.	74
3.2. Campos vectoriales zonas. Plano A. Velocidad. E.P.	77
3.3. Campos vectoriales unidos. Plano A. Velocidad. E.P.	78
3.4. Campos vectoriales por zonas. Plano B. Ventana y posición. E.P.	80
3.5. Campos vectoriales por planos A, B y C. E.P.	84
3.6. Campos vectoriales por zonas. Plano D. E.P.	85
3.7. Perfiles de velocidad. Plano A. E.P.	86
3.8. Perfiles de velocidad. Plano B. Ventana y posición. E.P.	87
3.9. Líneas de corriente. Plano A. E.P.	89
3.10. Líneas de corriente. Plano B. Ventana y posición. E.P.	90
3.11. Líneas de corriente. Plano D. E.P.	91
3.12. Intensidad de turbulencia. Plano A. Velocidad. E.P.	93
3.13. Intensidad de turbulencia. Plano B. Ventana y posición. E.P.	94
3.14. Intensidad de turbulencia. Plano C. E.P.	95
3.15. Intensidad de turbulencia. Plano D. E.P.	96
3.16. Superficies de control para gasto por unidad de longitud. E.P.	99
3.17. Gráfica gasto instantáneo por las ventanas. E.P.	102
3.18. Flujo zona frontal del modelo. E.P.	104
3.19. Flujo en la zona central del modelo. E.P.	105
3.20. Flujo en la zona central y posterior del modelo. E.P.	106

(Elaboración propia: E.P.; Adaptada: Adapt. 136 pp.)

Índice de tablas

1.1. Enfriamiento y velocidad del aire. Adapt.	6
1.2. Renovaciones recomendadas de aire por lugar. Adapt.	8
1.3. Características generales del parque vehicular STC. Adapt.	14
2.1. Semejanza entre elementos del vagón y modelo. E.P.	40
2.2. Comparación proporciones modelo y vagón real. E.P.	40
2.3. Casos que se midieron con la técnica de PIV. E.P.	64
2.4. Casos de comparación para estudiar efectos. E.P.	64
3.1. Frecuencia del motor <i>vs</i> velocidad en el túnel. E.P.	70
3.2. Gasto por unidad de longitud en superficies de control. E.P.	100

Resumen

En esta tesis se estudió el comportamiento hidrodinámico del flujo de aire en el interior de un vagón del Sistema de Transporte Colectivo metro (STC) de la Ciudad de México, con la finalidad de analizar la ventilación. Para ello, se construyó un modelo de vagón a escala hecho de acrílico con características geométricas similares al tren de metro MP-82. Las mediciones de velocidad fueron realizadas en un túnel de viento cerrado. Se obtuvo el campo vectorial de velocidades a través del sistema de medición de velocimetría por imágenes de partículas (PIV por sus siglas en inglés); así como cantidades derivadas del campo: vorticidad, perfiles de velocidad, líneas de corriente e intensidad de turbulencia. Los experimentos realizados se enfocaron en estudiar el efecto que produjeron tres variables sobre el flujo interno del vagón en diferentes planos de medición: velocidad externa del aire, tipo de ventana y posición del vagón respecto al túnel. Adicionalmente, se realizaron experimentos de visualización con humo para observar el comportamiento cualitativo del flujo y para complementar la información obtenida con el sistema PIV. También se realizó un estudio de la capacidad de ventilación dentro del modelo y se comparó con casos de investigación en medios de transporte similares. En general, los resultados indican que el flujo es tridimensional en todas las regiones del vagón. En los campos de velocidad instantáneos, se encontraron estructuras de flujo como vórtices y zonas de recirculación. Al obtener campos de velocidades promedios, se pudo observar que existe un flujo preferencial que va de la parte posterior a la frontal del vagón; es decir, en sentido contrario al flujo exterior. En la zona posterior y central se encontraron los valores más grandes de velocidad. Así mismo, en la parte posterior es donde se encuentran los valores más grandes de intensidad de turbulencia, que puede significar mayor confort en esta zona. El cambio de la magnitud de velocidad exterior (en el rango usado) no influye significativamente en los patrones del flujo al interior. Sin embargo, el tipo de ventana provoca cambios en los patrones de flujo y valores de intensidad de turbulencia, siendo estos últimos mayores para el

XVI Resumen

tipo corrediza e indicando mayor mezclado de aire. El efecto de la posición del vagón con respecto al túnel no es concluyente. El análisis de conservación de masa para la ventana corrediza indicó que en el plano de medición ubicado en la abertura, el flujo sale del vagón preferentemente de manera asimétrica. De acuerdo a lo observado en visualización y en congruencia con lo reportado por otros autores, es de esperar que las estructuras de flujo internas del modelo y los efectos estudiados sean similares en el caso del vagón real, aunque el número de Reynolds no se haya empatado. Esto último a consecuencia de que el flujo en ambos casos es esencialmente inercial. Los resultados obtenidos en la presente tesis indican que es necesario realizar mediciones en más planos y usar preferentemente la técnica de PIV-Stereo para obtener tres componentes de velocidad. Se requiere hacer mediciones de velocidad detalladas en las ventanas y tomar en cuenta otros efectos como el flujo forzado por ventiladores, generación de calor en el interior, ocupación de personas, asientos, etc.

Capítulo 1

Introducción

1.1. Motivación

Uno de los principales problemas que tiene el metro de la Ciudad de México, y de interés principal para este trabajo, es el de las altas temperaturas y la comodidad de los usuarios.

Por ejemplo, de acuerdo a una nota de Martínez y Aldaz (2012), la temperatura del aire al interior de la estación Hidalgo llegó a marcar los 41 °C. Se menciona que los equipos de ventilación necesitan modernizarse, ya que no generan el aire fresco necesario. Por parte de los usuarios, se considera que la ventilación en el sistema es insuficiente durante temporadas de calor (Zavala, 2016) y en horas pico cuando hay gran cantidad de usuarios.

De acuerdo al Sistema de Transporte Colectivo metro [STC], las molestias asociadas con las altas temperaturas se llegan a presentar principalmente dentro de las instalaciones en temporada de calor y horas pico. La temporada de calor se establece en los meses de abril, mayo y junio. En estos casos, la falta de ventilación se convierte en un problema de comodidad. En un reporte (Fideicomiso Maestro del Metro), el STC (2014) menciona que la ventilación en los vagones es insuficiente debido a que se presentan fallas frecuentes en los equipos de motoventiladores y muchos de ellos están desbalanceados (con polvo y pelusas), o terminaron su vida útil y requieren de actualización. Se menciona también que el usuario siente incomodidad a causa de esto. Por otro lado, es probable que aún con los ventiladores funcionando, existan molestias para las personas que se encuentran paradas muy cerca de la salida del aire de estos, debido a su velocidad.

2 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

La comodidad en el ámbito térmico es muy importante en un medio de transporte como el metro; en este se mueven millones de pasajeros diariamente y se requiere para poder realizar un viaje cómodo y seguro. Esta no es un lujo, es una necesidad para el cuerpo humano que está estandarizada por normas y puede repercutir en la salud. Algunas normas relacionadas se reportan en este capítulo.

El confort depende de muchos factores como: época del año, ventilación, vestimenta, temperatura promedio, gradiente térmico, humedad relativa, cargas térmicas, actividad que se realiza, hora del día, metabolismo de la persona, cantidad de personas, velocidad del aire, etc. Debido a la gran cantidad de variables, este trabajo se enfocó en la ventilación para lograr el confort térmico. A su vez, la ventilación se puede evaluar en distintos lugares del metro: túneles, andenes, estaciones, interior de trenes, etc.

La presente tesis se enfocó en estudiar las condiciones de ventilación natural al interior de un modelo a escala de vagón de metro. Este se construyó para evaluar los efectos que pudieran tener tres variables presentes también a escala real: la velocidad exterior del aire con respecto al vagón o la velocidad del vagón como su equivalente, tipo de ventana (corrediza o abatible) y posición relativa entre el vagón y la pared del túnel. Con el motivo de entender mejor el flujo en diferentes posiciones dentro del vagón, se escogieron cuatro planos de medición para estudiar los efectos mencionados. Esto se explica a detalle en el capítulo de Diseño Experimental.

Las variables mencionadas influyen en las corrientes y patrones de flujo que se generan dentro del vagón y son determinantes para una ventilación adecuada y por consecuencia un confort. Para medir su impacto, se empleó la técnica conocida como velocimetría por imágenes de partículas o PIV por sus siglas en inglés. Mediante esta técnica es posible obtener campos vectoriales de la velocidad del aire y otras variables como la intensidad de turbulencia, que se sabe que tiene relación con la sensación de confort, como se verá en el apartado de estudios realizados. Además, proporciona datos cuantitativos y cualitativos de alta calidad, más difíciles de estudiar con otras técnicas (Jahanmiri, 2011).

Debido a la complejidad del problema, el experimento se realizó bajo condiciones de equilibrio térmico, es decir, a temperatura constante y sin transferencia de calor. Así mismo, no se incorporaron o emularon los efectos que pudieran tener los ventiladores instalados en el techo.

En general, se encontró poca documentación sobre estudios de la ventilación en vagones del metro de la Ciudad de México o estudios similares. El tema no es nuevo; sin embargo se ha estudiado con poco detalle o empleando la técnica de PIV.

1.2. Objetivos

1. Estudiar la hidrodinámica de la ventilación dentro de un vagón de metro en movimiento (modelo MP-82), mediante la construcción de un modelo a escala para pruebas en un túnel de viento.
 - Obtener el campo vectorial de velocidades del flujo mediante la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV).
 - Obtener indicadores de las características del flujo como son intensidad de turbulencia, vorticidad, perfiles de velocidad y líneas de corriente.
 - Estudiar el efecto que presentan tres variables en la ventilación natural al interior del vagón: velocidad exterior, tipo de ventana, y posición del vagón respecto a las paredes del túnel.

1.3. Ventilación

En esta sección se presentan algunos conceptos sobre el tema de la ventilación que puedan ser relevantes para los propósitos de esta tesis. Aunque principalmente el enfoque es hacia locales estáticos, buena parte también se puede aplicar a sistemas de transporte. Además, existen apartados de algunas regulaciones y normas sobre la ventilación particularmente en vehículos que se mencionarán en esta sección. La información que aquí se presenta resumida se obtuvo principalmente de un libro guía de Osborne (1970) sobre la práctica de la ventilación y de fuentes electrónicas que se reportan en su momento.

De acuerdo a Osborne (1970), la ventilación es un proceso similar al aire acondicionado, pero con la diferencia de que el aire acondicionado implica tratar el aire para cumplir las condiciones necesarias de un lugar en específico como humedad, limpieza, temperatura, calefacción y refrigeración a un costo generalmente mayor y con un control más preciso de estas variables. A su vez, se pueden emplear sistemas combinados donde la ventilación es parte del sistema de aire acondicionado. La ventilación requiere de suministrar aire fresco, extraer el aire viciado o contaminado y caliente, y mover el aire para refrigerar debido a la transpiración. Para ello, es necesario sustituir el aire contaminado al interior por aire más limpio externo y además evitar la mala sensación por mucha humedad. Una mala ventilación de un lugar puede afectar a la disposición para el trabajo y la comodidad en general.

De acuerdo a Admin. (2017) y a Atkinson et al. (2009) se tiene lo siguiente. Existen básicamente cuatro tipos de ventilación, aunque varía la clasificación según la fuente: ventilación natural, forzada o mecánica, personalizada e híbrida.

La ventilación natural se basa en el movimiento del aire inducido naturalmente por diferencias de presiones y temperaturas entre distintas zonas o por la entrada exterior del viento, sin el uso de ventiladores. Puede proveer de grandes flujos de aire de manera económica, es de bajo mantenimiento y de poca demanda energética. Presenta la desventaja de que es variable y dependiente a las condiciones del clima y viento exterior. Un ejemplo de este tipo es la ventilación cruzada, donde el aire entra, atraviesa todo un espacio para salir por el otro extremo.

La ventilación forzada implica el uso de ventiladores y conductos que pueden ser para inyección o extracción de aire o combinación. Con este tipo de ventilación se tiene un mayor control del flujo de aire, su distribución, calidad, humedad, presiones y otros factores como la entrada de polvo. Se puede combinar con sistemas de aire acondicionado. Presenta la desventaja de un mayor mantenimiento y la disponibilidad de electricidad.

La ventilación personalizada es la que se adapta para condiciones específicas de un ambiente, por ejemplo de oficina, industria o un proceso, como extracción de vapores tóxicos de soldadura. Generalmente es más costosa debido a estas adaptaciones y usada particularmente en los ambientes mencionados.

La ventilación híbrida es la combinación de las anteriores, donde se puede usar ventilación forzada cuando la ventilación natural no es suficiente o de poca eficiencia y la natural en momentos clave del día. En conjunto puede ser muy eficiente, ahorrando energía y costos. También existen nuevas técnicas de ventilación como la ventilación por desplazamiento; donde el aire limpio entra a nivel de piso a menor temperatura y asciende renovando el aire, para extraerse junto con el aire caliente acumulado en la parte superior. Esta técnica es eficiente para lugares suficientemente espaciosos y altos, que evitan corrientes incómodas (Cepeda Mazón, sf).

1.3.1. Características del aire para el bienestar

Existen diversos factores que afectan la calidad del aire y se ven reflejados en la comodidad y bienestar de las personas en un lugar. Controlarlas o mantenerlas en niveles adecuados asegurará un ambiente cómodo y ventilado. Estas son:

Composición: El aire está compuesto por 79 % nitrógeno y 21 % oxígeno más otras porciones en menor cantidad de dióxido de carbono, argón, neón, helio y vapor de agua principalmente. Un ambiente interno ocupado de personas generalmente tendrá más dióxido de carbono que el exterior, pero rara vez en concentraciones peligrosas. Este gas no es un veneno y su concentración raramente excede al 1 % y el doble tampoco produce daños. Como resultado, está sólo el inconveniente de que desplaza al oxígeno; sin embargo, rara vez disminuye a niveles peligrosos en aplicaciones típicas donde la ventilación se pudiera considerar muy deficiente. Esta sensación puede ser confundida con escaso movimiento de aire.

Olores y bacterias: Los olores desagradables que se pueden producir en un ambiente ocupado de personas, son debidos principalmente a sustancias orgánicas generadas por el cuerpo humano. Estos olores no son venenosos; sin embargo, son desagradables y deseables de eliminar por la ventilación. Por otro lado, una buena ventilación reduce la cantidad de bacterias en el aire y en aplicaciones como hospitales esto es de mayor importancia.

Humos, gases y polvos industriales: Estos son generados por la combustión o por algún otro proceso industrial como el pintado en aerosol. Generalmente perjudican a la salud y se deben mantener en niveles prácticamente nulos en el lugar ocupado. Se pueden eliminar desde la fuente mediante campanas de extracción especializadas.

Cargas térmicas:

- Por transferencia de calor a través de muros y ventanas (radiación solar, por conducción y convección).
- Equipo electromecánico. Ej. Hornos industriales, motores, compresores, etc.
- Procesos exotérmicos.
- Calor emitido del cuerpo humano.

El cuerpo humano libera calor al ambiente debido al consumo de alimentos y aumenta al hacer ejercicio. Por ejemplo, una persona en calma emite aproximadamente 100 *kcal/h*, mientras que alguien que camina a 7 *km/h* emite aproximadamente 350 *kcal/h*. Debido a que el cuerpo no almacena calor y necesita

eliminarlo para mantener la temperatura interna a aproximadamente $37\text{ }^{\circ}\text{C}$. Para ello, regula la temperatura de la piel mediante tres procesos de transferencia de calor: convección, evaporación y radiación. El movimiento del aire influye en la transferencia de calor mediante convección y evaporación (transpiración). El cuerpo sentirá alivio o malestar dependiendo del exceso o déficit de calor disipado al ambiente. Otra consecuencia de que haya movimiento de aire, es que se evita que el cuerpo pierda muchas sales por sudoración excesiva; de modo que el cuerpo cede calor al ambiente por convección y en menor medida por transpiración.

Movimiento del aire: Este es un factor muy importante para la transferencia de calor, como se mencionó en el punto anterior. La velocidad de aire en movimiento requerida depende del número de ocupantes y las actividades que se realicen en el lugar. Sin embargo, aunque varíen las condiciones de temperatura y humedad, la siguiente tabla se puede usar como referencia para el enfriamiento deseado en una zona.

La tabla 1.1, obtenida de la misma guía sobre la ventilación, muestra el efecto de disminuir la temperatura como función de la velocidad del aire.

Velocidad del aire (m/s)	Enfriamiento ($^{\circ}\text{C}$)
0.1	0
0.3	1
0.7	2
1	3
1.6	4
2.2	5
3	6
4.5	7
6.5	8

Tabla 1.1: Enfriamiento promedio como función de la velocidad del aire. Adaptada de (Osborne, 1970).

Para garantizar el movimiento de aire, generalmente se usan ventiladores; ya que aunque exista renovación de aire, el movimiento y la disminución de temperatura puede ser imperceptible si el espacio es muy grande.

Condiciones estimulantes: Se ha constatado que las corrientes de aire variables aumentan la sensación de frescura a diferencia de un movimiento de aire constante. Esta variabilidad provoca cambios de temperatura en la piel, que a su vez producen efectos fisiológicos y psicológicos de bienestar. En ambientes calurosos es favorable, mientras que en ambientes fríos estas corrientes de aire pueden ser desagradables como se reporta en algunos estudios más adelante mencionados.

1.3.2. Requisitos de la ventilación

El principal requisito de la ventilación es renovar el aire contaminado del interior de una habitación por aire fresco. Para conocer las necesidades de ventilación intervienen factores como: dimensiones del espacio, número de ocupantes y actividades que realizan, cargas térmicas de equipo y radiación solar, humedad relativa, temperatura exterior del aire y su variación. En ocasiones no es necesario considerar todos estos factores y es suficiente seguir valores recomendados de cantidad de renovaciones o cambios de aire de acuerdo al tipo de espacio.

Para cualquier caso, la ventilación de diseño se debe basar en las condiciones más calurosas o predominantes que se presenten. En zonas templadas se basa sobre el calor medio del verano y en zonas muy húmedas se tiene en cuenta la temporada de lluvias, cuando la humedad relativa es alta.

Existen varios métodos para calcular la tasa de ventilación de aire necesaria. Uno de ellos consiste en multiplicar el volumen interior total del lugar en metros cúbicos por el número de renovaciones deseadas por hora. Se entiende a la renovación de aire al hecho de reemplazar el volumen total de aire de un espacio por aire fresco en cierta cantidad de tiempo, como puede ser horas, expresado como: [*cambios/h*].

Cada espacio es diferente y para ello se puede usar la tabla 1.2 que muestra valores recomendados de acuerdo al lugar. El resultado es en m^3/h . Para conocer los valores recomendados de otros lugares se puede consultar el estándar técnico de la *American National Standards Institute/American Society of Heating, Refrigerating and Air-Conditioning Engineers*, ANSI/ASHRAE 62-2013 o el estándar ANSI/ASHRAE 55-2010 para cuestiones de confort térmico.

8 CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN

Naturaleza del local	Renovaciones de aire por hora [<i>cambios/h</i>]
Bancos	2-4
Cocinas comerciales o de escuelas	15-20
Cantinas	4-6
Cines	10-15
Despachos	4-6
Fábricas en general	6-10
Hospitales	4-6
Sala de baile	6-8
Sala para clases	2-3
Sala de máquinas	20-30
Teatros	10-15
Restaurante	6-10
Talleres de pintura	30-60

Tabla 1.2: Renovaciones de aire por hora de acuerdo al lugar, algunos ejemplos. Adaptada de (Osborne, 1970).

Un segundo método es proveer una alimentación mínima de 30 m^3 por persona y hora. Este método puede retirar el aire viciado pero podría ser insuficiente para atmósferas más pesadas con polvos y humos o para eliminar el calor.

Un tercer método es basado en los incrementos de calor del lugar. Este método se usa cuando la disminución de temperatura es el principal requerimiento. Para ello, se deben identificar y sumar las principales fuentes de calor o cargas térmicas como se menciona anteriormente. El cálculo de la tasa de ventilación necesaria $T.V.$ en (m^3/h) se da con la siguiente fórmula en particular:

$$T.V. = \frac{Q_t}{(0.288)(\Delta T)} \quad [\text{m}^3/\text{h}] \quad (1.1)$$

donde Q_t es el calor total de las cargas térmicas necesariamente en unidades de kcal/h , 0.288 un factor de conversión y ΔT la diferencia entre la temperatura permisible al interior y la temperatura exterior a la sombra (u otra zona más fría que el interior) en $^\circ\text{C}$. En esta fórmula mientras haya menor diferencia de temperatura (ΔT), mayor ventilación será necesaria, al igual que si se incrementa el calor Q_t producido por las cargas térmicas.

1.3.3. Sistemas de ventilación

Como se menciona en la misma guía (Osborne, 1970), para lograr una ventilación controlada, los ventiladores son fundamentales. La ventilación natural en locales pocas veces es más efectiva que la ventilación forzada, ya que es variable y depende de las condiciones al exterior, de la dirección del viento o diferencia de temperaturas entre exterior e interior.

En la ventilación forzada se pueden emplear tres técnicas diferentes: extracción, inyección de aire o una combinación de los anteriores. El método adecuado depende de la aplicación y dependerá de la forma, tamaño del lugar, control del polvo, olores y temperatura.

a) Extracción del aire

El método de extracción de aire es simple, económico y el más común. Consiste en retirar el aire viciado de un lugar mediante ventiladores que aspiran el aire al interior de una habitación y lo expulsan hacia el exterior. Por diferencia de presiones, provocan la entrada de aire fresco del exterior a través de otras aberturas.

La eficiencia del método depende fundamentalmente de las aberturas por donde entra el aire fresco y de la distancia que el aire recorre para salir por los ventiladores de extracción. Las aberturas de entrada de aire deben de estar localizadas para evitar que haya cortocircuitos de aire que eviten ventilación en otras zonas, como se ve en la figura 1.1. Se puede ver en el dibujo de la derecha, que la entrada B crea un flujo preferente entre esta y el ventilador, mientras los otros espacios de la habitación tendrán menor ventilación; por el contrario, en la figura de la izquierda el aire fresco recorre todo el espacio y hay mejor distribución. A mayor distancia de recorrido del aire fresco que entra hacia las salidas de aire, menor pureza, ya que se va contaminando. El aire fresco debe circular al nivel de la zona de respiración.

Se pueden usar entradas y aberturas encontradas en las paredes o un ducto central de extracción con entradas en las paredes si el espacio es muy grande. El área de las entradas de aire debe tenerse en cuenta, ya que si es demasiado pequeña, disminuirá la velocidad de extracción y podría provocar corrientes incómodas en las cercanías de la abertura (efecto Venturi). Para climas templados, se recomienda una velocidad de entrada de aire de 0.5 a 1 m/s. Se puede usar una velocidad más grande en edificios industriales o en latitudes más calurosas.

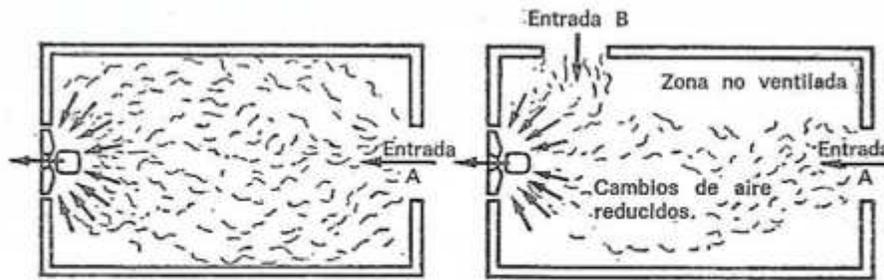


Figura 1.1: Disposición de un sistema de extracción simple. La configuración de entradas y salidas de aire puede influir en la eficiencia de la extracción. Adaptado de (Osborne, 1970).

En algunos casos, otra manera económica de extraer el aire puede ser mediante un ventilador en la parte superior, con entradas de aire en la parte inferior. Esto es favorable cuando el calor representa un problema. Así se extrae el calor de la parte superior, que se acumula por convección natural. Esto se puede apreciar mejor en la figura 1.2.

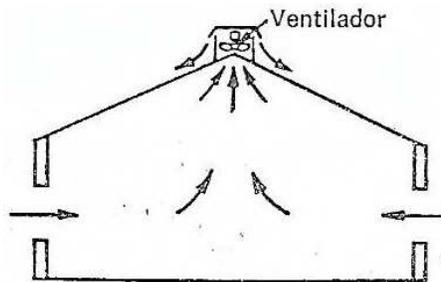


Figura 1.2: Extracción de aire a través del techo, donde se acumula aire caliente por corrientes de convección natural. Adaptado de (Osborne, 1970).

Si se quiere extraer vapores pesados como los que se generan en un taller de pintura, se pueden ubicar extractores al nivel del piso o campanas de extracción especializadas.

b) Inyección de aire

La inyección de aire consiste en proveer aire fresco del exterior hacia el interior de un espacio o habitación. El aire interior sale por cualquier por cualquier abertura disponible, debido a que se crea una presión ligeramente mayor a la exterior,

reduciendo así la entrada de polvo. Con este método se puede controlar de una mejor manera el volumen, distribución, velocidad, temperatura, humedad, limpieza (filtros), etc. del aire. Aún así, se deben proteger las salidas de aire de corrientes contrarias provenientes del exterior mediante sombreretes. Generalmente se emplean canalizaciones para inyectar y distribuir el aire por el espacio.

Para una adecuada distribución, en los edificios industriales se pueden usar entradas de aire sin canalizaciones en la parte superior y salidas en la parte inferior o en las paredes contrarias mediante un extractor (sistema combinado). En espacios relativamente pequeños habrá corrientes secundarias que son atraídas por la corriente de ventilación principal, provocando movimiento de aire general. A su vez, el aire también puede ser inyectado mediante grandes canalizaciones horizontales o verticales que derivan en ramificaciones y difusores. Esto es más común en espacios no industriales y la forma y configuración de los difusores afecta a la distribución del aire. Dibujos de sistemas de inyección a grandes rasgos se pueden ver en la figura 1.3.

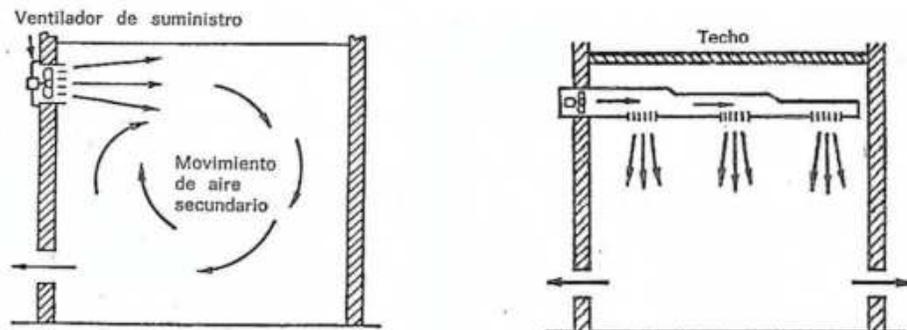


Figura 1.3: Algunas formas de inyección de aire. Izquierda: a través de un ventilador en la parte superior y salida inferior. Derecha: inyección a través de un ducto en el techo y salida inferiores. Adaptado de (Osborne, 1970).

Otra ventaja de los sistemas de inyección es que permite recircular el aire y así ahorrar calefacción en tiempo frío. Esto se logra mediante un registro de control. Así se puede regular la proporción de aire fresco y aire circulado, manteniendo el mismo volumen de inyección y movimiento de aire al interior.

c) Sistemas combinados

Estos pueden garantizar un mejor control de la ventilación y una distribución homogénea de aire. La distribución de aire en el local dependerá de los flujos de entrada (inyección) y salida (extracción). De igual manera, se seleccionan los ventiladores de entrada de aire para que den 20 % más volumen de aire que los de extracción, para evitar aspiraciones y entrada de polvo.

Por ejemplo, para espacios muy grandes se pueden usar inyectores en un lado y extractores en la pared contraria, como lo muestra la figura 1.4.

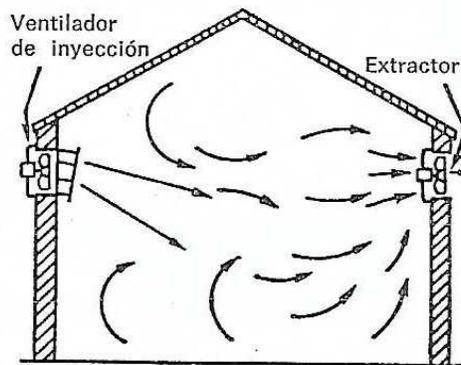


Figura 1.4: Sistema combinado de ventilación con inyección y extracción de aire por ventiladores helicoidales en posición contraria. Adaptado de (Osborne, 1970).

Para cualquier sistema que se emplee, será necesario calcular las pérdidas de presión que ocurran a través de todos los elementos como canalizaciones, accesorios, entradas, aberturas, etc.

1.4. Características y ventilación del STC

En esta sección se describen las características técnicas principales del STC metro que puedan ser de utilidad para los propósitos de esta tesis. La información que se muestra a continuación se obtuvo de varias fuentes que se reportan en su momento y que provienen ya sea de fuentes electrónicas o de las visitas que se realizaron a la exposición del STC "Motriz didáctica" en la estación San Lázaro y a la brindada en los talleres de mantenimiento en la estación Zaragoza. Se habla de los sistemas de ventilación del metro actuales a grandes rasgos, enfocándose en los vagones.

1.4.1. Características generales

El metro de la Ciudad de México es un sistema de transporte público masivo de alta afluencia que llegó a ocupar en 2006 el tercer lugar a nivel mundial en usuarios por día (Metropolí 2025, 2006). Es también de los más grandes del mundo en cuanto a extensión de su red. En el 2015 llegó a transportar a 5.3 millones de personas al día (Notimex, 2015).

De acuerdo al STC (2008), el metro se inauguró el 4 de septiembre de 1969 con un recorrido de las estaciones Insurgentes a Zaragoza a bordo de un tren modelo MP-68 construido por la empresa francesa Alstom. Desde entonces ha crecido sustancialmente en cuanto a extensión y a cantidad de usuarios.

Existen 16 modelos de trenes de metro, 12 son de rodadura neumática y 4 son tipo férreo que circulan por las diferentes líneas del sistema. Los trenes de rodadura neumática circulan por diez líneas y los de rodadura férrea por la línea A y 12. Cada modelo es diferente en cuanto a origen, fabricante, dimensiones, año de pedido, etc. Los principales fabricantes de los trenes que tiene el metro son Alstom, Construcciones Auxiliares de Ferrocarril (CAF), Constructora Nacional de Carros de Ferrocarril (CONCARRIL) y Bombardier. Cada modelo tiene una combinación de letras y números. Los números indican el año en el que se hizo el pedido. Por ejemplo, el modelo de tren FE-10 es del tipo férreo y se pidió en 2010.

Hay cuatro tipos de carros en un tren: carro motriz con cabina de conducción (M), carro motriz sin cabina (N), carro remolque (R) y carro remolque con equipo de pilotaje automático (PR). Cada tren puede estar en configuración de 9 o 6 carros respectivamente: M-R-N-N-PR-N-N-R-M y M-R-N-N-PR-M.

Los trenes de rodadura neumática obtienen la energía para su funcionamiento por medio de las barras guía ubicadas a los costados de las vías. Los trenes de rodadura férrea la obtienen por medio de catenarias instaladas en sus techos. La tensión a la cual se alimentan es de 750 VCC. En general, de acuerdo al STC (2008), las características técnicas del parque vehicular se muestran en la tabla 1.3.

El modelo de tren que se escogió simular para los experimentos es el MP-82, que se pensó pudiera representar a la mayoría de los modelos de trenes que se encuentran circulando en el sistema debido a su sistema de ventilación. Este circula por la línea 8 del metro y se cuenta con 25 trenes. Fue construido en Francia por la empresa Alstom y rehabilitado por Técnicos del Sistema de Transporte Colectivo-Alstom Mexicana, SA. de CV.

Tipo de carro	Rodadura neumática			Rodadura férrea		
	M	N	R	M	N	R
Longitud (<i>m</i>)	17.1	16.2	16.2	16.90	15.78	15.78
Ancho (<i>m</i>)	2.50			2.50		
Altura del piso (<i>m</i>)	1.2			1.2		
Altura riel a techo	3.60			3.60		
Velocidad máxima (<i>km/h</i>)	80			100		
Velocidad comercial (<i>km/h</i>)	35.5			42.5		
Peso vacío (<i>kg</i>)	28 930	27 830	20 837	26 564	24 680	21 116
Cap. máx. (pasajeros sentados)	38	39	39	38	39	39
Cap. máx. (pasajeros de pie)	132	131	131	118	121	121

Tabla 1.3: Características técnicas generales del parque vehicular neumático y férreo del metro de la Ciudad de México. Adaptada del sitio web oficial del STC (2008).

1.4.2. Ventilación en general y vagones

Estudiar la ventilación en el metro es un problema complejo y se puede atacar en distintos lugares dentro del sistema: estaciones, andén, túneles, interestaciones, vagones, etc. Cada uno de ellos contribuye en mayor o menor medida en la comodidad del usuario y se encuentran interrelacionados entre sí. Por ejemplo, el aire que entra en un momento a un vagón tiene las condiciones de temperatura del aire en el túnel o de las estaciones.

Cada lugar del sistema se ventila de diferentes modos. Por ejemplo, los túneles cuentan con salidas o canalizaciones por donde entra o sale el aire ya sea por efecto pistón, que consiste en el desplazamiento de aire por el mismo tren como si se tratara de un pistón (tren) dentro de un cilindro (túnel); por el arrastre de aire que ocasiona el metro detrás de él; o el ocasionado por ventilación natural o forzada. De acuerdo a datos del STC metro, las líneas más profundas con hasta 35 *m* de profundidad como la 7, que va de Barranca del Muerto a el Rosario, son las más complicadas de ventilar. En las estaciones puede ingresar o salir aire por los accesos de los usuarios y las hay al aire libre. Los vagones cuentan con puertas, ventanas, ventiladores y rejillas como elementos

de ventilación. Consecuentemente, es necesario estudiar cada parte del sistema por separado debido a su complejidad.

Por ejemplo, el hecho de que haya aire fresco al exterior del vagón, no significa que exista una completa y ventilación eficiente al interior, aún con las ventanas abiertas. Esto ha sido un problema complejo en la historia de la ventilación de los trenes hasta antes del aire acondicionado, como se reporta en White (1985).

Para explicar el sistema de ventilación de un vagón en general, se acudió a la exposición “Motriz didáctica” en la estación San Lázaro, donde se explican generalidades en carteles sobre información de operación del metro. Además, se complementó con información obtenida en una visita a las instalaciones de los talleres de mantenimiento en la estación Zaragoza. La información a continuación es resultado de esta investigación.

Los vagones de los trenes del STC metro no cuentan con un sistema de aire acondicionado como tal. Sin embargo, tienen un sistema de ventilación forzada que consiste en siete ventiladores instalados en el techo de cada vagón. Estos ventiladores tienen la función de proveer aire fresco al interior del vagón y disminuir las altas temperaturas del aire ocasionadas por las diversas fuentes de calor como son las personas, iluminación y maquinaria básicamente.

Un vagón cuenta con distintas aberturas. Se pueden mencionar las ventanas, rejillas superiores e inferiores y puertas. En el caso de las ventanas se han observado dos tipos: abatibles (o inclinables hacia adentro con el seguro arriba) y deslizables o corredizas hacia abajo. Las ventanas del tipo corrediza forman parte de los diseños originales de los trenes; sin embargo, el tipo de ventana abatible se incorporó a los nuevos pedidos de trenes por parte del STC, a partir del modelo NM-02.

Las rejillas que se encuentran debajo de las ventanas por la parte externa varían en posición, ya sea a nivel de las ventanas como en el tren modelo MP-82, o al nivel del piso como el tren modelo NM-73, y, en forma, como las rejillas en forma de agujeros del tren modelo español NE-92. Algunos trenes no tienen rejillas arriba de las ventanas, como es el caso el tren modelo FE-10 que circula por la línea 12. En este modelo el aire alimenta a los ventiladores por entradas arriba del techo. De acuerdo a información del STC, las rejillas son elementos del diseño original. Ejemplos de estos modelos de trenes del STC se muestran en la figura 1.5.

Imágenes del interior de algunos vagones del STC metro se pueden ver en la figura 1.6. En esta figura se pueden ver los diferentes tipos de ventana: corrediza (imagen izquierda) y abatible. También se observa en uno de ellos, el pasillo de intercomunicación entre vagones y otros elementos como los ventiladores de techo en ambos.



Figura 1.5: Diferentes modelos de trenes del STC metro. Obsérvese los elementos del sistema de ventilación de cada uno: ventanas, rejillas, puertas. Primera fila de arriba hacia abajo: MP-68R96C (izquierda), adaptada de STC (s.f.); MP-82 (derecha), adaptada de Inoyamanaka79 (2010). Segunda fila: NM-02 (izquierda), adaptada de picssr.com (sf); FE-10 (derecha), adaptada de GAED (2012).



Figura 1.6: Interior de algunos vagones del STC metro. Izquierda: interior de tren modelo NC-82 con ventanas corredizas, adaptada de Arau et al. (2012); Derecha: NM-02 al interior con ventanas abatibles y pasillo intercomunicado, adaptada de picssr.com (2012).

De acuerdo a uno de los carteles de la exposición mencionada, el funcionamiento del sistema de ventilación en un vagón es el siguiente: el aire exterior, que representa un 30 %, entra por las rejillas superiores succionado por los ventiladores en el techo, posteriormente circula al interior de los vagones, que representa al 70 % del aire, expulsando el aire caliente por las rejillas inferiores, para generar una sensación de frescura mediante el efecto Venturi.

Los ventiladores mueven el aire al interior del vagón, provocando una turbulencia que hace pasar el aire por las rejillas inferiores. Existen filtros detrás de las rejillas superiores e inferiores (en ambos lugares en los modelos MP-68, NM-73 y NM-79), que consisten en mallas metálicas finas para evitar la entrada de polvo y basura. Las rejillas inferiores además de que ayudan a que circule el aire dentro del salón de pasajeros, también equilibran la presión del aire entre el interior y exterior del vagón. El sistema de ventilación permite la circulación teórica de $14\ 000\ m^3/h$ de aire. El consumo de cada uno de los ventiladores es mínimo: de 0.5 A y 1/4 de hp. Como se puede deducir, el sistema de inyección de aire al interior provoca una ligera sobrepresión con respecto al exterior.

Dentro del metro hay sistemas más eficientes; por ejemplo, los trenes de la línea A que va de Pantitlán a La Paz. En esta los trenes son más altos y el aire entra por la parte del techo (así como en la línea 12). Además, en los trenes con comunicación entre vagones como los de la línea 2 y 12, la ventilación provoca mayor sensación de frescura y movimiento interno de aire, ya que este adquiere un mayor impulso. Una de las aspiraciones es llegar a tener la comodidad o ventilación similar a estos trenes.

De acuerdo a información brindada por el STC, el sistema de ventilación forzada (ventiladores) que emplean los trenes como los modelos: MP-68, NM-73, NM-79, NC-82, MP-82 y NM-83, fue instalado y adaptado por parte del STC.

La estructura interna de las rejillas de ventilación inferiores para un modelo de tren similar al estudiado se puede observar en la figura 1.7. Como se puede ver, las rejillas exteriores debajo de la ventana comunican por medio de un canal (cubierto normalmente) con las rejillas interiores ubicadas al nivel del piso. La razón de esta disposición no es del todo clara y probablemente sirvan también para disipar el calor del interior o para igualar las presiones internas y externas.

En cuanto a la alimentación de aire hacia los ventiladores, se observó que después de pasar por los filtros de las rejillas superiores, su camino es complicado y accidentado entre varios huecos de la estructura interna del vagón por encima del techo de la cabina hacia la caja de los ventiladores.



Figura 1.7: Izquierda: estructura interna de las rejillas de ventilación, debajo de la ventana y vistas por dentro, de un vagón de la exposición “Motriz didáctica”. Derecha: estructura interna de un vagón NM-83 desmantelado en desuso en talleres de mantenimiento de Zaragoza. Elaboración propia.

Cada ventilador necesita mantenimiento frecuente ya que el polvo acumulado en los canales, filtros, mallas puede provocar que el ventilador no funcione adecuadamente o se desbalancee. Los filtros de aire se quitan y se lavan cada 28 días. A pesar de esto último, es probable que en los ventiladores, rejillas y canalizaciones, la caída de presión sea suficiente para que el ventilador funcione pero solamente circulando o agitando el aire viciado al interior. Además, cabe la posibilidad de que el aire viciado que sale por las ventanas, vuelva a entrar por las rejillas de succión de los ventiladores, sin que exista realmente un suministro de aire fresco. Esto no se ha estudiado. Para visualizar el sistema interno de la ventilación, se pueden ver las imágenes de la figura 1.7, que muestran la estructura de vagones fuera de operación.

Se han hecho pruebas y mediciones del gasto volumétrico mediante anemómetros, que presentan los distintos tipos de ventiladores. Estas pruebas hechas en los talleres del STC fueron estáticas, en un vagón en reposo. Se encontró que distintos modelos presentan diferente caudal, siendo menores los de trenes antiguos o los que se encontraban obstruidos por tierra y polvo. Además de esto, se han hecho pruebas de visualización con caja de humos para observar la inyección de aire de los ventiladores. Se reportó que

una vez que el aire es inyectado, la mayor parte sale por las ventanas.

Aparte de estas pruebas y mediciones, se conoce con poca precisión la distribución de aire dentro de un vagón y la contribución que tienen las ventanas, rejillas, ventiladores y puertas a la ventilación bajo diferentes condiciones de operación. Es interesante también corroborar la información que se presenta en los carteles; ya que como se mencionó en la sección de motivación, existe aún la incomodidad principalmente en temporada de calor y horas pico dentro del vagón. Para atender el problema, el mantenimiento efectivo no necesariamente es la única o mejor solución. Los flujos de aire dentro del vagón pueden ser complicados y muchas veces el aire no se comporta como se esperaba. El estudio realizado en esta tesis busca dar respuesta a estas preguntas. Con base en ello, se pueden proponer soluciones a favor de la ventilación.

1.5. Estudios y soluciones implementadas

1.5.1. Alternativas de solución del STC metro

El STC metro ha realizado diversas acciones para contrarrestar el problema de las altas temperaturas dentro de sus instalaciones. Un ejemplo de esto es el proyecto Fideicomiso Maestro del Metro, donde se describen 11 compromisos para mejorar el sistema STC (2014). Uno de ellos es la adquisición y sustitución de 3705 ventiladores para salón de pasajeros y 258 motocompresores. La razón de esto, porque muchos ya superaron su vida útil, no existen refacciones o se encuentran en mal estado. En un comunicado de prensa del STC (2015), se mencionan avances en el tema.

Recientemente, se instalaron equipos nuevos de ventilación (turboventiladores) en la línea 7 del metro, la más profunda de la red. Se comprobó que la temperatura disminuyó 6 grados hasta 32 °C en estaciones como Constituyentes y dentro de los vagones. Aunque haya sido una mejora importante, se siguen sintiendo los efectos del calor (Bahena, 2017).

Otras alternativas de solución que el STC metro propuso en 2003 y que algunas se han puesto en práctica para disminuir las temperaturas y mejorar el confort, son:

1. Aumentar la humedad relativa de las estaciones con hidroventiladores y nebulizadores, con el fin de estar dentro de la zona de confort que establece la norma oficial mexicana NOM 001 de la Secretaría del Trabajo y Previsión Social [STPS] (2008), en el apartado de guía de referencia I, “Ventilación y confort”. Estas condi-

ciones son de 24.5 ± 1.5 °C y humedad relativa en el rango de 20-60 % en centros o áreas de trabajo durante temporada de calor. Las condiciones anteriores se pueden usar de referencia para obtener el confort térmico.

2. Prohibir en las estaciones el uso de hornos eléctricos, refrigeradores, planchas, waffleras, máquinas para hacer palomitas y otros. Estos aparatos generan calor y pueden aumentar en 5 °C la temperatura de la estación. Todavía no se implementa en todas las estaciones pero en algunas sí se han removido este tipo de aparatos como en la estación Hidalgo en 2015.
3. Las turbinas de la ventilación mayor en las estaciones se pueden modificar y cambiar el sentido de giro bajo tiempos preestablecidos de arranque y paro. Esto puede ahorrar energía, evitar generar más calor y extraer el mismo más eficientemente.
4. Invertir el sentido de giro de los ventiladores dentro de los vagones para que funcionen como extractores. Esto se encuentra en etapa de pruebas.
5. Colocar equipo de enfriamiento en las estaciones tipo aire acondicionado en temporadas de calor.
6. Utilizar el agua fría de los cárcamos de las estaciones y bombearla para nebulizarla en los andenes, disminuyendo la temperatura e incrementando la humedad relativa.

Aparte de estas alternativas se han llevado a cabo programas de hidratación para los usuarios.

1.5.2. Soluciones en otros metros del mundo

El problema de las altas temperaturas no es exclusivo del metro de la Ciudad de México y existe en muchos sistemas de transporte similares alrededor del mundo. La información que se presenta en esta sección antes de Estudios Realizados, fue gracias a la proporcionada por el STC metro.

Por ejemplo, en el metro de Madrid se ha puesto en práctica la ventilación por “free cooling”. Esta consiste en aprovechar las condiciones al exterior de menor temperatura para enfriar el ambiente interno por una combinación de ventilación natural y forzada controlada. A su vez, en 2009 se implementó en la estación Pacífico un sistema de aire acondicionado empleando energía geotérmica para calefacción y refrigeración. En

el metro de Barcelona se emplea ventilación forzada por conductos, así como en la línea 7 del STC metro. También se emplea el enfriamiento evaporativo haciendo circular grandes flujos de aire con alto contenido de humedad.

También es el caso del metro de Milán que usa ventiladores con aspersión de agua en las estaciones, similar a los que existen por ejemplo en la línea 3 del STC metro, en la estación Hidalgo.

Otros metros del mundo como el de Santiago de Chile incorporan aire acondicionado en sus trenes más nuevos. En el metro de Caracas se emplean chillers en la estación de Palo Verde. Estas unidades son similares al aire acondicionado. En el metro de Panamá se emplea aire acondicionado. En el metro de Argentina, se están readaptando los trenes con mucha antigüedad para dotarlos de aire acondicionado y extracción de aire en los andenes.

En el metro de Atlanta se están usando sistemas similares a lavadoras de aire, que proveen aire fresco en lugares abiertos donde el aire acondicionado es poco práctico o costoso.

En los metros de Shanghai, Guanzhou, Beijing y Honk Kong se emplea aire acondicionado controlado de acuerdo a la norma UIC 553 (Unión Internacional de Ferrocarriles). Esta norma francesa es especial para ambientes térmicos dentro de este tipo de vehículos.

Existen otras normas que se han especializado en el tema del confort térmico al interior de los vagones, por ejemplo, se tiene la guía 23-2016 emitida por la ASHRAE, que surge de la necesidad de poner en práctica de una manera más inteligente y la correcta aplicación de sistemas de aire acondicionado para evitar gastos innecesarios (Scott, 2016). En la página de internet citada, se menciona que estos sistemas de transporte presentan un mayor desafío para diseñar que sistemas de aire acondicionado de edificios, debido a que el equipo en trenes presenta mayor desgaste por condiciones ambientales, de operación, etc.

Otro ejemplo de norma técnica que se enfoca en las condiciones de confort dentro de vehículos de diversos tipos, es la publicada por la (International Organization for Standardization, 2007) ISO/TS 14505.

1.5.3. Estudios realizados

El tema de la ventilación no es nuevo y en esta sección se presenta información resumida en cuanto a la investigación realizada para los propósitos de esta tesis. Existen

pocos estudios, al menos accesibles, que hayan hecho mediciones de PIV bajo las mismas condiciones que se realizaron en el experimento para trenes suburbanos. Aunque esta tesis está enfocada en estudiar y mejorar el sistema de ventilación de un medio de transporte como el metro, existen muchos estudios en otros medios y lugares como estaciones, andenes, automóviles, edificios, etc., que pueden ayudar a comprender mejor el problema y que buscan la misma finalidad para obtener condiciones de comodidad.

La ventilación en medios de transporte como trenes, ya sea suburbanos o no, tiene antecedentes poco después de que aparecieron los primeros en el siglo XIX. El control de esta ha sido y fue un problema hasta la aparición del aire acondicionado (White, 1985). De acuerdo al autor, que hace un recuento histórico del tema, asegurar la entrada de aire fresco era más complicado que la extracción del aire viciado al interior. El problema de la entrada de aire era controlar su pureza, ya que entraba con gases de combustión, polvo y cenizas en los trenes de vapor. La extracción generalmente se realizaba a través de campanas de ventilación en el techo o a través de ventilas en la parte superior, aunque también se reportan diseños de extracción y suministro distintos para favorecer la entrada de aire. En el libro se reporta también diseños de varios ingenieros que se interesaron en el tema y pusieron en práctica sus inventos en trenes de Estados Unidos. Otro problema de la entrada de aire es que era poco efectiva aunque las ventanas estuvieran abiertas (el aire que podía entrar, salía inmediatamente) y sólo un diseño adecuado de circulación podría favorecer la entrada. Los diseños que se mencionan aprovechaban el movimiento del tren para introducir aire al compartimento de pasajeros por medio de conductos que limpiaban con tanques de agua en cierta medida el aire. Las principales demandas de la época eran que la ventilación en este medio de transporte era muy deficiente y que se debía hacer algo al respecto. Como se puede ver, garantizar una buena ventilación natural es complicado y no necesariamente se soluciona abriendo las ventanas.

Para continuar con estudios recientes, se puede hablar directamente de un estudio muy relacionado con los propósitos de esta tesis, que se hizo en el metro de la Ciudad de México. San Román Gutiérrez (2004) estudió la ventilación del metro realizando mediciones de velocidad de aire y ruido en trenes reales de la línea 1 y 3. Sus mediciones dieron un indicativo del orden de magnitud de las velocidades del aire dentro de un vagón, que no superan en general los 2 m/s . Encontró que la ventilación es más deficiente en trenes de mayor antigüedad que en trenes más modernos. En los trenes antiguos, los ventiladores estaban desbalanceados y no satisfacen la ventilación de diseño ($14\ 000\text{ m}^3/h$). Encontró también que la velocidad disminuía conforme aumentaba la distancia

al centro de los ventiladores. La velocidad en las rejillas de evacuación fue prácticamente nula. Observó además que hubo variaciones de velocidad del aire muy marcadas a lo largo del vagón y entre vagones; con pocos patrones de comportamiento del aire, a excepción de la zona cerca de la pared entre las ventanas y las puertas, donde “la infiltración de aire es máxima”, favoreciendo a los pasajeros únicamente de esa zona. A pesar de que los ventiladores más modernos dieron el gasto volumétrico cercano al de diseño, la distribución de aire no fue la más conveniente. Por último concluye que es necesario un rediseño del sistema de ventilación.

Relacionado también con el metro de la Ciudad de México, se encontró una tesis que busca mejorar las condiciones de confort dentro de las instalaciones. Para ello, se diseñó y construyó un prototipo para probar que se pueden usar intercambiadores de calor para enfriar los túneles del STC y reducir las temperaturas en general de una manera económica. El calor se podría transferir del aire caliente de los túneles a la tierra circundante, que presenta pocas variaciones de temperatura, por medio de tuberías de material conductor (Guzmán Velázquez, 2011).

Por otro lado, se investigaron casos en otros medios de transporte, con metas comunes para la ventilación y comodidad. En un estudio muy particular y similar al de esta tesis, se analizó el flujo interno de un autobús urbano de pasajeros en movimiento y con las ventanas abiertas. Fue hecho en un modelo a escala, en un camión real y por una simulación numérica por computadora (CFD). Esto con el motivo de mejorar la ventilación natural donde el aire acondicionado es poco práctico debido a varios factores como el costo. Kale et al. (2007) mencionan que existen pocos estudios similares con las ventanas abiertas. Encontraron que el flujo entraba por las ventanas posteriores, viajaba en dirección contraria al flujo externo y salía por las ventanas frontales. En la cercanía con las ventanas centrales observaron un escaso flujo alternado de entrada y salida. El flujo que entraba por la parte posterior se observó ya mezclado con el aire exterior; indicando que el aire que entraba no era completamente el mismo que salió antes por la zona frontal. Observaron que el flujo eran altamente turbulento y tridimensional. Estimaron que las velocidades al interior del camión fueron un orden de magnitud menores al flujo externo principal. Sus resultados mostraron buena congruencia para modelo, camión y simulación a pesar de la diferencia en los números de Reynolds entre experimento y simulaciones.

Un ejemplo de aplicación o coincidencia con el estudio anterior, se pudo encontrar para la actividad del transporte de animales. En unas guías, Kettlewell y Mitchell (2005) y Kettlewell et al. (sf) mencionan así mismo, que el flujo natural al interior de

un vehículo se da principalmente de la parte posterior a la parte frontal. Explican que esto es debido a que el aire crea una zona de baja presión al separarse del borde frontal, generando succión al frente. Sin embargo, este flujo por sí solo depende del movimiento del vehículo y dirección del viento. Es por esto que recomiendan la instalación de ventiladores en zonas estratégicas; como ventiladores en la parte frontal de extracción y accesos en la parte posterior. De esta manera se garantiza una ventilación adecuada para evacuar el calor y humedad procedentes de los animales, que sufren estrés con escasa ventilación.

Como ya se mencionó anteriormente, el confort térmico depende de varios factores, principalmente de la ventilación. Continuando con el ámbito de los trenes (suburbanos, interestatales, etc.) se encontró la siguiente información. Existen estudios que hablan sobre la influencia que tiene la ventilación en la distribución de temperaturas. Para obtener confort, esta distribución debe ser lo más homogénea posible. Para ello, se necesita que el aire en el espacio tenga mezclado de las diferentes capas de fluido. Por ejemplo, Cho et al. (2015) estudiaron en particular el efecto que tiene el mezclado de aire en la distribución de temperaturas dentro de una cabina de vagón de metro real sin pasajeros. Aunque el estudio fue realizado para motivos de calefacción (situación diferente al metro de la Ciudad de México), encontraron que al incrementar el número de ventiladores, la diferencia de temperaturas en dirección vertical se reducía sin que la temperatura promedio cambiara demasiado.

Kwon et al. (2012) estudiaron por una simulación numérica con elementos finitos (CFD-*Computer Fluid Dynamics*) el efecto que tenía la operación de extractores de aire combinados con aire acondicionado de suministro y rejillas de retorno en el campo de velocidades, temperaturas y concentración de dióxido de carbono en la cabina de pasajeros del metro de Seoul (de los más congestionados del mundo). Encontraron que las temperaturas y la concentración de dióxido de carbono e incomodidad fueron mayores para el caso sin extracción que con extracción a los extremos de la cabina.

Berlitz y Matschke (2002) hicieron una simulación en el programa Fluent junto con mediciones a escala real de temperaturas y velocidades en un plano a lo ancho del vagón. Mencionan que los estándares de ventilación establecen las condiciones finales de confort, pero no dicen cómo hacerlo ni cómo deben ser los patrones de flujo o elementos de ventilación. Estos aspectos técnicos son muy importantes para lograr el confort térmico. Inicialmente pensaron que la contribución del flujo estaría principalmente en dirección a lo ancho por las ventanas; sin embargo, observaron que el flujo era altamente turbulento, tridimensional y dependiente del tiempo. Para obtener resultados válidos y

precisos, fue necesario conocer con exactitud las condiciones de frontera.

Yuan y You (2007) estudiaron la eficiencia de la ventilación en un andén del metro de Beijing mediante una simulación numérica por CFD. Sus resultados demostraron que el flujo de aire era turbulento y transitorio. Observaron que la ventilación en el andén no necesariamente era buena para el nuevo diseño de estación, ya que la distribución de velocidad de aire y de temperaturas estaba desbalanceada. Debido a esto, propusieron una optimización para obtener una distribución más homogénea de velocidades y temperaturas. En las zonas de estancamiento de aire, la temperatura fue mayor que en las zonas de alta velocidad. Este efecto adverso se podría esperar dentro de un vagón si las corrientes de aire están desbalanceadas.

Uno de los fenómenos estudiados en la ventilación de trenes suburbanos es el efecto pistón. Este consiste en el desplazamiento de aire en los túneles realizado por los trenes tanto al frente de ellos como el arrastrado en la parte trasera. Aunque no sea el enfoque de esta tesis, se pueden extrapolar algunas cuestiones. Por ejemplo, Yáñez Coto (2015) estudió por CFD la influencia que tenían variables como el área libre transversal del túnel (coeficiente de bloqueo), longitud y velocidad del vagón en el flujo másico utilizable para ventilación. Encontró que a mayor coeficiente de bloqueo, el flujo másico fue menor. Debido a esto se concluyó que era deseable diseñar túneles con amplio espacio entre el tren y las paredes del túnel.

Otro estudio realizado por Chow (2002), al interior de un vagón, se enfocó en analizar la ventilación que tiene efecto en la calidad del aire en cuanto a concentración y distribución del dióxido de carbono exhalado por los pasajeros. En el estudio se concluye que el aire fresco debe ser suministrado por arriba de los pasajeros, ya que abajo el espacio está ocupado. También concluye que una ventilación controlada de transición es preferible para adaptarse a las condiciones de concentración de personas, evitando corrientes molestas cuando el vagón se encuentre vacío. Para garantizar una uniforme distribución de temperaturas y aire fresco, concuerda en que aumentar la intensidad de turbulencia es bienvenida.

En el ámbito automotriz, Zhang et al. (2009) realizaron una simulación numérica por CFD y experimentación para estudiar los campos vectoriales de velocidad y campos de temperatura dentro del compartimento de dos modelos de automóvil distintos. En ese estudio se encontró que en general la circulación del aire acondicionado con las ventilas centrales en posición horizontal, provocó una distribución de temperatura bastante homogénea. En las zonas donde había poca circulación, la temperatura fue mayor y menor en zonas de alta velocidad como la zona libre de flujo entre los asientos delan-

teros. Obtuvieron buena congruencia entre simulaciones y mediciones experimentales. Concluyeron que para reducir la diferencia de temperaturas vertical, sería necesario aumentar el flujo a nivel de los pies. También concluyeron que la sensación de confort se ve influenciada por el número de personas; tal y como se ve que ocurre en el STC metro.

Singh et al. (2015) hicieron una simulación y mediciones experimentales para estudiar el efecto del ángulo de la salida de aire por las ventilas frontales y su velocidad. En general hubo buena congruencia entre el estudio numérico y la experimentación en cuanto a predicción de temperaturas. Encontraron que a un ángulo fijo de las ventilas, la distribución de temperatura no fue homogénea; sin embargo, si estas ventilas se convertían en ventilas dinámicas (movimiento automático) para cubrir las posiciones de 30 a 60°, la distribución de temperaturas era más homogénea, globalmente menor y de enfriamiento más rápido. A mayor velocidad de salida por las ventilas, se tuvieron mínimos en temperatura locales, pero una distribución poco uniforme. También mencionan que la ubicación y número de salidas de aire dentro del automóvil afecta en gran medida al campo de velocidades y la distribución de temperaturas.

Lee et al. (2011) realizaron un estudio de los diferentes modos de flujo de aire acondicionado en un coche a escala real, mediante la técnica de PIV y simulaciones numéricas. Encontraron que los patrones de flujo eran diferentes para diferentes planos de medición a diferencia de las simulaciones, que no consideraron geometría compleja como el volante o forma del techo. Además el flujo cambiaba mucho si se cambiaba el modo de ventilación. A pesar de esto, concluyeron que los patrones de flujo en general no cambiaron mucho si cambiaba la tasa de flujo de aire y que el flujo interno era complejo, tridimensional y turbulento.

Como se mencionó anteriormente para que exista confort, un ambiente requiere de condiciones estimulantes; es decir, de corrientes variables en cierta medida. Las corrientes variables se pueden medir por medio del parámetro de la intensidad de turbulencia.

Existen distintos estudios que involucran a este junto con otros parámetros para evaluar el confort térmico en distintos ambientes. Por ejemplo, Xia et al. (2000) estudiaron el impacto que producen corrientes de aire turbulentas en la sensación térmica de ambientes relativamente cálidos (26 a 30.5 °C; 35 y 65 % de humedad relativa; Intensidad de turbulencia: 25 y 40 %). En el experimento con varias personas, encontraron que la temperatura promedio, la humedad relativa, la intensidad de turbulencia y la percepción de cada quien, fueron factores clave para determinar la velocidad (ajustable) de una corriente principal de aire. Si la temperatura y humedad relativa aumentaban a

una intensidad de turbulencia constante, la velocidad de aire preferida aumentaba. Por otro lado, concluyeron que para ambientes cálidos, la intensidad de turbulencia redujo el riesgo de enfriamiento local incómodo (*drafts* en inglés). A su vez, indicaron que si la turbulencia aumentaba mucho, la velocidad preferida principal decaía; siendo esto una ventaja energética para el caso de mantener el confort a una velocidad menor. También encontraron que a altas temperaturas, una velocidad alta provocó una sensación de incomodidad por secado en la piel. Además se menciona en el artículo que desde el punto de vista de la estadística, la intensidad de turbulencia puede ser indicativo de la intensidad de mezclado de diferentes capas de fluido y por lo tanto distribución de temperaturas más homogéneas. Así mismo, que esta variable acelera el flujo convectivo de transferencia de calor. En ambientes calurosos como el que representaron fue beneficioso; sin embargo, en ambientes de moderados a fríos (menores a $23\text{ }^{\circ}\text{C}$) esto no es conveniente, como lo reportan (Griefahn et al., 2000).

Otros estudios como el de Palacios-Morales et al. (2016), también indican que la intensidad de turbulencia es deseable para un buen mezclado en el ámbito de cultivos celulares.

Se pueden rescatar ciertos aspectos de los estudios mencionados anteriormente en esta sección. En general, las simulaciones numéricas mostraron concordancia con sus pruebas experimentales. En la mayoría se observó que en las zonas de baja velocidad, las temperaturas fueron mayores. El mezclado y distribución de temperaturas depende de la intensidad de turbulencia; siendo más homogénea la distribución cuando su valor es mayor. La geometría fue de gran influencia para todos los estudios. Es necesario estudiar la ventilación y sus aspectos clave para diseñar o mejorarla en lugares estratégicos mediante la combinación de ventilación natural y forzada.

Capítulo 2

Diseño experimental

En este capítulo se describe el proceso de diseño y características del modelo experimental construido, similar a un vagón de metro del STC. A su vez se explica la disposición de los experimentos realizados y descripción del equipo utilizado para la técnica de PIV y visualización. Por otro lado, se explica de manera general la técnica de medición que se usó para obtener los campos de velocidad al interior del modelo. Finalmente, se explica el procesamiento de datos realizado con el software *DynamicStudio 2015a* y *Matlab R2014a*. Este último permitió obtener información adicional a partir de los campos vectoriales de velocidad obtenidos como son la vorticidad, intensidad de turbulencia, perfiles de velocidad promedio, líneas de corriente, gasto volumétrico por unidad de longitud y gasto volumétrico adimensional.

2.1. Técnica de PIV

La técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV por sus siglas en inglés) es un método de medición óptico, que permite obtener información sobre los campos de velocidad de un fluido en movimiento. Actualmente, la técnica se usa mucho en investigación y en la industria por ser muy versátil y precisa; la versión digital tiene alrededor de treinta años en desarrollo. La técnica tiene aplicaciones en distintas disciplinas donde haya fluidos como en la aviación, energía, transportación, flujos biológicos, etc. (Dantec Dynamics A/S, sf) y (Jahanmiri, 2011). La información que aquí se presenta se trata de un resumen que se basó en los manuales del software de PIV de Dantec Dynamics A/S (2002; 2005; s.f.).

2.1.1. PIV-2D2C. Principio y método

El método consiste en introducir al flujo que se desea medir partículas que sean capaces de seguir o representar el movimiento del fluido, con características que se describen en esta sección. Se hace pasar una cortina de luz láser por la zona de medición. Las partículas reflejan la luz proveniente del láser y son capturadas por una cámara digital. En algunos casos, la luz de la hoja láser se emite de manera pulsada, de manera que “congela” la posición de las partículas en dos imágenes sucesivas, separadas por un intervalo de tiempo Δt conocido. Estas imágenes son capturadas de manera sincronizada por la cámara y usualmente guardadas como cuadros llamados en inglés *frame 1* y *frame 2*.

La imagen se divide en una malla compuesta por pequeñas zonas llamadas áreas de interrogación. Cada área mide una longitud de unos cuantos píxeles de largo y ancho (del orden de 8 a 64 píxeles). Dentro de cada área, cierto número de partículas son detectadas por el sensor de la cámara digital. La cantidad depende de varios factores como la calidad del sembrado (buena concentración de partículas: un aproximado de entre 10 a 25 partículas observables en cada área de interrogación es satisfactorio), iluminación, enfoque, resolución de la cámara, entre otros. El arreglo experimental común que se emplea se puede ver en la figura 2.1, que fue obtenida del manual de usuario de Dantec Dynamics A/S (2005).

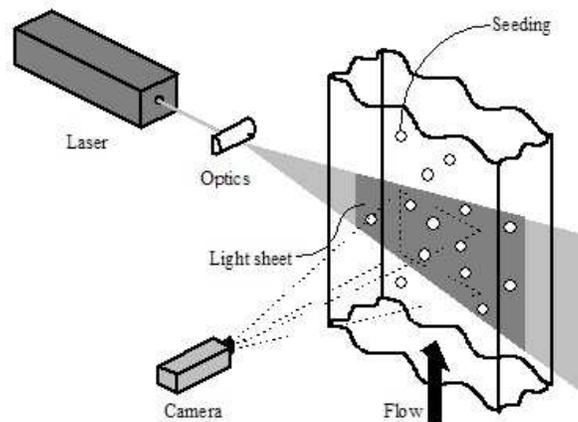


Figura 2.1: Principio de la técnica PIV. Dantec Dynamics A/S (2005).

Por medio de algoritmos matemáticos como la correlación cruzada, el software puede calcular el desplazamiento promedio ΔX de las partículas comparando ambos cuadros.

Dividiendo el desplazamiento promedio de las partículas entre el intervalo de tiempo conocido, se obtiene un vector de velocidad promedio instantáneo para cada área de interrogación. Una vez obtenida la correlación para cada área, se obtiene el campo vectorial de velocidad completo de la imagen. Así mismo, el software calcula la velocidad en metros por segundo (m/s) usando un factor de escala, que relaciona el desplazamiento de las partículas en la imagen (píxeles) con el desplazamiento real. Para ello se realiza una calibración previa con un objeto, enfocado en el plano de medición de la hoja láser.

Para este trabajo se utilizó la técnica de PIV en dos dimensiones o PIV-2D2C, donde se pudo obtener información del campo vectorial de velocidades con dos componentes (v_x, v_y) en un plano. Sin embargo, existe la técnica PIV-Stereo o PIV-2D3C que utiliza dos cámaras en un arreglo estereoscópico para obtener información de la tercera componente de velocidad en el plano.

Dentro del campo vectorial obtenido pueden existir vectores válidos y no válidos. Esto se determina analizando el nivel de confianza del cálculo en términos de la ‘altura’ del máximo pico-señal de la función correlación cruzada en relación al siguiente pico correspondiente al ruido de la misma señal; es decir, la relación señal/ruido, conocido comúnmente en inglés como *Signal to Noise Ratio*. Si esta relación es suficientemente alta, el vector es considerado válido (ver figura 2.2). La correlación es deficiente cuando en el área de interrogación no existe buena señal proveniente de las partículas. En otras palabras, la relación señal/ruido es baja para este caso. Esto puede deberse por varias razones; por ejemplo, que no exista un buen sembrado de partículas en el flujo, que la hoja láser no esté bien alineada o no ilumine suficientemente bien, que el intervalo de tiempo entre pulsos del láser no sea el adecuado, entre otras causas.

La función de correlación cruzada que se realiza sobre cada área de interrogación (AI) se muestra a continuación:

$$C(s) = \iint_{AI} I_1(X) \cdot I_2(X - s) dX \quad (2.1)$$

donde $C(s)$ es la función de correlación cruzada que compara dos funciones mediante una integral doble para funciones continuas o una sumatoria doble para funciones discretas, sobre todas las áreas de interrogación; $I_1(X)$ es una función que representa la intensidad de luz de cada área de interrogación comparada con su análoga $I_2(X - s)$ después del intervalo de tiempo de medición; X es la localización del área de interrogación y s es un desfase en el dominio s . Cuando el resultado de la correlación o pico de la señal es máximo, se puede considerar que la correlación es buena y su

valor corresponde al desplazamiento promedio de las partículas dentro de cada área de correlación.

Es de resaltar que el tiempo entre pulsos es crítico para poder obtener buena correlación y observar las estructuras de flujo. Debe ser el adecuado para que el vector desplazamiento promedio de las partículas sea menor al tamaño de cada área de interrogación; o en otras palabras, que durante el intervalo entre pulsos, la mayor cantidad de partículas se hayan desplazado dentro del área de la misma área de interrogación. A mayor velocidad de flujo, se requerirá un menor tiempo entre pulsos; ya que de lo contrario, la correlación será baja debido a que las partículas salieron del área antes de capturarlas. Si este intervalo tiempo es muy largo, también hay posibilidad de escasa correlación. Es por ello, que antes de las mediciones se debe ensayar para encontrar el intervalo de tiempo adecuado a la velocidad del flujo, usando las validaciones que se mencionan en esta sección para obtener una buena correlación. También se puede usar la siguiente fórmula que esencialmente se basa en la máxima velocidad medible dentro de cada área de interrogación:

$$\frac{\frac{s'}{s} v \delta t}{d_{IA}} < 25 \% \quad (2.2)$$

donde $\frac{s'}{s}$ es el factor de magnificación entre objeto e imagen, v la velocidad promedio, δt el tiempo entre pulsos y d_{IA} el tamaño de cada lado del área de interrogación.

La correlación cruzada puede representarse en la forma del esquema mostrado en la figura 2.2, obtenido de LaVision GmbH (sf).

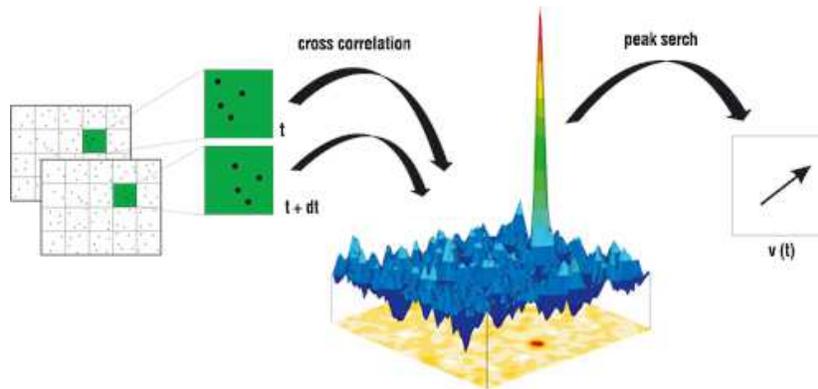


Figura 2.2: Correlación cruzada empleada en PIV. LaVision GmbH (sf).

2.1.2. Equipo

Láser: El láser es la fuente de iluminación. Provee los pulsos de luz para congelar el movimiento de las partículas en el intervalo de tiempo conocido. Este intervalo es ajustable y existen láseres para aplicaciones de alta frecuencia de medición (Δt muy pequeño). El tipo que se emplea comúnmente es de clase IV, estado sólido Nd:YAG. La luz que genera puede ser dañina para piel y ojos si no se usa protección adecuada como lentes especiales.

Los pulsos del láser son de corta duración, del orden de 5-10 *ns*. En cuanto a las aplicaciones son muy versátiles y pueden ser de 15, 30, 50, 120, 200, 400 *mJ* o más a 532 *nm* de longitud de onda. Esta última se puede ajustar para aplicaciones como fluorescencia inducida por láser (LIF). Existen láseres de simple o de doble cavidad que emiten luz a través de dos lámparas o una. Los de doble cavidad son más utilizados ya que ambos pulsos se emiten con un nivel similar de intensidad de luz, a diferencia de uno donde el segundo disparo del Q-switch sale con menor energía.

A la salida del láser normalmente se tiene un lente cilíndrico, que convierte el haz en forma de rayo a forma de hoja.

Cámara y óptica: Las cámaras que se emplean en PIV normalmente son digitales con un sensor CCD/CMOS, que consiste en un arreglo de pixeles que influyen para determinar la resolución de vectores. A mayor número de pixeles, mayor resolución y vectores. Cada pixel es un receptor fotosensitivo que convierte la información de luz incidente en voltaje en un pequeño capacitor. La imagen se traduce como una escala de grises o niveles de iluminación. En las cámaras de PIV se puede trabajar en el modo de autocorrelación o de correlación cruzada. El segundo es el más exacto y utilizado. En este la información de imagen correspondiente al primer pulso del láser es guardada en el cuadro 1 y la correspondiente al segundo pulso es guardada en el cuadro 2. El intervalo entre pulsos del láser y de captura simultánea de la imagen puede ser tan pequeño como de 500 *ns*.

Cada cámara tiene una arquitectura de su sensor o chip distinta e influye en la resolución. A su vez, estas cámaras están adaptadas para aplicaciones con baja iluminación. Existen ciertos parámetros como el tiempo de exposición que controla la apertura del diafragma para permitir que entre más o menos luz al sensor.

El número de vectores depende de los siguientes factores: resolución en pixeles

de la cámara, tamaño del área de interrogación en pixeles y traslape entre áreas de interrogación principalmente. El traslape (*overlap*) se expresa en porcentaje y permite obtener más vectores, ya que usualmente la correlación no es muy buena en los bordes del área de interrogación. Al efectuar un traslape, se obtiene una zona adicional de información del flujo. A mayor resolución en pixeles, mayor detalle en las estructuras de flujo.

A la cámara se le puede acoplar un arreglo óptico como lentes que permitan hacer un zoom o aumentar o disminuir el campo de visión, etc.

Sembrado de partículas: Las partículas que se emplean deben seguir al flujo sin modificar sustancialmente sus estructuras. Para ello, se necesita que las partículas tengan idealmente flotabilidad neutra; es decir, aproximadamente la densidad del fluido en el cual están inmersas. Deben ser lo suficientemente pequeñas para seguir el flujo y reflejar sus estructuras (vórtices pequeños, etc.) y lo suficientemente grandes para dispersar la luz del láser para que la cámara las detecte. De acuerdo a Durst et al. (1981), las partículas deben: seguir al flujo, dispersar la luz, no ser tóxicas, ser económicamente sencillas de generar, químicamente inactivas, poco volátiles y anticorrosivas. Normalmente se emplean partículas esféricas del orden de 5 a 100 μm . Sin embargo, las partículas usadas dependen de la medición y el fluido utilizado.

Ejemplos de partículas utilizadas para aire: alúmina en polvo, glicerina, aceite de silicona atomizado, vapor de agua atomizado con inhibidor para evaporación, polvo de óxido de magnesio y otros aceites especiales. Generalmente son más pequeñas que las usadas en agua.

Ejemplos de partículas utilizadas para agua: polvo de aluminio, burbujas muy pequeñas, microesferas de vidrio o poliestireno, polen de pino.

Sincronización: El sincronizador es muy importante. Este es un dispositivo de control de disparo simultáneo del láser y la captura de la imagen. Se puede tener una precisión de sincronizado del orden de 1 ns . Existen también circuitos para desfazar la captura con el disparo del láser. Mediante la computadora se especifica la frecuencia entre cada par de disparos, siendo cada disparo uno para el cuadro 1 y el otro para el cuadro 2. El tiempo entre disparos individuales se especifica también y puede ser del orden de microsegundos.

2.1.3. Procesamiento y filtrado

Una vez guardadas las imágenes en la computadora, se realiza el procesamiento de imágenes a través del programa *DynamicStudio 2015a*. En este programa se utilizan algoritmos de correlación cruzada para obtener el campo de velocidades del flujo y además se aplican distintos procesos para filtrado y validación de datos. Posteriormente de ser validados, los datos se pueden exportar a otros programas como *Matlab* como archivos de texto para un post-procesamiento para obtener, por ejemplo, campos de intensidad de turbulencia. Esto se explica más a detalle en la sección de Post-procesamiento de datos.

En el programa *DynamicStudio 2015a* se aplicaron ciertos filtros o validaciones que permitieron aceptar y descartar vectores tomando como base la calidad de la señal de los mismos:

Validación de Señal-Ruido: Este proceso evalúa la fuerza de la señal en cada área de interrogación y por consiguiente la validez y confiabilidad del vector de velocidad resultante. La fuerza de la señal, correspondiente al pico máximo de la función correlación cruzada, se compara con el pico correspondiente al ‘ruido’ de la medición. En otras palabras, se obtiene el llamado ‘Signal to Noise Ratio’. Esta relación señal/ruido debe ser generalmente mayor a 1.3. En el programa los vectores válidos se muestran en color azul y los vectores que no pasan esta validación aparecen en rojo. En la medida en que los vectores azules prevalecen en las diferentes zonas del flujo, puede decirse que la correlación ha sido buena.

Movimiento promedio: Este método de validación consiste en comparar cada vector de velocidad con sus vectores vecinos. Si el vector de velocidad es muy diferente en magnitud y/o dirección a aquellos que están a su alrededor, entonces se marca como no válido. Posteriormente, este vector puede ser sustituido por el vector promedio de los vecinos. El número de vectores vecinos puede ajustarse según convenga. En particular para estas mediciones se utilizó un arreglo de 3×3 vectores y un factor de aceptación de 0.1 que se especifica en el programa. Dentro de las opciones de este método es posible sustituir vectores que hayan sido invalidados anteriormente.

Filtro promedio: Este filtro corrige vectores del flujo de manera que permite suavizar cambios bruscos de dirección para observar las estructuras más claramente.

Cada método se explica con más detalle en los manuales del software de *DynamicStudio 2015a* de Dantec Dynamics A/S (2002).

2.2. Equipo experimental

2.2.1. Modelo

Se construyó un modelo de acrílico a escala de un vagón real de metro. El diseño se basó en el tren modelo MP-82, que circula por la línea 8 del metro. Se escogió para simular el primer vagón motriz, el cual tiene una cabina de conducción y un perfil angulado al frente. Este cuenta con rejillas de ventilación arriba y debajo de las ventanas, estando ambas cerca de la ventana. Las razones de escoger este vagón fueron para en un futuro trabajo poder estudiar el efecto en el flujo que provoca la forma del perfil del frente.

El modelo construido sirvió para enfocarse principalmente en el flujo interno del aire, bajo la influencia de elementos como las ventanas. En este trabajo no se estudió el efecto que pudieran tener los ventiladores. Por lo tanto el modelo presenta únicamente las aberturas de las ventanas con dos tipos (desmontables): corrediza y abatible y las rejillas inferiores a estas. Sin embargo, las aberturas de las rejillas se taparon en todos los experimentos debido a que al final fue muy complicado construirlas lo más parecidas posible a la realidad, con un espacio de comunicación del interior al exterior o con la misma forma como se muestra en la figura 1.7 del capítulo de Introducción.

Para diferentes posibilidades experimentales, se diseñó que el modelo tuviera una tapa en la parte superior por si fuera necesario meter algún elemento y facilitar la manipulación. Además se le pegaron en la parte inferior del modelo unas bases de acrílico con agujeros, para poder ser soportado. Debido a que las medidas exteriores consideraron la cabina de conducción, en la parte interna se colocó una pared de acrílico en la localización aproximada donde termina la cabina de conducción y empieza la de pasajeros para simular correctamente el flujo interno.

El diseño del modelo se basó en ciertos requerimientos. Se consideró el tamaño de la sección interna del túnel de viento, los efectos a estudiar, el área de enfoque mínima para realizar la correlación de PIV (mínimo un área de 5×5 cm y no muy grande porque se perdería definición de vectores), el material disponible de acrílico y su manipulación principalmente. Se eligió un tamaño adecuado para que pudiera caber en el túnel de viento cerrado dos veces el ancho del modelo para poder estudiar el efecto de la posición

(central o cercana a la pared).

Por otro lado, fue necesario considerar los criterios de semejanza del flujo entre el modelo y el vagón real. Existen tres niveles de semejanza: geométrica, cinemática y dinámica (Cengel y Cimbala, 2006).

En el presente estudio se garantizó la semejanza geométrica; es decir, el modelo de vagón de metro está ciertamente fabricado a escala basado en el modelo MP-82. El factor de escala $\alpha = L_m/L_p$ relaciona las dimensiones características del modelo (L_m) y prototipo (L_p). Sin embargo, no se tiene semejanza dinámica ni cinemática; ya que los números de Reynolds difieren por dos órdenes de magnitud como se muestra a continuación. La única forma de tener iguales números de Reynolds sería hacer experimentos a escala real, debido a que los valores necesarios de los parámetros involucrados son poco prácticos para el modelo. Por otro lado, para aproximarse a la semejanza cinemática, se tendría que usar valores de velocidad del flujo relativamente bajos, del orden de 2 m/s , que aunque es factible obtenerlos en el túnel de viento, las intensidades de turbulencia a esa velocidad son relativamente altas, debido que se aleja al rango de operación óptimo del túnel. Otra forma de obtener velocidades bajas es realizar experimentos en canales de agua.

Por otro lado, existen otras consideraciones que deben tomarse en cuenta, como son el efecto de la pared y el coeficiente de bloqueo, definido como la relación entre el área transversal ocupada por el modelo y el área transversal total del túnel. En nuestro caso, este último fue de aproximadamente 0.154 (15.4 %), que se asemeja principalmente a la condición de un vagón dentro de un túnel. Sin embargo, incluso en ese caso, existe una velocidad relativa entre el vagón real y las paredes del túnel.

La justificación de realizar las mediciones a las condiciones del experimento radican en que se considera que el flujo es principalmente inercial, tal como se tiene en las condiciones reales. Por lo tanto, se espera que las propiedades globales del flujo no cambien en un cierto rango de número de Reynolds. Por ejemplo, en el caso de mediciones de coeficiente de arrastre C_d , está reportado (Cengel y Cimbala, 2006) que este no cambia significativamente a partir de ciertos valores en régimen turbulento. Esto favorece a las condiciones de semejanza en general, aunque el número de Reynolds no sea el mismo entre modelo y vagón real.

Posteriormente, a partir de los datos que se obtuvieron en la página del STC metro de tamaño de vagones o carros, se obtuvieron proporciones de ancho-largo para el modelo propuesto. Con estos datos y después de las iteraciones mencionadas, se obtuvo un ancho exterior de 8 cm para el modelo. A continuación se muestra el siguiente

cálculo; primero del número de Reynolds en las condiciones de flujo reales en el túnel Re_v y luego para el modelo Re_m . El número de Reynolds representa la relación entre las fuerzas inerciales y las fuerzas viscosas dentro de un fluido. Se define como:

$$Re = \frac{\rho V D}{\mu} \quad (2.3)$$

donde ρ es la densidad del aire a temperatura y presión ambiente, V la velocidad característica del flujo y D el diámetro característico del objeto inmerso en el fluido.

Usando la densidad del aire como 1 kg/m^3 , la velocidad del aire relativa al vagón, o sea la velocidad comercial del vagón de 12 m/s (43.2 km/h), el ancho exterior de 2.50 m como diámetro característico y la viscosidad dinámica del aire de $1.8 \times 10^{-5} \text{ Pa}\cdot\text{s}$ a condiciones de $25 \text{ }^\circ\text{C}$ y 1 atm , sustituyendo se tiene:

$$Re_v = \frac{(1)(12)(2.5)}{(1.8 \times 10^{-5})} = 1.67 \times 10^6 \quad (2.4)$$

y para el modelo, usando una velocidad moderada permisible en el túnel de viento de 12 m/s (frecuencia del motor 15 Hz), ancho característico de 8 cm :

$$Re_m = \frac{(1)(12)(0.08)}{(1.8 \times 10^{-5})} = 5.33 \times 10^4 \quad (2.5)$$

Como se puede ver, los números de Reynolds no se empatan y se encuentran alejados dos órdenes de magnitud.

Por otro lado, se observó que al aumentar o disminuir por algunos centímetros el ancho externo, el número de Reynolds no se veía afectado mucho; sin embargo, el tamaño de 8 cm de ancho fue el adecuado para que el modelo cupiera bien en el túnel de viento respetando las proporciones reales y las demás variables de diseño.

Se escogió un espesor de las paredes de acrílico de 5 mm , ya que respetando la proporción de espesor pared-ancho exterior real, equivaldría usar valor cercano de 4.45 mm de espesor.

Una vez obtenidas las dimensiones externas, se prosiguió a obtener las dimensiones y separación de los elementos como ventanas en el modelo. Debido a que no se contó con las dimensiones exactas de los elementos reales, se obtuvieron proporciones y medidas resultantes en el modelo con base en un dibujo del modelo de vagón MP-82 de [infektedunder25 \(2009\)](#), que se muestra en la figura 2.3.

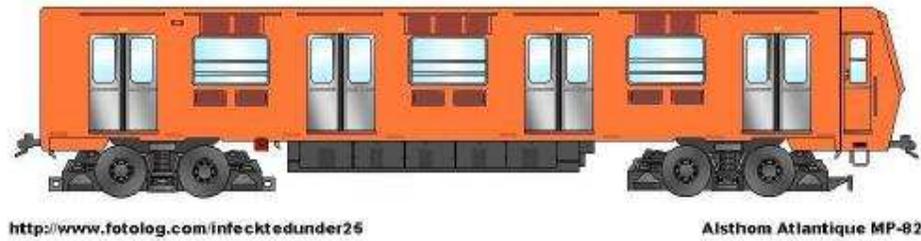


Figura 2.3: Dibujo de vagón motriz del convoy modelo MP-82. infecttedunder25 (2009).

Para ello, se escaló la imagen para que tuviera la misma proporción entre largo y alto reales que se muestran en la tabla 2.2. Posteriormente se midió manualmente cada elemento como ventanas de longitud m en el dibujo y luego dividió entre una sola medida, en este caso el largo del vagón sin cabina de conducción en el dibujo equivalente a 16.9 cm . Se consideró sin cabina únicamente por facilidad de medición en el dibujo. A esta proporción de cada elemento se le llamó r . Esta relación debe ser la misma para la longitud de cada elemento M en el modelo con el largo correspondiente de 53.1 cm .

Por lo tanto, se puede despejar la medida M para el elemento en el modelo como muestra la siguiente ecuación:

$$r = \frac{m}{16.9} = \frac{M}{53.1} \quad (2.6)$$

por lo tanto:

$$M = 53.1 r \quad (2.7)$$

La tabla 2.1 muestra las proporciones y dimensiones obtenidas para el modelo con base en el dibujo de la figura 2.3.

Las proporciones que se usaron para las medidas externas globales se muestran en la tabla 2.2.

Como se puede ver en la tabla 2.2, la proporción que más se aleja es la del espesor de la ventana con el espesor de la pared. El espesor de la pared fue medido directamente, en la exposición de la “Motriz didáctica” en la estación San Lázaro. Esta variación se dio porque para que se conservara la relación, el espesor indicado era demasiado delgado, condición que no habría sido adecuada causando vibraciones y perturbando el flujo.

Característica	$m(cm)$	r	$M(cm)$
Largo de ventana	1.7	0.1006	5.3
Ancho de ventana	1	0.0592	3.1
Distancia entre ventanas	3	0.1775	9.4
Altura de la ventana desde piso del vagón	1.1	0.0651	3.5
Distancia entre extremos de rejillas	1.4	0.0828	4.4
Espacio entre rejillas	0.15	0.0089	0.5
Separación entre ventanas y rejillas	0.1	0.0059	0.3
Ancho de rejillas	0.2	0.0118	0.6

Tabla 2.1: Semejanza entre elementos del vagón real y modelo. m : medida hecha con regla en el dibujo de la figura 2.3. M : medida correspondiente en el modelo. r : Proporción del elemento con el largo en el dibujo y modelo. Elaboración propia.

Relación	Proporción real*	Proporción en el modelo
Ancho exterior/largo c/ cabina	0.15	0.15
Altura de piso a techo/largo c/ cabina	0.14	0.13
Espesor de pared/ancho exterior	0.056	0.063
Espesor de ventana/espesor de pared	0.036	0.4

Tabla 2.2: Comparación entre proporciones globales del vagón de metro real modelo MP-82 y modelo. *Cálculo hecho con base en los datos técnicos de la página de internet del Sistema de Transporte Colectivo [STC] (2008) y algunas mediciones hechas en la exposición “Motriz didáctica” en la estación San Lázaro. Elaboración propia.

Con esto quedó definida la escala α de reducción del modelo de 1:31.3. Empleando cualquier característica; por ejemplo, el ancho del modelo a_m entre el ancho del vagón real a_v , esta escala se conserva para cualquier longitud lineal entre el modelo (L_m) y el vagón real (L_p). Por lo tanto, existe semejanza geométrica:

$$\alpha = \frac{L_m}{L_p} = \frac{a_m}{a_v} = \frac{8}{250} = 0.032 = 3.2\% = 1 : 31.3 \quad (2.8)$$

Usando este factor de escala, se obtuvo el largo del modelo, equivalente a 55 *cm*. Las medidas obtenidas se redondearon para facilidad de manejo en planos que se muestran a continuación.

La figura 2.4 muestra al modelo visto de frente, se pueden ver las dimensiones interiores como exteriores. La figura 2.5 muestra los planos del modelo en vista de perfil y superior con medidas en milímetros. La figura 2.6 muestra los mismos planos de perfil y superior pero en proporciones con respecto al ancho externo del modelo a . Cada factor de proporción se obtiene dividiendo la medida entre el ancho externo $a = 8 \text{ cm}$. La figura 2.7 muestra el modelo visto en 3D en el software de *Catia V5* y representa como fue ensamblado en la realidad.

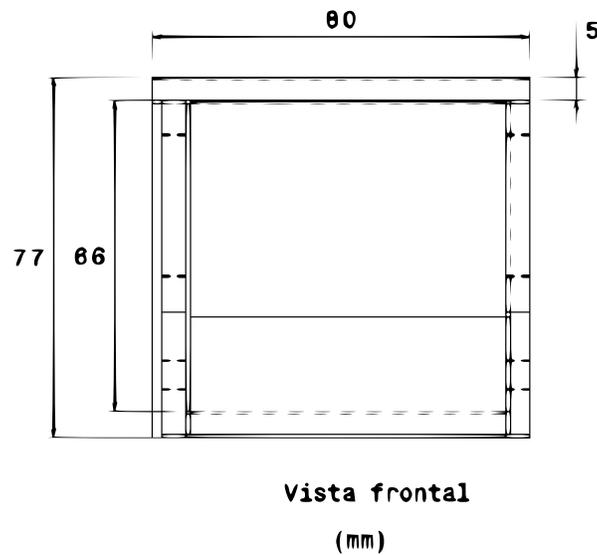


Figura 2.4: Planos de vista frontal con medidas del modelo. Elaboración propia.

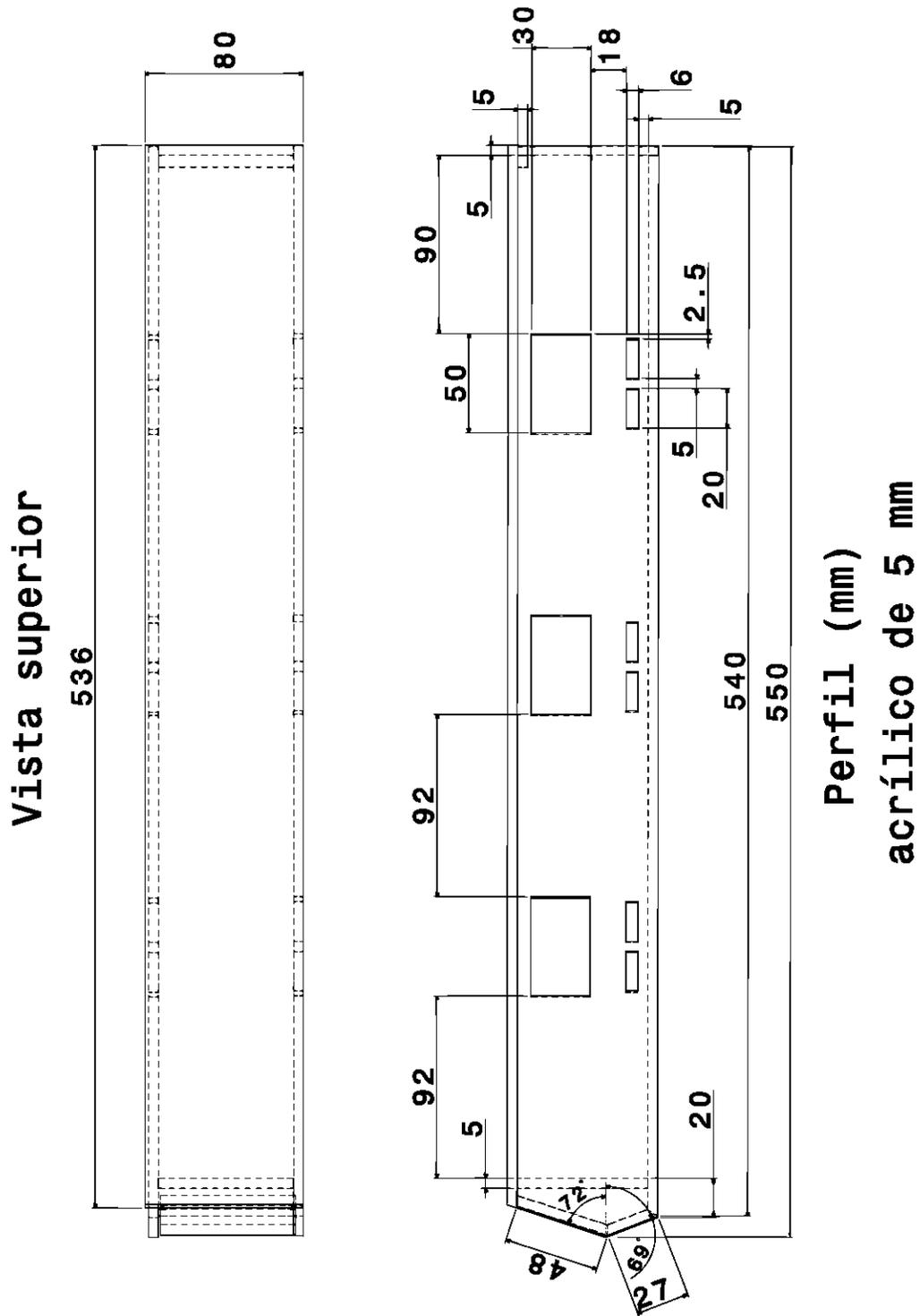


Figura 2.5: Medidas del modelo construido en vista de perfil y superior en *mm*. Elaboración propia.

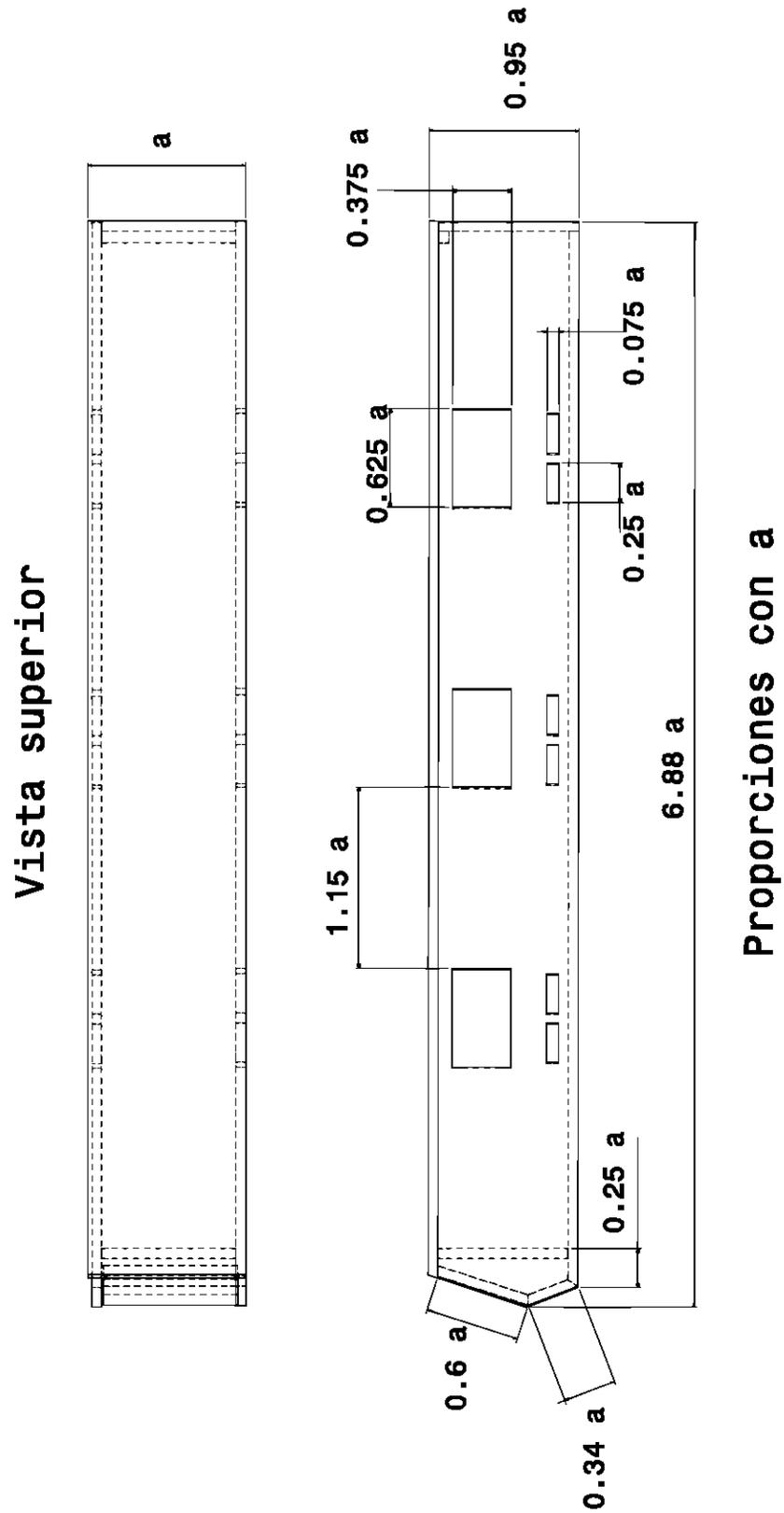


Figura 2.6: Proporciones que guardan las dimensiones con el ancho exterior de 8 *cm* del modelo. Elaboración propia.

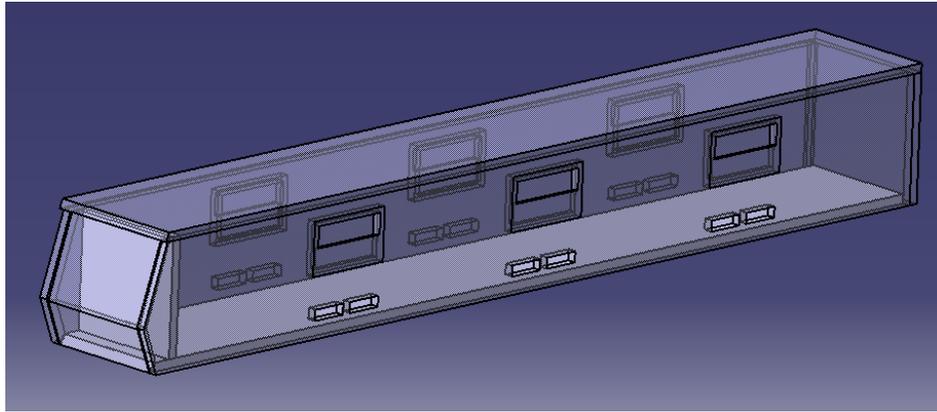


Figura 2.7: Vista en 3D del modelo elaborado con el software de *Catia V5*. Elaboración propia.



Figura 2.8: Modelo final ensamblado con ventana de tipo corrediza. Elaboración propia.

En los planos anteriores se puede ver el modelo ensamblado, sin embargo este se compuso de pequeñas partes de acrílico como fue la base, tapa, lados, frente, etc. Las partes del ensamble se cortaron en una máquina cortadora láser del laboratorio de termofluidos y a algunas se les cortaron los bordes en ángulo en el Instituto de Investigaciones en Materiales de la UNAM para ensamblar el perfil en ángulo de la parte delantera. Se realizó el ensamble de todo usando pegamento para acrílico (Aderil) en una mesa óptica. El ensamble consideró que se respetaran las dimensiones exteriores, variando un poco las interiores pero sin encimar o tapar aberturas. Para asegurar la

tapa en los experimentos dentro del túnel, a esta se le colocaron unos pedazos de acrílico para que no se moviera y embonara. Además se usaron ligas y cinta adhesiva para evitar su desprendimiento o vibración.

La figura 2.8 muestra una foto del modelo ensamblado final y con el tipo de ventana corrediza. La construcción de las ventanas se explica a continuación. La base interna del modelo se forró con cartulina negra para disminuir los reflejos. Se puede ver una cinta blanca al frente que se usó para marcar los planos de medición de la hoja láser.

Se construyeron dos tipos de ventana de acrílico: abatible y corrediza. Se diseñaron para que se pudieran colocar y retirar en cualquier abertura de ventana del modelo. Estos tipos de ventana son los que manejan los carros del STC metro y se construyeron para su efecto en el flujo interno del modelo. Estas consistieron de un marco delgado con pedazos de acrílico de 2 mm de espesor. Para las abatibles se pegó el cristal superior con un ángulo aproximado de 50° respecto a la horizontal. Para las corredizas se pegó únicamente la parte fija inferior de la ventana, sin ser realmente deslizable, sólo fue para igualar el tipo de abertura que corresponde a aproximadamente la mitad del ancho total. Se construyeron 6 ventanas de cada tipo por separado. Se usaron placas de 2 mm de espesor, debido a que si eran más pequeñas para conservar la escala, hubieran sido más difíciles de manejar y habrían vibrado. Esta discrepancia en el espesor no resultó considerable para la variación en el número de Reynolds. Las ventanas se pegaron al modelo con diurex transparente en los bordes para no crear sombras muy marcadas con el paso del láser ni afectar las mediciones de PIV. La cara interna de las ventanas abatibles se forró con cartulina negra debido a que inicialmente se detectaron reflejos del láser a través del acrílico muy considerables. Las ventanas estudiadas se pueden ver en la figura 2.9 y 2.10.



Figura 2.9: Ventanas construidas para el modelo: a) Tipo corrediza; b) Tipo abatible; c) Tipo abatible colocada en modelo. Elaboración propia.

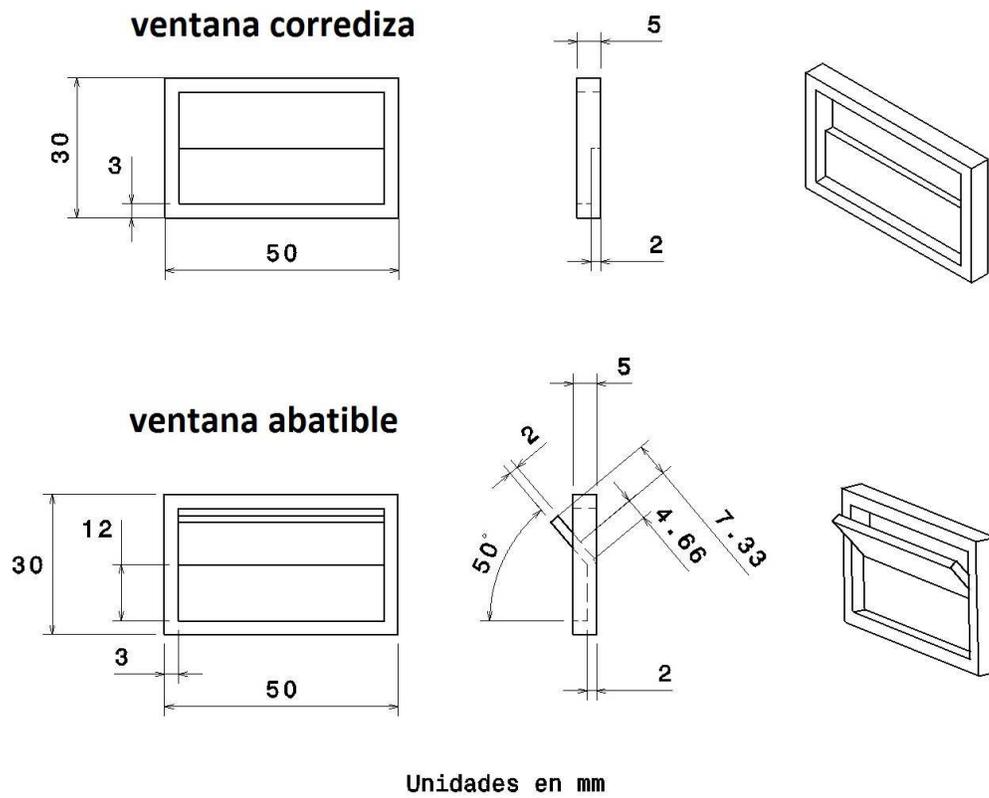


Figura 2.10: Planos de las ventanas construidas en acrílico. Elaboración propia.

2.2.2. Túnel de viento

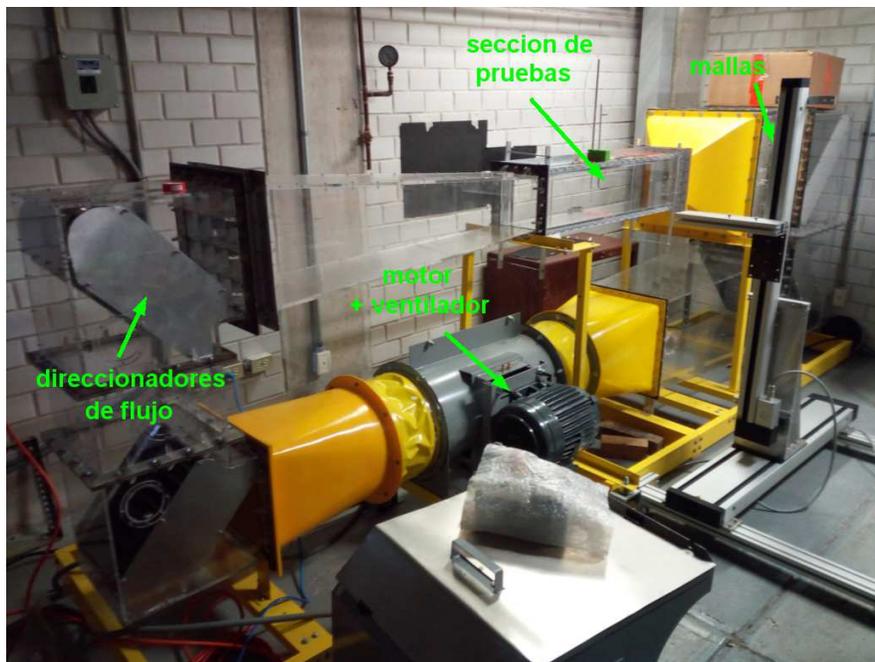
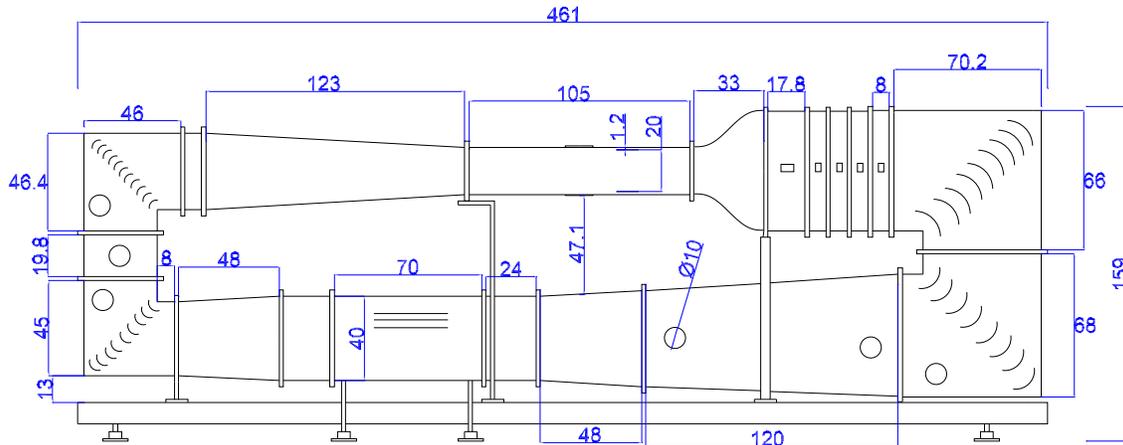


Figura 2.11: Túnel de viento cerrado empleado del laboratorio de termofluidos. Arriba: Medidas principales en *cm*. Abajo: foto. Elaboración propia.

Para el experimento se utilizó un túnel de viento cerrado del laboratorio de termofluidos de la Facultad. Cuenta con los elementos necesarios en cualquier túnel de viento como son una sección de pruebas, un ventilador, zona de reducción de intensidad

de turbulencia (mallas o paneles), difusores, contracciones. Está construido de manera que en la sección de pruebas se reduzca lo más posible la intensidad de turbulencia. La sección de pruebas interna mide $20 \times 20 \text{ cm}$. Cuenta con una compuerta de acceso lateral y dos tapas pequeñas en la parte superior e inferior del túnel para poder tener diferentes accesos. En el panel del control se puede establecer la frecuencia del motor y encendido, apagado y paro de emergencia. En la figura 2.11 se puede ver un plano del túnel de viento con las medidas principales en centímetros y una fotografía.

Debido a la necesidad de poner el modelo en posición girada, se construyeron dos elementos adicionales al túnel. Se construyó una réplica de la compuerta lateral con la única diferencia de que a esta se le perforaron dos ranuras para poder soportar el modelo en posición vertical y poder moverlo a diferentes distancias de la pared del túnel (superior o inferior). Esto permitió simular el efecto de la cercanía de un vagón real con las paredes laterales del túnel. Se usó acrílico de 10 mm de espesor y se maquinó el borde en los laboratorios de ingeniería mecánica de la facultad. Las ranuras se realizaron con corte láser. Los planos de esta compuerta se pueden ver en la figura 2.12.

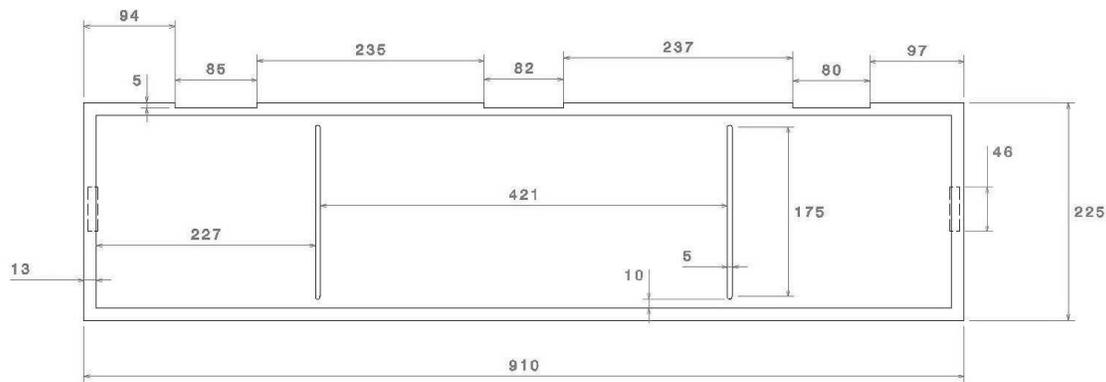


Figura 2.12: Planos de la réplica construida de la compuerta lateral del túnel de viento. Elaboración propia.

Además de la compuerta se construyó una réplica de las tapa inferior debido a que la existente era opaca, cosa que hubiera estorbado la trayectoria de la hoja láser por debajo del túnel. Las tapas original y réplica del túnel se pueden ver en la figura 2.13.

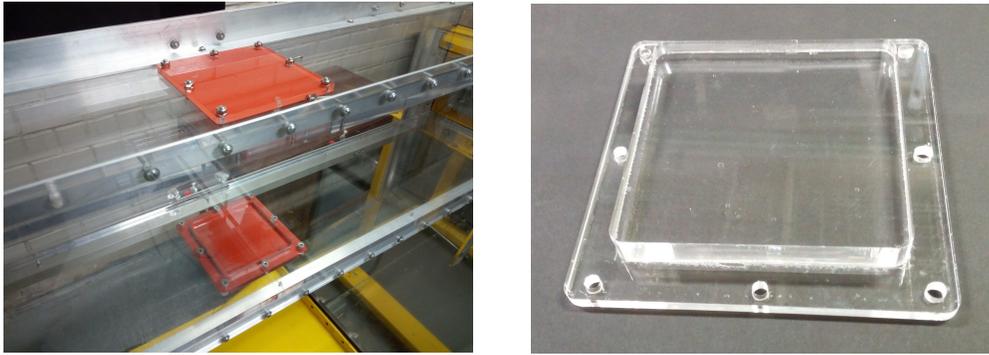


Figura 2.13: Réplica de tapa del túnel. Izquierda: originales. Derecha: réplica construida de la tapa inferior. Elaboración propia.

Antes de las mediciones se hizo una caracterización del túnel para relacionar la frecuencia del motor con la velocidad al centro del túnel. Los resultados de estas mediciones se reportan en la sección de resultados.

2.2.3. Estructura

Se construyó una estructura de acero y una subestructura hecha de perfiles de aluminio para el arreglo experimental. La función principal de la estructura completa fue soportar todos los elementos y permitir la movilidad de la cámara y láser de manera conjunta, para evitar la necesidad de estar enfocando si se movía la cámara respecto al plano de medición. Esto significa que en las mediciones de PIV, la distancia de separación entre cámara y la hoja láser enfocada se mantuvo constante. El movimiento completo se controló a través de un equipo llamado posicionador (*traverse* en inglés), ya que la estructura se encontró soportada a este último. De esta manera, para moverse a otro plano de medición en el modelo, sólo fue necesario mover el posicionador sin necesidad de volver a enfocar la cámara. La estructura se diseñó para que se pudiera modificar la posición relativa entre cámara, hoja láser y modelo. Para ello se emplearon perfiles angulares de estantería agujerados, para sujetar por medio de tornillos. La configuración y las distancias entre elementos en la estructura se explican más detalladamente en la sección de arreglo experimental.

La estructura de acero está conformada por dos secciones, una más larga que la otra. Esto permitió incrementar o decrementar la distancia entre el espejo y la salida del láser. Sobre la parte más corta (extensión) se hicieron unos cortes cuadrados para permitir

la colocación del espejo a 45° . La estructura se fijó con tornillos a una placa de acrílico gruesa de 42.5 cm por lado y 12 mm de espesor. Esta se fijó al posicionador por medio de varios barrenos para distribuir mejor el peso. Se atornilló lo más centrada posible para disminuir la flexión de todos los elementos. La longitud total de la estructura, ancho interno entre perfiles y altura fue determinada a partir del dato de apertura de la hoja láser, para que la hoja no interfiriera con la misma y recorriera una distancia suficiente (horizontal más vertical) para cubrir todo el modelo. El cálculo de la apertura se describe en el apartado de láser. Además de estos cálculos, la distancia que se usó entre cámara y plano, espejo y salida del láser se muestran en la sección de arreglo experimental. La estructura y subestructura se pueden ver en la figura 2.14.

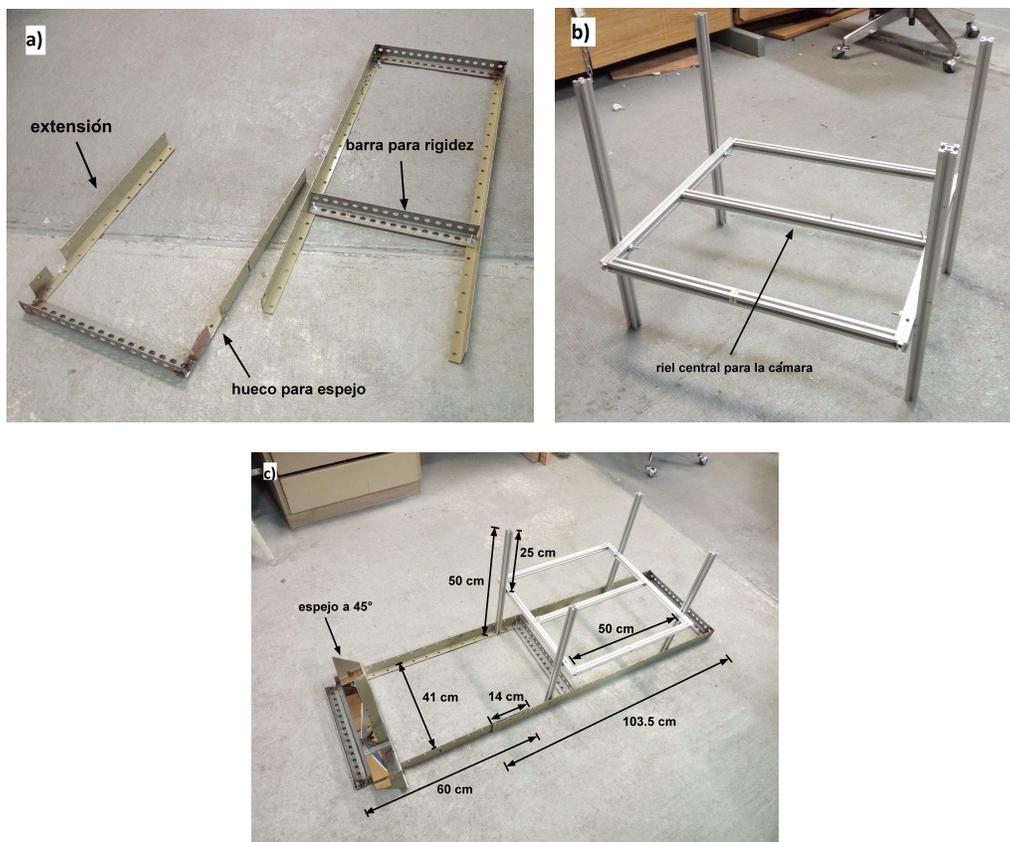


Figura 2.14: Estructura y subestructura: a) estructura de perfiles de estantería; b) subestructura de aluminio; c) estructura y subestructura ensambladas con medidas. Elaboración propia.

La subestructura tuvo la función de soportar la cámara y su base. También tiene la función de poder alejar o acercar la cámara al modelo y enfocar distintas áreas. La

cámara se puede mover relativamente a la subestructura y la subestructura completa se puede mover con respecto a la estructura de acero para colocarla en diferentes posiciones cerca del modelo. Está conformada por nueve barras ensambladas de perfil ranurado cuadrado de aluminio de $2 \times 2 \times 50$ *cm* cada una. El riel central es en donde se colocó la cámara. La estructura de acero y aluminio fue soldada, cortada y unida en un taller de herrería.

2.2.4. Espejo

Se utilizó un espejo simple cortado en una vidriería de dimensiones 53×12 *cm* y espesor de 3 *mm*. La función del mismo fue cambiar de dirección la hoja del láser de horizontal a vertical, es decir de 0 a 90° para que la hoja entrara por la parte inferior del túnel y atravesara al modelo. Para esto fue necesario inclinarlo a 45° y alinearlo con el eje longitudinal del modelo, sobre la extensión de la estructura de acero. Esto se puede ver en la figura 2.15.



Figura 2.15: Espejo. Dimensiones: 53×12 *cm* y espesor de 3 *mm*. Elaboración propia.

2.2.5. Generador de partículas

Se utilizó un generador de partículas marca SCITEK (ver SCITEK Consultants Ltd (sf) para más detalles). Este genera partículas en el rango de $1-3 \mu m$ apropiado para PIV. El equipo incluye un módulo de control para obtener diferente concentración

en la mezcla aire-partículas y para regular la presión mediante diferentes perillas que controlan la apertura y cierre de válvulas. Este módulo se conecta a la red de aire comprimido con una presión de trabajo máxima de 10 bar. Para el experimento se usó la fila 1 y 2 de mangueras sin mezclar aire, con la presión regulada a la misma de la red del laboratorio, de aproximadamente 6 bar.

Las partículas generadas son en realidad micro-gotas de un aceite especial que puede ser: aceite de maíz, de olivo o a base de silicona. El equipo del generador se puede ver en la figura 2.16. En la imagen de la derecha se puede ver al fondo que el módulo se encuentra conectado a la red de aire comprimido. El módulo se conecta a su vez con el tanque de la imagen izquierda por varias mangueras de colores. La salida de la mezcla se controla por medio de una válvula de globo.



Figura 2.16: Generador de partículas. Izquierda: Generador. Derecha: Módulo de control. Elaboración propia.

2.2.6. Generador de humo

El generador de humo se utilizó para visualización únicamente. El tamaño de partícula también fue del orden de $1-3 \mu m$. Este emplea un aceite a base de parafina que genera humo blanco. Las características técnicas se pueden consultar de Royal Dutch Shell (sf). El equipo se puede ver en la figura 2.17.

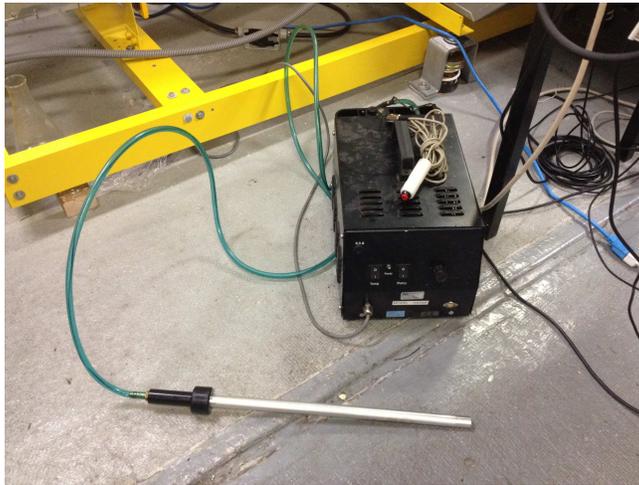


Figura 2.17: Generador de humo, aceite empleado: Shell Ondina 917. Elaboración propia.

2.2.7. Posicionador

El posicionador o *traverse* en inglés, es un aparato que permite mover y posicionar equipo experimental que se encuentra sujeto a este, con alta precisión. Está compuesto por una base cuadrada que se puede mover en dos direcciones sobre el plano horizontal. Una tercera estructura se puede acoplar a esta base para ofrecer movimiento sobre el eje vertical. El movimiento es producido por motores a pasos que controlan el movimiento en cada eje. El posicionador que se ocupó presenta tres grados de libertad en los tres ejes cartesianos. La marca es de *Dantec Dynamics A/S*. Es capaz de generar movimientos muy finos menores a 1 mm . La velocidad máxima de movimiento es de alrededor de 40 mm/s con un recorrido máximo de 590 mm . Para las condiciones de este experimento sólo fue necesario ocupar dos ejes en el plano horizontal: uno para moverse hacia el modelo fijo en el túnel de viento (eje Z) y el otro para moverse en dirección paralela al modelo (eje X). No fue necesario moverse de manera vertical (eje Y), ya que para eso se pudo modificar la altura de la cámara en la subestructura o mover el modelo soportado en la compuerta. El posicionador se controló desde una computadora a la cual conectó un módulo de control electrónico. La base mide $35 \times 35\text{ cm}$. Sobre esta se colocó la placa de acrílico y por encima, la estructura de perfiles de estantería, junto con todo el arreglo experimental de cámara y láser. El equipo del posicionador se puede ver en la figura 2.18.



Figura 2.18: Posicionador. Izquierda: posicionador con base móvil en el eje 1 y 2 en el plano horizontal. Derecha: módulo controlador. Elaboración propia.

2.2.8. Láser

El equipo láser que se usó fue del tipo estado sólido de doble pulso Nd:YAG clase IV para PIV marca Quantel de la serie Evergreen. El modelo es el EVG 70 de 70 mJ . Este se compone de un cuerpo que genera el haz cilíndrico, una unidad de enfriamiento a base de agua destilada, un sistema de control, un atenuador para disminuir la intensidad y la óptica necesaria para convertir el haz en forma de rayo cilíndrico a forma de hoja, enfoque y control del espesor. La óptica que permite transformar el haz cilíndrico a hoja tiene forma de un prisma cilíndrico cortado a lo largo del eje principal. El cuerpo del láser está internamente conformado por dos láseres (lámparas) y cada haz es independiente pero ambos salen por la misma abertura. La longitud de onda del haz saliente es de 532 nm de color verde. Las frecuencias a las que puede operar son 1, 2, 5, 10 y 15 Hz . La unidad en donde se encuentra el tanque de agua de enfriamiento se puede conectar a una computadora para controlarlo a través del programa *DynamicStudio 2015a* (modo externo) o directamente en forma manual (modo interno). Con el modo externo se puede variar el tiempo de disparo entre el cuadro 1 y el cuadro 2 y sincronizarse con la captura de la cámara. Como equipo necesario se usaron lentes de protección. Los elementos que conforman el sistema del láser se pueden ver en la figura 2.19.



Figura 2.19: Equipo de láser. a) Cuerpo del láser, b) Unidad de enfriamiento y control electrónico, c) Detalle de unidad de enfriamiento y control electrónico. Elaboración propia.

Para calcular la apertura de la hoja láser en grados, se proyectó la hoja láser sobre una superficie. Se midió la distancia desde la salida a la superficie y la longitud de la hoja proyectada como una línea en la superficie. Vista la hoja perpendicularmente, forma dos triángulos rectángulos. Usando relaciones trigonométricas el ángulo calculado fue de 30° aproximadamente.

2.2.9. Cámara y óptica

Se usó una cámara HiSense MkII modelo C8484-05CP de Dantec Dynamics de fabricación japonesa. Esta es específica para uso científico, caracterizada por una alta sensibilidad y resolución. Puede usarse en numerosas aplicaciones como fluorescencia inducida por láser (LIF) y donde haya poca iluminación. Tiene un sensor CCD con una frecuencia de captura de 12.2 cuadros por segundo a máxima resolución. La resolución del sensor es de 1344×1024 píxeles con un tamaño de pixel cuadrado de $6.45 \mu m$.

Tiempo mínimo entre cuadro: 200 *ns*. Tiempo de exposición de 4.5 μ s a 1 *s*. Presenta una eficiencia cuántica pico del 70 % y un rango dinámico de 12 bits. Para ver más información de la cámara se puede consultar a Hamamatsu Photonics (2009).

A la misma se le acoplaron dos tipos de lentes para poder observar diferentes ángulos y campos. Se usó un lente *Edmund Optics 35 mm/F1.65* y uno más grande *Nikon 24-120 mm 1:3.5-5.6D*. Ambos fueron puestos en la penúltima marca antes de la apertura total de diafragma. El lente pequeño fue ocupado en la mayoría de los experimentos para enfocar la zona de cada ventana en un rango de 173 *mm* por imagen, y en vertical lo suficiente para cubrir el interior del vagón completo. Con este lente se obtuvieron buenas correlaciones dentro del software de PIV y fue necesario realizar 3 tomas para capturar el modelo completo. Con el lente grande no se obtuvo buena correlación; sin embargo, se pudo enfocar el vagón completo en una toma. Este último se usó para visualización sin PIV.

Se fijó la cámara en una base de acrílico, móvil sobre el riel central de aluminio (subestructura), para poder colocarla en posiciones variables de enfoque con la hoja del láser. La cámara y óptica ocupada se pueden ver en la figura 2.20.

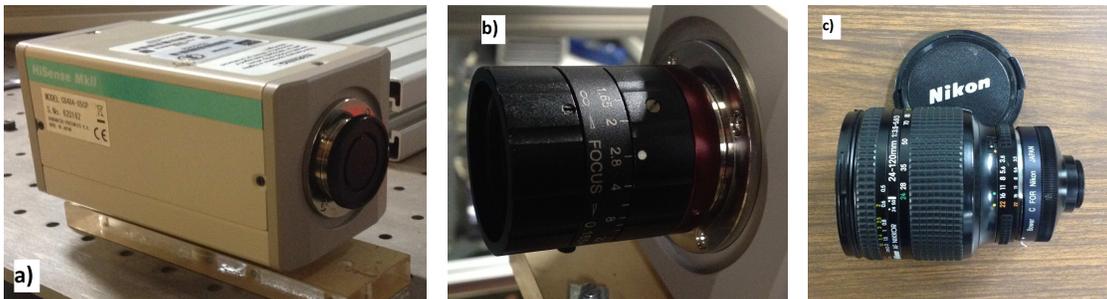


Figura 2.20: Cámara HiSense MkII. a) cámara sobre base construida de acrílico. b) lente Edmund Optics 35 *mm*/F1.65. c) lente Nikon 24-120 *mm* 1:3.5-5.6D. Elaboración propia.

2.2.10. Adquisición de datos

Dentro de la adquisición de datos se pueden mencionar ciertos elementos importantes. La cámara y el láser se conectaron a una unidad llamada sincronizador o *Timer Box* en inglés y este a una tarjeta de adquisición de datos de marca *National Instruments* en la computadora. Este envía señales de entrada y salida para sincronizar el disparo del láser con la cámara, a los intervalos de tiempo definidos en el programa *DynamicStudio 2015a*. Mediante esta sincronización, es posible capturar las posiciones de las partículas

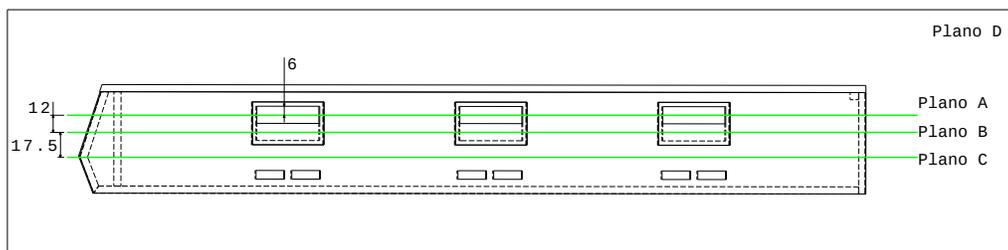
en dos cuadros de tiempo diferentes.

En el programa *DynamicStudio 2015a* se filtra y pre-procesa la información obtenida y también se envían y reciben señales de control hacia el sincronizador de disparo. Esto se explica más a detalle en la sección de Técnica de PIV.

2.3. Arreglo experimental

Para obtener los campos de velocidad y estructuras de flujo, la orientación que más interés estudiar fueron los planos horizontales, es decir, como si se estuviera viendo desde arriba de un vagón. Se escogió esta orientación porque se consideró que pudieran dar mayor información del flujo interno y así poder estudiar la influencia de las ventanas laterales. Se escogieron tres planos a diferentes niveles: uno en la abertura de la ventana (A), otro intermedio a la altura de la cabeza de los pasajeros sentados (B) y uno tercero a la altura de las rodillas de los pasajeros (C). Por último se incorporó un cuarto plano (D) perpendicular a estos tres, es decir, un plano vertical longitudinal justo en medio del modelo.

Los planos de medición con distancias de separación realizados se pueden ver en la figura 2.21 y 2.22.



Planos del láser (mm)

Figura 2.21: Esquema de planos de medición de hoja láser con medidas. Elaboración propia.

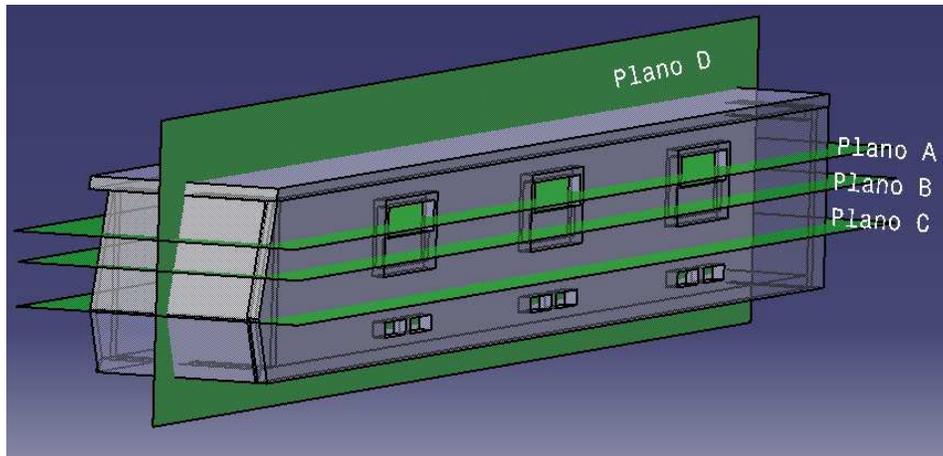


Figura 2.22: Planos que se midieron con la hoja láser: A, B, C y D. Elaboración propia.

El modelo fue colocado en el túnel de viento en posición girada a 90° , soportado por la base del vagón en la compuerta lateral del túnel. La razón principal de colocarlo en esta orientación fue debido a que si se ponía horizontal en el centro del túnel, había obstáculos para el campo de visión de la cámara, como las pequeñas tapas de acceso inferior y superior. Esta razón fue la que motivó a construir la compuerta mencionada para sostener al modelo y que fuera capaz de moverse a lo largo de las ranuras para variar la posición respecto a la pared superior o inferior del túnel de viento.

El modelo se soportó con pequeñas bases de acrílico y madera para darle elevación al modelo y así evitar algunos obstáculos para el camino de la hoja láser. Estas se barrenaron para atravesar unas barras roscadas y así poder fijar con tuercas el modelo a la compuerta.

La configuración acostada sobre la compuerta del modelo es equivalente a una configuración horizontal debido a que el estudio fue puramente hidrodinámico y no hubo efectos de corrientes ascendentes o descendentes de convección por cambios de densidad o temperatura.

La figura 2.23 muestra al modelo como fue soportado para la medición de los planos A, B y C; y también como fue puesto con cinta adhesiva en la base estando en la configuración horizontal para la medición del plano D. La cinta adhesiva fue lo suficientemente fuerte para no permitir deslizamiento del modelo en el túnel.



Figura 2.23: Modelo dentro del túnel de viento. Izquierda: modelo acostado soportado en compuerta lateral, pegado a la pared inferior. Derecha: modelo en configuración horizontal (plano D) al centro. Elaboración propia.

Se usó una distancia de enfoque para la cámara con el lente pequeño *EdmundOptics* y otra para el lente grande *Nikon* que se usó en visualización. La distancia de enfoque fue la que permitiera tener una buena resolución de vectores (lente pequeño) y en visualización para poder observar el modelo completo. Se calculó que la cámara debería estar a una distancia mínima del modelo de 20 *cm*. Después de enfocar y durante las mediciones, la cámara se estableció en un rango aproximado de 50 a 70 *cm* del centro del modelo. Estas distancias se marcan en la figura 2.28.

Debido a que se empleó la técnica de PIV en dos dimensiones, uno de los requerimientos fue que la cámara estuviera enfocando perpendicularmente a la hoja láser. Con esta condición, la única forma de hacer pasar la hoja del láser era desde abajo del túnel. Para ello se colocó el láser en posición horizontal y el espejo a 45° que desvió la hoja del láser horizontalmente hacia una orientación vertical, a 90° por debajo del túnel. El espejo se colocó en los huecos hechos al extremo de la estructura.

Además de esto fue necesario que toda la hoja láser vertical cubriera al modelo. Para ello usando los datos de la apertura se calculó una distancia mínima desde la salida del láser hasta la salida de la hoja por el modelo de $h = 1$ *m* aproximadamente. Esta longitud se dividió en el recorrido horizontal más el recorrido vertical de la hoja del láser. Así se obtuvo que la salida del láser debió estar situada aproximadamente a 70 *cm* del espejo más la distancia restante en recorrido vertical. Con este dato también se calculó el ancho interno de la estructura de 41 *cm* para que la hoja no interfiriera con la misma. La geometría usada para estos cálculos se puede ver en la figura 2.24.

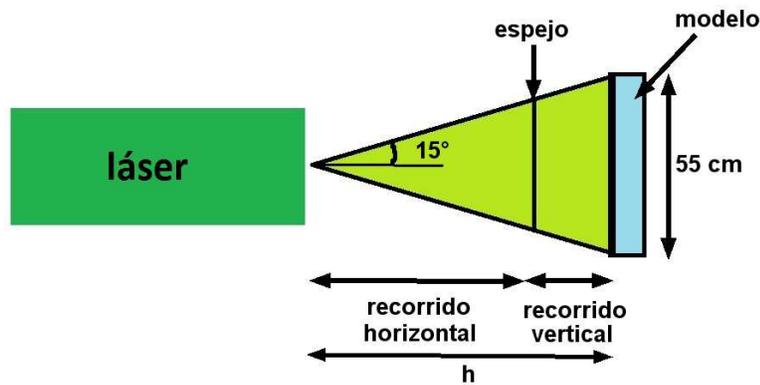


Figura 2.24: Geometría usada para el cálculo de la posición del láser para que la hoja cubriera todo el modelo sin chocar con la estructura. $h = 1$ m. Elaboración propia.

Debido a la posición a la que fue colocada la cámara para tener buena resolución de vectores, esta no fue capaz de enfocar en una imagen al modelo completo. Para ello fue necesario realizar tres capturas por medio del posicionador. Cada captura ocupó una distancia real de 173 mm a lo largo del plano de enfoque y se traslaparon en las uniones; en dos zonas de 31 mm cada una. A cada captura se le asignó el nombre por zona correspondiente: frontal, central y posterior del modelo. Empleando el software de *Matlab R2014a*, algunas capturas se estudiaron individualmente y otras en unión, mostrando al modelo completo. Esto se puede ver en la figura 2.25.

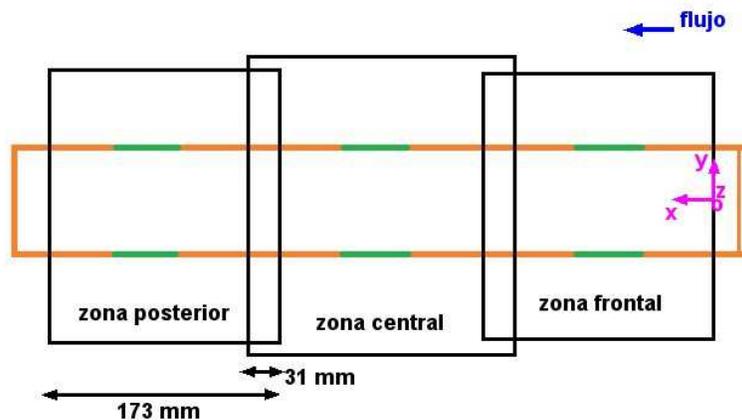


Figura 2.25: Esquema de zonas de captura de la cámara posibles con el lente más pequeño *EdmundOptics*. Elaboración propia.

Para garantizar que la hoja láser estuviera a 90° verticalmente, se usaron dos cintas adhesivas blancas para alinearla, una la parte inferior del túnel y la otra en la parte superior. Usando una escuadra y mediante ajustes pequeños de la posición del espejo se logró alinear la hoja lo más verticalmente posible. Después se aseguró que la hoja también estuviera alineada verticalmente con el modelo en los planos de interés A, B, C y D.

Una vez alineado el láser con el modelo y fija la posición de la cámara en la estructura, fue necesario poner en foco a esta exactamente en la zona donde pasó la hoja láser. Para ello se retiró el modelo del túnel y se marcó por donde pasaba la hoja láser con cinta adhesiva blanca. Después se introdujo un objeto en el túnel para enfocararlo justo en donde pasaba la hoja láser marcada previamente. Con la cámara girando el lente se consiguió enfocar la zona de paso de la hoja láser. Este procedimiento de enfoque fue necesario siempre que se modificara la distancia entre la cámara y la hoja láser o por cambiar de lente. El objeto de enfoque, en este caso una caja con letras pequeñas, se puede ver en la figura 2.26.

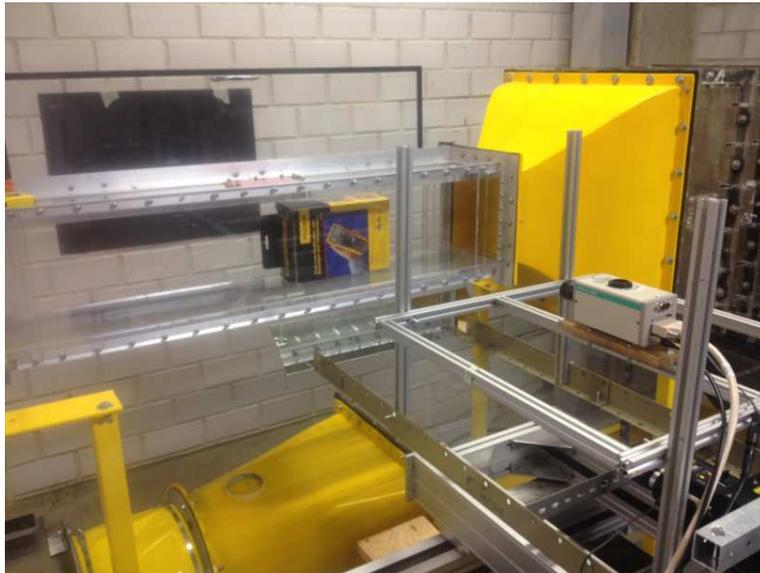


Figura 2.26: Procedimiento de enfoque de la cámara de la hoja láser. Objeto de enfoque, una caja con letras pequeñas. Elaboración propia.

El láser se colocó sobre dos barras de aluminio para elevarlo 3 cm debido a que el haz chocaba con una barra para dar rigidez a la estructura de estantería. Así mismo se usaron dos barras para sujetarlo de la parte superior.

La figura 2.27 muestra el arreglo experimental empleado. La posición de los elementos con las medidas más relevantes se pueden ver en la figura 2.28.

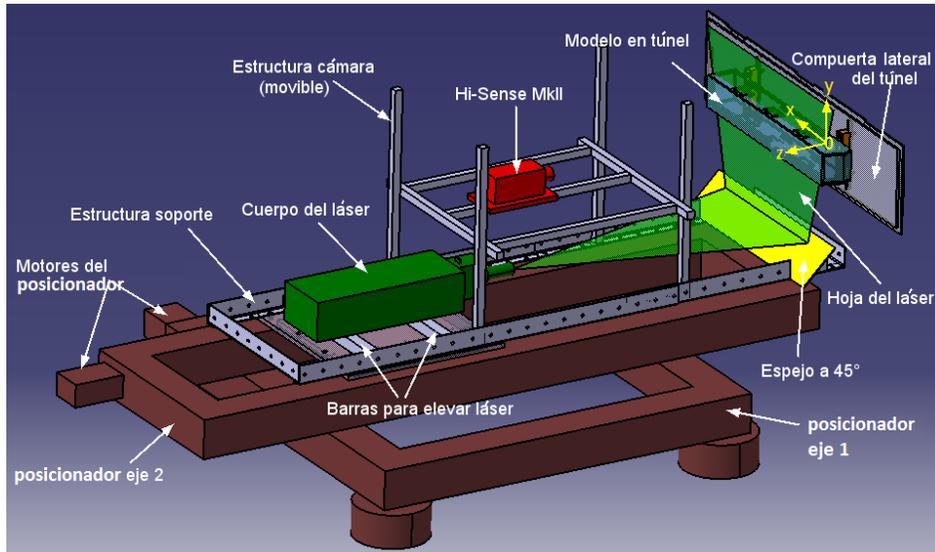


Figura 2.27: Arreglo experimental general. Elaboración propia.

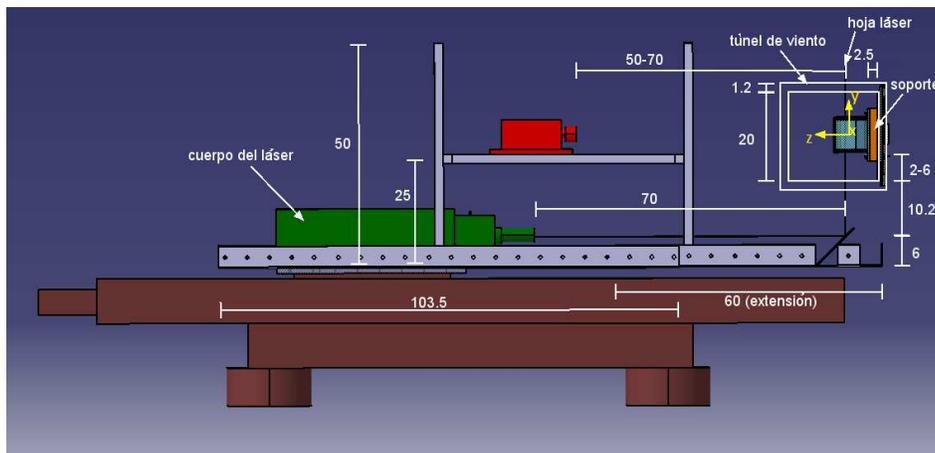


Figura 2.28: Vista de perfil del arreglo experimental. Medidas en centímetros. Elaboración propia.

La figura 2.28 muestra al arreglo experimental visto de perfil con medidas. Se puede observar como se colocó el modelo sobre unos soportes de madera de 2 *cm* de espesor. Esto fue debido a que la trayectoria de la hoja láser era bloqueada por una barra del túnel. El arreglo experimental empleado se muestra en las fotos de la figura 2.29.

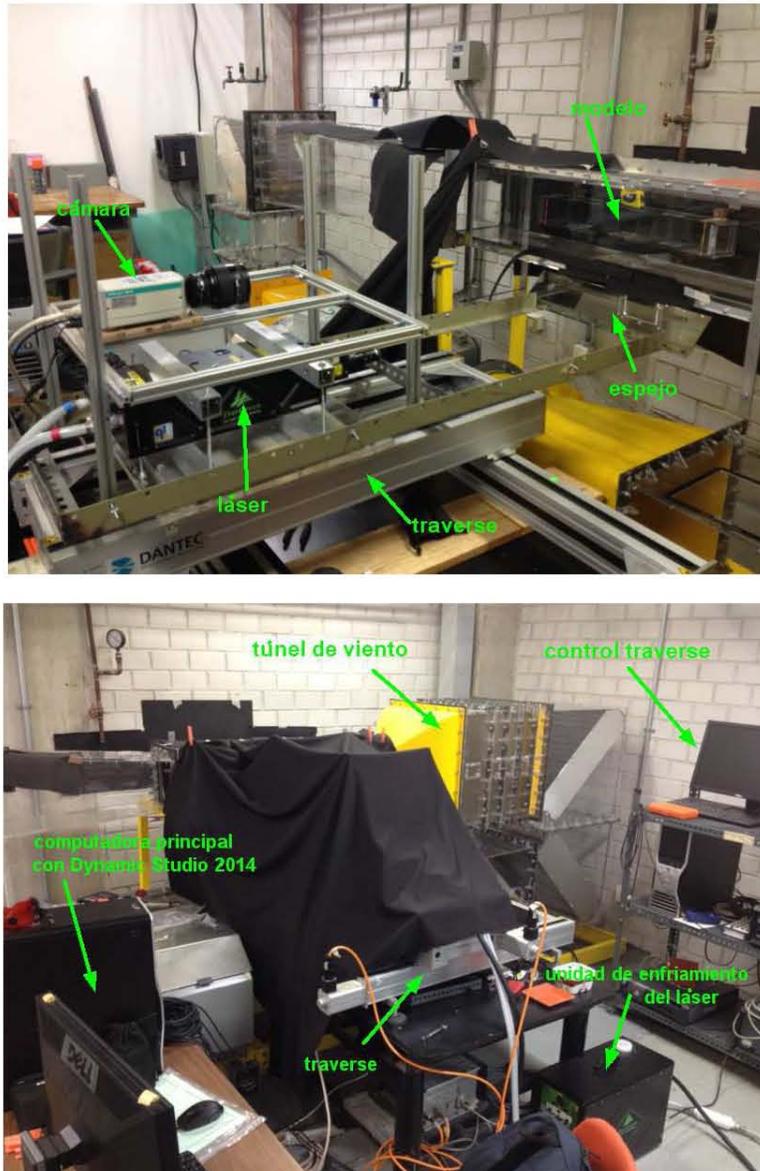


Figura 2.29: Arreglo experimental en fotografías. Arriba: Arreglo al descubierto usando la cámara con el lente grande. Abajo: Arreglo con cobertura de tela durante las mediciones. Posicionador (*traverse* en inglés). Elaboración propia.

2.4. Experimentos realizados

2.4.1. PIV

Se eligieron tres efectos o variables a estudiar: velocidad en el túnel de viento (6 y 12 m/s), tipo de ventana (corrediza o abatible) y posición del modelo en el túnel (centro o pegado a la pared). Se eligieron estas velocidades debido a que a bajos valores el desempeño del túnel no era el adecuado, presentando mayores fluctuaciones del flujo. Existen muchas combinaciones posibles de las variables mencionadas. Consecuentemente, se seleccionaron 5 casos de medición distintos, que se muestran en la tabla 2.3.

Caso	Posición del modelo		Túnel de viento		Tipo de ventana		Plano			
	Central	Pared	6 m/s	12 m/s	Corrediza	Abatible	A	B	C	D
1	*		*		*		*			
2	*			*	*		*	*	*	
3	*			*		*		*		
4		*		*		*		*		
5	*		*			*				*

Tabla 2.3: Casos que se midieron con la técnica de PIV. Elaboración propia.

Efecto	Casos comparados (tabla 2.3)
Velocidad en el túnel de viento	1 <i>vs</i> 2
Tipo de ventana	2 <i>vs</i> 3
Posición del modelo	3 <i>vs</i> 4

Tabla 2.4: Casos comparados para estudiar los tres efectos mencionados en distintos planos de medición: velocidad en el túnel de viento, tipo de ventana y posición del modelo respecto a la pared del túnel. Elaboración propia.

La tabla 2.4 describe los casos que se compararon en los resultados para estudiar cada efecto por separado. Para ello, se escogieron los casos donde sólo cambió el valor de la variable efecto, mientras las otras permanecieron constantes. Por ejemplo, para estudiar el efecto de la velocidad en el túnel de viento, se escogieron los casos 1 y 2 de la tabla 2.3, en los cuales se tiene el tipo de ventana corrediza, posición central en el túnel y plano A de medición, cambiando sólo la velocidad en cuestión.

El caso 2 fue especial, ya que en este se midió sobre los tres diferentes planos: A, B y C para obtener más información sobre el flujo en tercera dimensión.

Como se puede notar, el último caso medido en el plano D, no se comparó con otro. Esto fue debido a que esta medición fue hecha de manera excepcional para averiguar si existía flujo ascendente o descendente dentro del modelo.

2.4.2. Visualización

Los experimentos de visualización se hicieron para complementar los resultados obtenidos para PIV. En ellos no se pudo hacer correlación debido al generador de humo utilizado y al campo de visión obtenido con el lente grande. Sin embargo se usó el mismo láser para iluminar un plano. El plano que se iluminó fue el A con el modelo acostado y soportado en la compuerta lateral del túnel de viento.

2.5. Post-procesamiento de datos

Después de filtrar los datos en *DynamicStudio 2015a*, se exportaron los datos en formato de texto para un procesamiento posterior en *Matlab*. Esto permitió obtener otros campos a partir de los campos de velocidad como: vorticidad, intensidad de turbulencia, perfiles de velocidad en una dirección, líneas de corriente y gasto volumétrico por unidad de longitud como se describe a continuación.

En algunos cálculos, se unieron los campos individuales por zona (frontal, central y posterior) para permitir observar en un sólo campo el modelo completo. Es importante mencionar que las imágenes se voltearon 180° en espejo para que la dirección positiva del flujo fuera a la derecha y no al revés como se hizo en las mediciones.

Las zonas donde aparecieron vectores inválidos debido el filtrado de datos, no se tomaron en cuenta para obtener los campos mencionados. En estas áreas, se puso una máscara en forma de rectángulos verdes, que muchas veces coincidió con la posición de las ventanas.

Campos vectoriales de velocidad: Estos campos se mostraron ya sea en un instante de tiempo (un campo) o como promedio de las cien capturas realizadas en 25 segundos por medición. En algunos casos, los campos vectoriales se mostraron separadamente por zona frontal, central y posterior, ya que si se unían para visualizar el modelo completo, los vectores no se apreciaban bien. Los campos usaron un vector de referencia común al realizar comparaciones, para tenerlos igualmente escalados. Este vector en general corresponde a la máxima velocidad.

Campos de vorticidad: La vorticidad \vec{w} es el rotacional o el producto cruz del campo de velocidades. Se define al rotacional como:

$$rot(\vec{F}) = \nabla \times \vec{F} \quad (2.9)$$

donde \vec{F} es un campo vectorial y nabra (∇) es un operador diferencial vectorial definido como:

$$\nabla = \hat{i} \frac{\partial}{\partial x} + \hat{j} \frac{\partial}{\partial y} + \hat{k} \frac{\partial}{\partial z} \quad (2.10)$$

en este caso, se graficó la magnitud de la vorticidad a partir del campo vectorial de velocidades en dos dimensiones, la cual se define como:

$$\vec{w} = \nabla \times \vec{v} = \left(\frac{\partial v_y}{\partial x} - \frac{\partial v_x}{\partial y} \right) \hat{k} \quad [s^{-1}] \quad (2.11)$$

donde \vec{v} es el vector velocidad con sus componentes en dirección X (v_x) y dirección Y (v_y).

Esta función se puede evaluar en *Matlab* para cada vector y obtener un campo de niveles de vorticidad con colores cálidos indicando regiones del flujo que tienden a girar en sentido antihorario y colores fríos para regiones de flujo en sentido horario.

Después, el valor de vorticidad se escaló para volverlo sin dimensiones, como las otras cantidades de la siguiente manera:

$$w^* = w \frac{D}{U_{ref}} = w \frac{0.068}{U_{ref}} \quad [,] \quad (2.12)$$

donde D es el ancho exterior del modelo en metros.

Campos de intensidad de turbulencia: La intensidad de turbulencia promedio se calculó de la siguiente manera. Primero se obtuvo la varianza para cada componente de velocidad en x (var-x) y y (var-y) de cada vector para los cien campos vectoriales. Después se sumaron y se calculó la raíz cuadrada, obteniendo así U_{fluc} , que representa la magnitud de la fluctuación de la velocidad en el flujo en el tiempo o desviación estándar. Después se dividió entre una velocidad característica del flujo, en este caso la velocidad de referencia del túnel de viento ocupada en la medición correspondiente (U_{ref}). Así se obtiene la intensidad de turbulencia I evaluada en cada punto donde hay un vector de velocidad.

$$U_{fluc} = (v_{var-x} + v_{var-y})^{\frac{1}{2}} \quad [m/s] \quad (2.13)$$

$$I = \frac{U_{fluc}}{U_{ref}} \quad [,] \quad (2.14)$$

La intensidad de turbulencia representa el nivel de fluctuaciones que presenta el flujo en un punto respecto a una velocidad de referencia promedio. A mayor intensidad de turbulencia, mayores fluctuaciones de velocidad respecto al promedio; por lo tanto, mayor probabilidad de mezclado de capas de fluido como reportan Palacios-Morales et al. (2016). Su efecto en el confort térmico ha sido estudiado por diversos autores que se mencionan en el capítulo anterior, como Xia et al. (2000).

Perfiles de velocidad: Los perfiles promedio que se obtuvieron fueron en la dirección x (longitudinal), esto significa que la componente en y de la velocidad se hizo cero. Para visualizar mejor los perfiles se aplicó un salto cada 15 columnas a partir de los campos vectoriales de velocidad completos.

Líneas de corriente: Las líneas de corriente promedio sirvieron para observar la trayectoria que marcaron las corrientes de aire dentro del modelo. Para ello se usó una función en *Matlab* que permite generarlas con base en un vector de inicio de un campo vectorial, en este caso el campo vectorial de velocidades. Las líneas de corriente se interrumpen cuando el flujo pierde continuidad en el plano o cuando el flujo cambia de dirección bruscamente. Para poder visualizarlas con claridad, se estableció el inicio de cada línea de corriente cada 7 columnas y cada 6 renglones a lo largo de todo el modelo.

Capacidad de ventilación: Se realizó un análisis de conservación de masa de aire en el plano A (superior) de medición. Para ello, se realizaron comparaciones empleando un gasto volumétrico Q (por unidad de longitud) a través de las aberturas de las ventanas y a través de tres superficies de control rectangulares. Se usó la información del campo vectorial de velocidades del plano mencionado (velocidad exterior del aire de 12 m/s). Las gráficas, zonas de cálculo y método se muestran en el capítulo de Resultados, en la sección de Análisis de capacidad de ventilación (plano A).

Capítulo 3

Resultados

En este capítulo se muestran los resultados de las series experimentales. Primeramente, se describe la caracterización del túnel de viento; en particular, la relación de frecuencia del motor con velocidad promedio medida al centro del túnel. Posteriormente se presentan los resultados de PIV, incluyendo un ejemplo, obtenidos después de procesar los datos en el programa *Matlab*. Los resultados se agrupan de acuerdo al tipo de campo: campos vectoriales de velocidad, perfiles de velocidad, líneas de corriente e intensidad de turbulencia. A su vez, dentro de cada de campo diferente, se describen los efectos que provoca cada variable experimental en el flujo interno del modelo: velocidad en el túnel, tipo de ventana y posición respecto a la pared del túnel. Adicionalmente, en la sección de distribución espacial para algunos campos, se analiza lo que sucede en todos los planos de medición (A, B, C y D). Posteriormente se muestra un análisis de gasto volumétrico por unidad de longitud Q de aire para el plano A de la ventana corrediza en diferentes zonas.

Posteriormente se muestran imágenes obtenidas de la visualización del flujo a bajas velocidades. Los resultados de visualización complementaron a los de PIV y se observó buena congruencia con las mediciones. Finalmente se muestra una comparación de los resultados obtenidos en esta tesis con un caso especial de investigación, en donde se deduce que las estructuras de flujo entre el modelo y vagón real pueden ser semejantes a pesar de la diferencia de los números de Reynolds.

3.1. Características del flujo en el túnel de viento

A continuación, se muestra la caracterización del flujo en el túnel de viento realizada. Se midió la relación de frecuencia del motor con la velocidad al centro del túnel. Para ello se usó un tubo de Prandtl con un módulo electrónico asociado. Se usó con la opción *FinePrandtl*, que sugirió mayor precisión. El modelo de este medidor fue *Wöhler DC100 Pro*. El tubo de Prandtl fue posicionado en dirección del flujo, en el centro del túnel. Inicialmente, el aparato marcó 0.53 m/s con velocidad cero. En la tabla 3.1 se muestran los resultados de dicha medición. El rango de velocidades medido fue de 0.84 a 41.4 m/s .

Frecuencia del motor (Hz)	Velocidad al centro del túnel (m/s)
2.02	0.84
3	1.75
5	3.42
8	6
10	7.58
12	9.3
15	11.84
20	16.13
25	20.41
30	24.62
35	28.83
40	33.03
45	37.25
50	41.4

Tabla 3.1: Relación frecuencia del motor con velocidad medida al centro del túnel de viento con el tubo de Prandtl. Elaboración propia.

El rango del número de Reynolds entonces, para el túnel de viento vacío, basándose en el rango de velocidades de la tabla 3.1 fue de $9333 - 4.6 \times 10^5$, calculado de la siguiente manera:

$$Re_{mint.v.} = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{(1)(0.84)(4)(0.2)^2}{(1.8 \times 10^{-5})(4)(0.2)} = 9333 \quad (3.1)$$

$$Re_{max\ t.v.} = \frac{\rho V D_h}{\mu} = \frac{(1)(41.4)(4)(0.2)^2}{(1.8 \times 10^{-5})(4)(0.2)} = 4.6 \times 10^5 \quad (3.2)$$

donde $D_h = \frac{4A}{P}$ es definido como el diámetro hidráulico para conductos no circulares, siendo A el área de la sección transversal cuadrada del túnel con 20 *cm* por lado y P el perímetro mojado en contacto con el aire; ρ es la densidad del aire, V es la velocidad del aire media al centro del túnel de viento y μ es la viscosidad dinámica del aire. Las propiedades del aire se tomaron como 25 °C y a 1 *atm*.

Y el rango del número de Reynolds representativo para todas las mediciones hechas con el modelo en el túnel de viento se calculó del siguiente modo. Debido a que lo que cambió fue la velocidad, se usaron las velocidades del aire en el túnel mínima y máxima empleadas en los experimentos para los Re mínimos y máximos correspondientes. Estas fueron $v_1 = 6 \text{ m/s}$ y $v_2 = 12 \text{ m/s}$ respectivamente.

$$Re_{min} = \frac{\rho V L_c}{\mu} = \frac{(1)(6)(0.08)}{(1.8 \times 10^{-5})} = 2.67 \times 10^4 \quad (3.3)$$

$$Re_{max} = \frac{\rho V L_c}{\mu} = \frac{(1)(12)(0.08)}{(1.8 \times 10^{-5})} = 5.33 \times 10^4 \quad (3.4)$$

donde ρ es la densidad del aire, V es la velocidad del aire en el túnel de viento, L_c es la longitud característica equivalente al ancho exterior del modelo en metros y μ es la viscosidad dinámica del aire, considerando las mismas condiciones de temperatura y presión.

Cabe mencionar que las velocidades escogidas de 6 y 12 *m/s* se escogieron debido a su practicidad en el túnel de viento en el rango óptimo de operación.

Por lo tanto, el rango del número de Reynolds considerando el ejemplo PIV de la figura 3.1 fue de 8890 – 5.33×10^4 , que indica comportamiento esencialmente inercial (turbulento). Esta deducción fue hecha considerando que el flujo se vuelve totalmente turbulento y desarrollado para valores del número de Reynolds alrededor de 4000 en tuberías circulares (Cengel y Cimbala, 2006). Así mismo, Tosun et al. (1988) reportan valores críticos para la transición de 2800 en ductos de sección rectangular. Los rangos usados del número de Reynolds se encuentran por arriba de estos valores.

Como se mencionó en la sección de diseño del modelo en el capítulo anterior, los números de Reynolds entre modelo y vagón real en el túnel a 12 *m/s* (1.67×10^6) no coincidieron, al encontrarse alejados dos órdenes de magnitud. Esto indica que no existe semejanza dinámica, aunque sí haya semejanza geométrica (longitudes escaladas).

La semejanza cinemática no se pudo garantizar debido a que se hubieran requerido velocidades más bajas en el túnel de viento. A pesar de lo anterior, las estructuras del flujo u otras propiedades como el coeficiente de arrastre Cd no deberían cambiar demasiado, ya que el flujo es principalmente inercial (ver página 37 para más detalles).

3.2. Resultados obtenidos del sistema PIV

Los parámetros de las mediciones de PIV fueron los siguientes. Para la obtención de campos vectoriales de velocidad promedio, se tomaron en cuenta cien campos de velocidad instantáneos. La frecuencia de captura fue de 4 Hz ; esto correspondió a un tiempo total de medición de 25 s . Las mediciones se realizaron después de inyectar humo, encender el túnel de viento y esperar un tiempo aproximado de 10 segundos para que el flujo se desarrollara, procurando hacerlo lo más rápido posible, debido a que el humo se escapaba rápidamente del túnel mientras fuera mayor la velocidad del aire.

Antes de cada medición definitiva se hicieron pruebas para obtener el tiempo entre pulsos adecuado para esa medición. Generalmente se empezó desde 50 hasta $1000\ \mu\text{s}$, escogiendo el tiempo que presentara menos vectores rojos, con una Validación de Señal-Ruido de 1.29 y donde se destacaran estructuras de flujo.

Después de capturar las cien imágenes para cada medición, se aplicaron filtros en el programa *DynamicStudio 2015a* para observar mejor el comportamiento del fluido. Estos filtros fueron la Validación de Señal-Ruido (1.29); el Movimiento Promedio, promediando una zona de 7×7 vectores con un factor de aceptación de 0.2, tres iteraciones sustituyendo vectores incorrectos; y el Filtro Promedio, tomando en cuenta un área de 3×3 vectores. Se usó un área de 32×32 pixeles para las áreas de interrogación con un traslape entre sí del 50%.

Posteriormente, los campos se exportaron en formato de texto y procesaron en *Matlab*. En las zonas donde la correlación no funcionó, debido a reflejos u obstrucciones, se pusieron máscaras para indicar en esa zona la invalidez de los vectores. Estas se marcaron con rectángulos de color verde oscuro en las figuras. La zona de las ventanas también se indicó de este modo. Todos los campos se hicieron adimensionales con el fin de realizar comparaciones efectivas. En cuanto a unidades de longitud, el eje X y el eje Y están escalados con el ancho interno $a = 6.8\text{ cm}$ del modelo. En los campos vectoriales sólo los ejes son adimensionales, pero la dimensión de cada uno se conservó

en m/s . La intensidad de turbulencia ya es adimensional.

Como se mencionó en el capítulo anterior, las imágenes procesadas en *Matlab* se voltearon 180° alrededor del eje Y . Debido a esto, en los todos los campos siguientes hasta antes de visualización, el flujo externo al modelo va de izquierda a derecha. Para observar mejor esto, en cada figura se dibujó una pequeña flecha roja (sin que su tamaño represente una magnitud de velocidad) en la esquina superior izquierda del primer campo, que indica el sentido del flujo externo al modelo. A continuación se muestra un ejemplo de una secuencia de imágenes de PIV.

3.2.1. Ejemplo

El ejemplo de PIV de la figura 3.1 muestra una evolución en el tiempo del flujo dentro y fuera del modelo del vagón en el centro del túnel. La cámara enfocó la zona central del modelo. En este caso fueron capturadas diez imágenes y se muestran tres representativas. El tiempo entre pulsos fue $200 \mu s$ y la frecuencia de captura: $4 Hz$. El experimento fue realizado a una velocidad relativamente baja en el túnel de viento de $2 m/s$, con un número de Reynolds de $Re = 8890$. El sentido del flujo exterior va de izquierda a derecha en la imagen. La primera fila muestra los campos de velocidad instantánea; la segunda los campos de vorticidad asociada a cada campo vectorial, donde los colores cálidos representan regiones con tendencia al giro antihorario (vorticidad positiva) y los colores fríos regiones con tendencia al giro horario (vorticidad negativa); la tercera muestra los promedios de velocidad y vorticidad sobre la captura de imagen (izquierda).

En los campos a), c) y d) se pueden ver unos chorros de aire que entran por las ventanas (entre $x/a = 3.6$ y 4.1), que posteriormente provocan diversos vórtices. En las demás zonas del modelo se puede ver que la velocidad es menor. Debido a que este experimento fue a baja velocidad, fue posible capturar el flujo interno y externo al mismo tiempo, situación que no se pudo observar a velocidades del flujo principal más altas.

Es importante mencionar que se hicieron mediciones bajo las mismas condiciones en las otras zonas (frontal y posterior) y se observó un comportamiento muy similar a las mediciones principales de esta tesis; en cuanto a estructuras de flujo, aunque a diferente magnitud de velocidad.

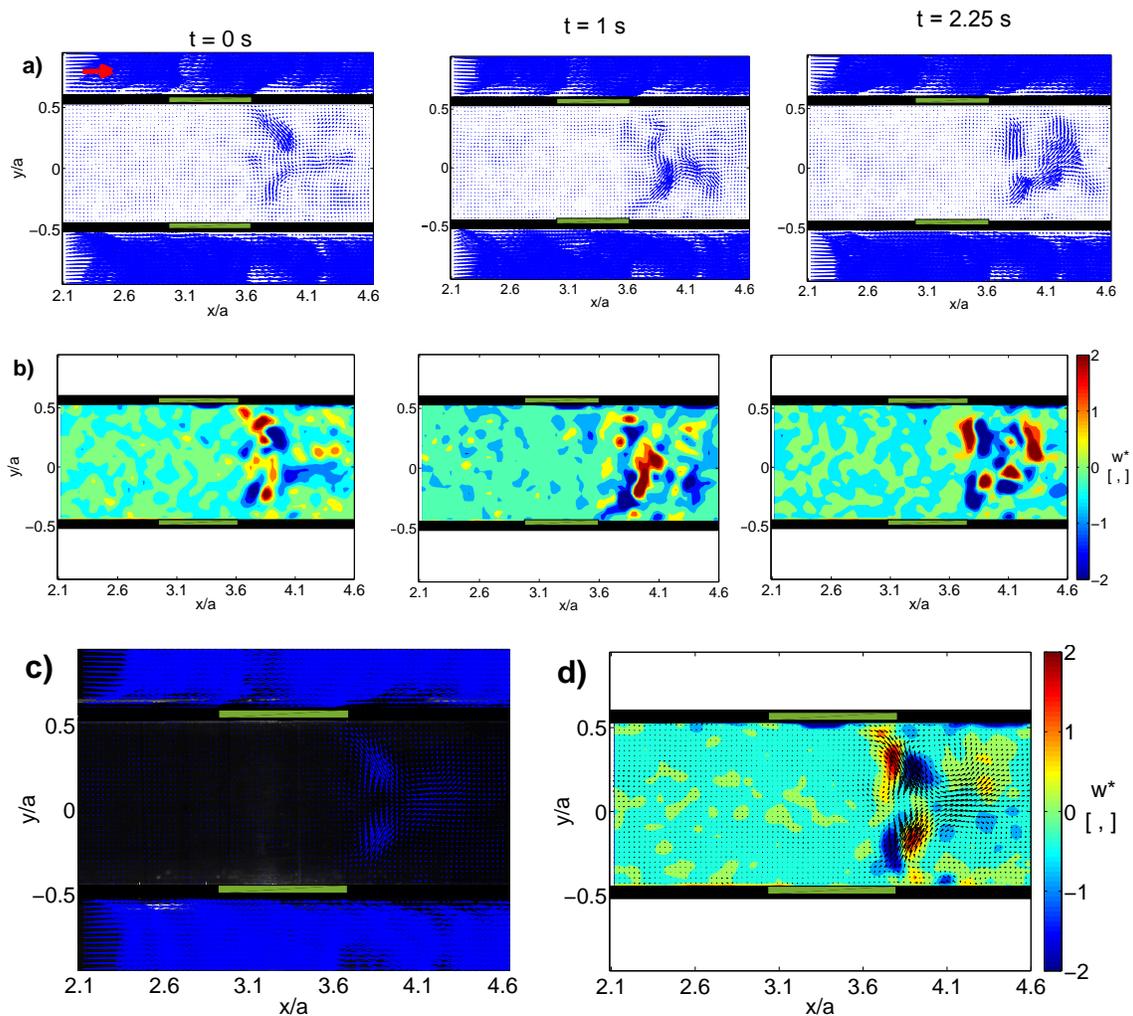


Figura 3.1: Ejemplo de PIV, flujo interno y externo en la zona central del modelo. Velocidad en el túnel: 2 m/s , flujo de izquierda a derecha. a) Primera fila: evolución de campos de velocidad instantáneos. b) Segunda fila: campos de vorticidad asociados. c) Campo de velocidad promedio sobre captura de imagen y d) Campos de velocidad y vorticidad adimensional promedio. Recuadros verdes: zona de las ventanas. Elaboración propia en *Matlab*.

En las imágenes de PIV siguientes, únicamente se muestra el flujo interno del modelo debido a que es de mayor interés para este trabajo, además de que se pueden observar con más detalle las estructuras del flujo. A continuación se muestran los resultados de las mediciones principales y se estudia la contribución que tiene cada una de las tres variables mencionadas.

Es importante mencionar que para estudiar un efecto en particular, las otras variables que están presentes se deben mantener constantes, para evitar interpretaciones

incorrectas. Por ejemplo, para analizar el efecto de la velocidad externa en el flujo interno, ambos casos de velocidad corresponden al tipo de ventana corrediza, posición en el centro del túnel y plano A. Así mismo, es necesario que en los campos vectoriales comparados se tenga la misma escala de tamaños, teniendo como referencia a un sólo vector, así como el mismo factor de magnificación (tamaño de los vectores). Estos factores se indican en cada figura.

Los casos que corresponden a las mediciones realizadas y que se pueden comparar para estudiar cada efecto, se muestran en la tabla 2.4 del capítulo anterior (página 64). Para el efecto de la velocidad en el túnel (ver Caso 1 *vs* 2); tipo de ventana: (2 *vs* 3) y posición del modelo (3 *vs* 4). Los campos en cada categoría se organizan en el plano de medición correspondiente. Por ejemplo, para estudiar el efecto de la velocidad en el túnel, la comparación es posible en el plano A; el tipo de ventana y posición del modelo en el plano B. Si se quiere visualizar lo que ocurre tridimensionalmente en todos los planos, se puede estudiar el Caso 2 (que aparece en los planos horizontales A, B y C) y el Caso 5 (plano D) tal y como se describe en el capítulo anterior. Es posible también estudiar una variable efecto en distintas clases de campos; ya sea vectoriales, líneas de corriente o intensidad de turbulencia.

Algunos de los efectos no se analizaron en todos los campos, debido a que se consideraron redundantes o aportaban poca información; por ejemplo el efecto de la velocidad exterior y distribución espacial en los perfiles de velocidad promedio. Así mismo, las figuras en donde aparecen los planos C y D no corresponden a alguno de los tres efectos estudiados; sin embargo, se alude a ellos en la subsección de distribución espacial de algunos campos.

3.2.2. Campos vectoriales de velocidad

Efecto de la velocidad del flujo

Los casos para estudiar este efecto, que permiten comparación manteniendo las demás variables constantes, son el Caso 1 *vs* 2. Estos corresponden al plano A (superior en la abertura, aproximadamente a la altura de la cabeza de los pasajeros de pie), con el modelo en la posición central del túnel y ventana corrediza. Las velocidades comparadas fueron: $v_1 = 6 \text{ m/s}$ y $v_2 = 12 \text{ m/s}$. En general, se observó que las magnitudes de velocidad aumentaron al incrementar la velocidad del túnel, tal como se esperaba.

La figura 3.2 muestra el modelo completo dividido por secciones o zonas (filas): frontal (f), central (c) y posterior (p) a diferentes velocidades. La columna izquierda

muestra el modelo a la velocidad $v_1 = 6 \text{ m/s}$ (Caso 1) y la columna derecha a una velocidad de $v_2 = 12 \text{ m/s}$ (Caso 2).

Con el fin de visualizar con mejor claridad el campo de velocidades promedio del flujo, se redujo la densidad de vectores del campo (*subsampling*) y estos se escalaron como se explica a continuación. En primer lugar, al campo vectorial se le aplicó un salto doble en renglones y columnas (mixto) para reducir el número de vectores. Con fines de comparación, los campos vectoriales se dispusieron de manera que el vector de referencia es el mismo para cada renglón (misma zona de enfoque, diferente velocidad); dicho vector corresponde a la velocidad máxima del flujo, que en este caso siempre se encuentra en el flujo principal de 12 m/s . Con esto se garantiza que ambos campos de velocidad (mismo renglón) están igualmente escalados. En consecuencia, cada renglón tiene una escala diferente. Estas velocidades de referencia son, empezando desde la fila superior: 0.35 , 0.75 y 1.98 m/s respectivamente. Para todos los casos se aplicó un factor de magnificación de tamaño de los vectores de 5. Este valor permite controlar la longitud y el tamaño de la cabeza del vector. Por otro lado, se usó un tiempo entre pulsos de $500 \mu\text{s}$ para la velocidad más baja y $150 \mu\text{s}$ para la más alta.

Se puede ver que las estructuras de flujo entre ambas columnas son muy similares, sólo aumentan las magnitudes de la velocidad. Para la zona posterior se puede ver que el cambio es más relevante que las demás zonas. Por otro lado, para la zona frontal a baja velocidad, el flujo es más ordenado y axial que para la misma zona a alta velocidad.

La figura 3.3 muestra la unión de las tres secciones del modelo para cada velocidad externa; mostrando la misma información que la figura 3.2, pero visualizando el modelo completo de una manera más general. La figura de arriba representa el campo vectorial promedio obtenido para la velocidad externa de 6 m/s y la figura de abajo, para la velocidad de 12 m/s . Para fines de comparación, todas las secciones se encuentran igualmente escaladas respecto a un único vector de magnitud 1.98 m/s . Los campos se encuentran superpuestos a una imagen de fondo, que muestra cómo se veía el modelo en la cámara iluminado por el láser. Se puede ver la unión de zonas por los bordes de cada imagen en un tono más claro.

En estas figuras se puede observar que las velocidades más altas se presentaron en la zona posterior del modelo, aproximadamente a la altura de la vecindad de las puertas del vagón real. En estas zonas se observan estructuras vorticosas, consecuencia de la entrada del flujo por las ventanas.

—PLANO A—

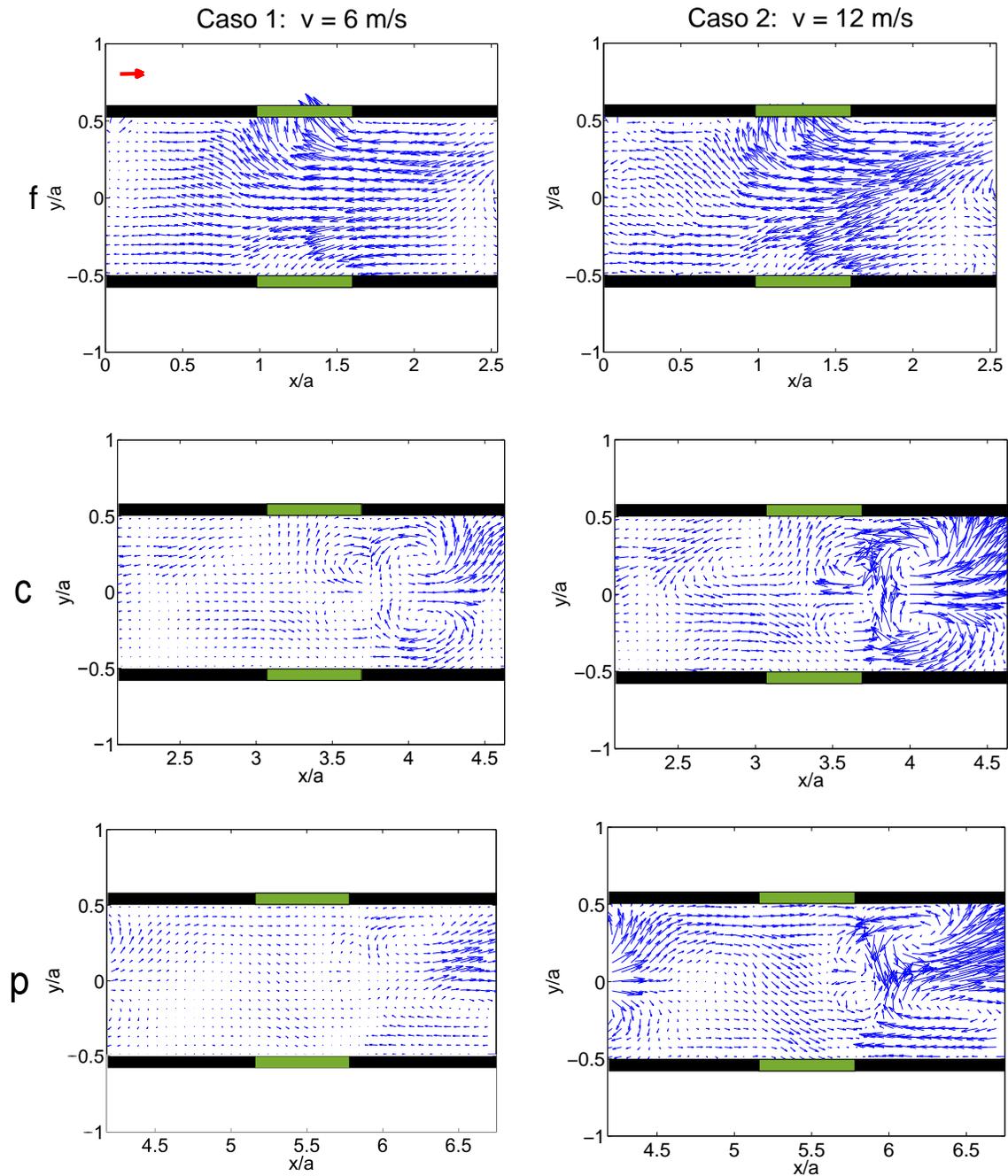


Figura 3.2: Efecto de la velocidad en el túnel. Plano A (superior). Campos vectoriales de velocidad promedio para el Caso 1 (columna izquierda): $v = 6 \text{ m/s}$; Caso 2 (columna derecha): $v = 12 \text{ m/s}$. Zonas dentro del modelo (renglones): frontal(f), central(c) y posterior(p). Diferente escala de tamaño de vectores por fila desde arriba hacia abajo: 0.35, 0.75 y 1.98 m/s . Factor de magnificación 5. Modelo en el centro del túnel. Ventana: corrediza. Elaboración propia.

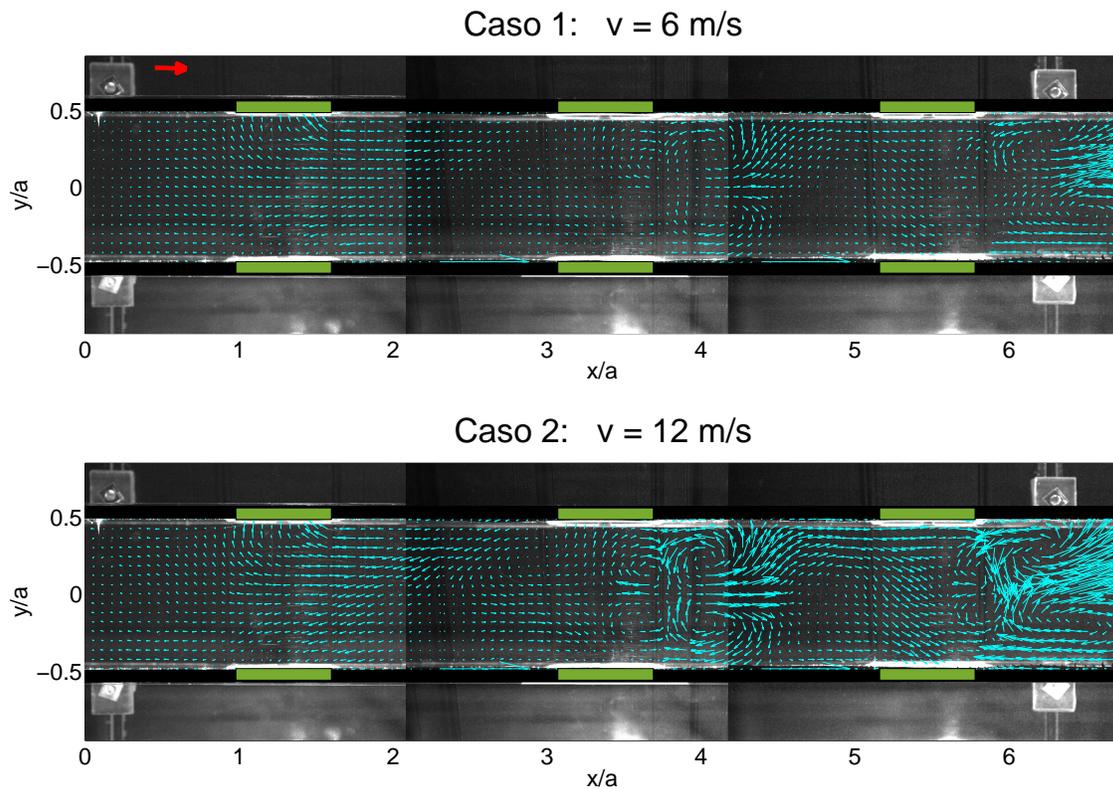


Figura 3.3: Efecto de la velocidad en el túnel. Plano A. Campos vectoriales de velocidad promedio unidos con imagen de fondo de la medición. Arriba: Caso 1: $v = 6 \text{ m/s}$; Abajo: Caso 2: $v = 12 \text{ m/s}$. Modelo en el centro del túnel. Ventana: corrediza. Misma escala respecto al vector más grande de 1.98 m/s para ambos campos. Factor de magnificación 5. Elaboración propia.

Efecto del tipo de ventana

En esta sección se describe el comportamiento del flujo interno del modelo en campos vectoriales, al cambiar el tipo de ventana: ya sea corrediza o abatible. El estudio fue hecho a una velocidad externa de 12 m/s , en el plano B (aproximadamente a la altura de la cabeza de los pasajeros sentados) y con el modelo en el centro del túnel. Se eligió este plano debido a que el plano A (en la abertura de la ventana) para la ventana abatible presentaba refracción y reflejos del láser perjudiciales para la cámara.

Para estudiar este efecto, se requieren comparar entonces los campos de velocidad promedio para los casos 2 contra 3 que se muestran en la figura 3.4. En estos campos sólo se muestra la zona central (columna izquierda) y posterior (columna derecha) del modelo debido a que fueron las que presentaron más cambios. Los campos vectoriales

de estos casos se escalaron con un único vector de magnitud 1.98 m/s . Se aplicó un factor de magnificación de 10 con un salto doble en renglones y columnas para poder visualizarlos mejor. Se usó un tiempo entre pulsos de $150 \mu\text{s}$. Los recuadros verdes en los bordes del modelo significan el área que abarca la ventana y en la cual los vectores encima de esta no fueron válidos debido a los reflejos ocasionados. Para el caso de la ventana abatible, los recuadros son más grandes, debido a que la ventana se abre hacia adentro.

Se puede observar que la velocidad presenta valores mayores para la ventana corrediza (caso 2). Los valores de velocidad más elevados se ubicaron en la zona posterior para ambos casos. Ambas tienen una distribución heterogénea, donde las zonas de mayor velocidad se ubican a la altura de las puertas del vagón.

En los campos se pueden ver varias diferencias por el tipo de ventana. En primer lugar, las estructuras de flujo se ven más similares para las zonas central y posterior de la ventana corrediza (caso 2) en comparación con las mismas zonas de la ventana abatible (caso 3). Evidentemente, las características del flujo dentro del vagón cambian drásticamente al cambiar el tipo de ventana.

En general, se ve que el flujo para la ventana abatible es principalmente unidireccional (en sentido contrario al flujo externo) para la zona central y se encuentran menos estructuras vorticosas. Estas estructuras se presentan mayormente en la vecindad de las puertas en ambos tipos de ventana. Por otro lado, para la ventana abatible se observa que el flujo no es simétrico. En el caso de la ventana corrediza se observa cierta simetría respecto al eje X en $y/a = 0$.

Efecto de la posición del vagón en el túnel

En esta sección se describe el comportamiento del flujo interno en campos vectoriales, al cambiar su posición con respecto al túnel de viento, manteniendo las demás variables constantes. El estudio fue realizado en el plano B, a una velocidad en el túnel de 12 m/s y ventana abatible. Las posiciones que se estudiaron fueron con el modelo al centro del túnel y en la posición más pegada a la pared; es decir, a 2 cm de distancia desde la pared del modelo a la pared del túnel, como se menciona en el capítulo anterior.

Los casos correspondientes 3 y 4 de la figura 3.4 muestran los campos vectoriales de velocidad promedio para las posiciones central y cerca de la pared. Sólo se muestra la zona central y posterior debido a que fueron las que presentaron más cambios.

—PLANO B—

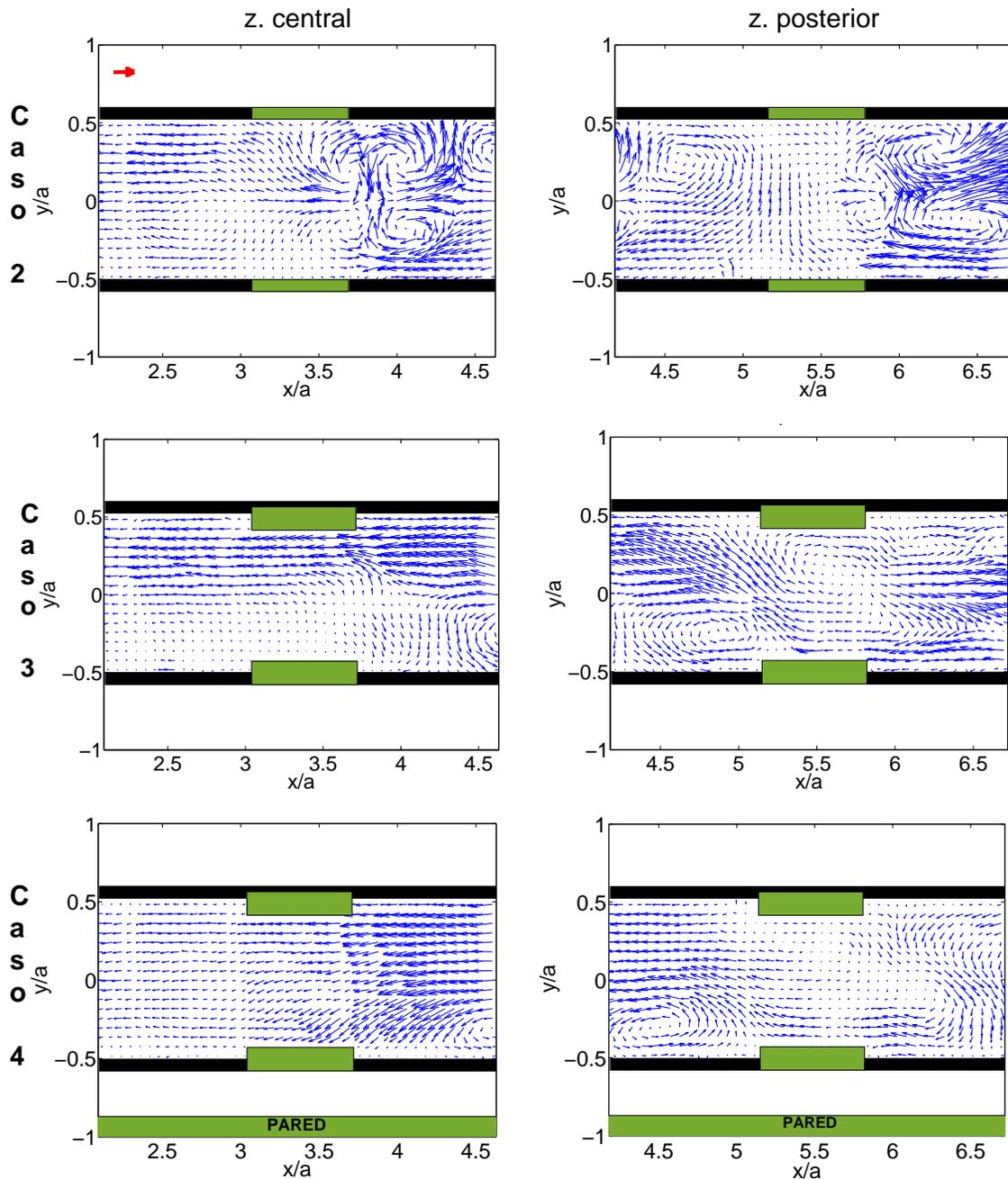


Figura 3.4: Efecto del tipo de ventana y posición del modelo en el túnel. Plano B. Campos vectoriales de velocidad promedio. Efecto del tipo de ventana: Caso 2 (v. corrediza) vs Caso 3 (v. abatible): ambos en el centro del túnel. Efecto de la posición del modelo: Caso 3: centro del túnel vs Caso 4: pared. Columnas por zona dentro del modelo: zona central (columna izquierda) y zona posterior (columna derecha). Para todos los campos: velocidad en el túnel: $v = 12 \text{ m/s}$, misma escala de 1.98 m/s y factor de magnificación 10. Elaboración propia.

Los campos anteriores se escalaron con un único vector de magnitud 1.98 m/s . Se aplicó un factor de magnificación de 10 con un salto doble en columnas y renglones. Se usó un tiempo entre pulsos de $150\ \mu\text{s}$ para la posición central y $450\ \mu\text{s}$ para el modelo cerca de la pared. El único motivo de usar tiempos diferentes fue que se obtuvieron mejores resultados para otro tiempo al momento de las primeras pruebas para la posición de la pared.

Los campos vectoriales muestran que el flujo es esencialmente simétrico en la zona central cuando el vagón está cerca de la pared del túnel de viento (caso 4). En contraste, cuando el vagón está colocado en la parte central del túnel (caso 3), el flujo parece estar más concentrado hacia uno de los lados del modelo. Este resultado no se esperaba y no se puede decir con certeza si se debió a una condición particular del flujo o debido a algún error experimental.

En ambos casos, en la zona central la dirección del flujo es principalmente contraria al flujo principal. Para la posición central del modelo (caso 3), se puede ver que hay una fuente de flujo aproximadamente en $(3.7,0)$, en forma de línea. La zona posterior se observa más turbulenta y con más estructuras vorticosas. En algunas de las regiones inmediatas a la ventana, se observa menor velocidad que las regiones a la izquierda o derecha de estas.

Se puede ver que los valores de mayor velocidad están más distribuidos longitudinalmente para el caso del modelo en la posición central del túnel. Los valores de velocidad más grandes se dieron para esta posición.

Distribución espacial (planos)

En esta sección se describe el comportamiento del flujo interno del modelo en distintos planos de medición. Para esto se muestra el caso 2, que incluyó mediciones en los planos A (superior, ubicado aproximadamente en medio de la abertura de las ventanas), B (medio, ubicado aproximadamente a la altura de la cabeza de los pasajeros sentados) y C (inferior, a la altura de las espinillas); manteniendo los otros parámetros constantes. Este caso corresponde a una velocidad en el túnel de $v = 12\text{ m/s}$, posición del modelo (centro) y tipo de ventana (corrediza). Por último se describe lo que ocurre en el plano D (caso 5), que fue medido con una combinación diferente de variables: velocidad de 6 m/s , posición central y ventana abatible. Es importante tener en cuenta que parte de la información de los campos siguientes ya se mostró anteriormente; sin embargo, estos corresponden a una nueva escala, que se unificó para poder comparar los tres planos

bajo un mismo vector de referencia.

La figura 3.5 muestra el plano A, B y C en dos zonas: frontal (columna izquierda) y posterior (columna derecha). Los campos se escalaron con un único vector de referencia de magnitud $v = 1.98 \text{ m/s}$, que fue la velocidad máxima localizada en la zona posterior para el plano A (superior). Para todos los vectores se aplicó un factor de magnificación de 7, con un salto doble mixto. Se usó un tiempo entre pulsos de $150 \mu\text{s}$. En estos campos no se muestra la zona central del modelo, debido a que esta presentó problemas de iluminación en el plano C (inferior) para todas las mediciones. Por otro lado, la misma presentó pocas variaciones entre los planos A y B.

En los planos A y B se puede observar que las zonas de mayor velocidad se encuentran en la zona posterior del modelo, aproximadamente sobre $y/a = 0$; desplazadas con respecto a la ventana, debido a que el aire entra con una dirección aproximada de 45° . También se puede observar que hay zonas de muy baja velocidad que coexisten con otras de muy alta velocidad; es decir, existen renglones de flujo muy heterogéneo. Evidentemente, las máximas velocidades se presentan en el plano superior (A) en donde se encuentra la abertura de la ventana tipo corrediza. En el caso de la velocidad de flujo externo de 12 m/s , en la zona posterior, es donde aparece la velocidad más alta obtenida en todas las mediciones y para todos los casos dentro del modelo, equivalente a 1.98 m/s y que corresponde con la zona de infiltración de aire por las ventanas en el plano A.

Por otro lado, si se observan los campos de la figura 3.3, las velocidades menores se presentaron en la zona frontal. Debido a esto, es probable que exista menor enfriamiento que en las zona central o posterior; ya que como menciona Osborne (1970) o en el artículo de Yuan y You (2007) en un andén, el enfriamiento es función de la velocidad de las corrientes de aire (ver sección de ventilación en la introducción de esta tesis).

Se puede observar que en la sección frontal para todos los planos, existe un flujo unidireccional de derecha a izquierda entre ventanas contrarias, mientras que para la otra mitad u otras zonas (central y posterior), el flujo presenta ambos sentidos. En el plano C se ve que la dirección preferencial es en sentido contrario al flujo exterior. Por lo tanto, no se puede decir que exista un flujo unidireccional a lo largo de todo el vagón en dirección contraria al flujo exterior, como reportan Kale et al. (2007).

En general y como primera observación, se puede ver que las estructuras de flujo promedio son esencialmente simétricas respecto al eje $y/a = 0$ en la mayor parte de las zonas del modelo, para los casos 1 y 2, en el plano A (superior) y B (medio). En estos se pueden ver unas estructuras de flujo interesantes en la zona central y posterior;

como por ejemplo, cuatro estructuras vorticosas con diferente dirección de giro así como con una zona de estancamiento justo al centro de estas. Estas estructuras chocan entre sí y el flujo entre ellas es bastante rápido en dirección longitudinal. Se deduce que son consecuencia de la entrada o salida de aire por las ventanas, provocando mezclado y recirculación. Es importante recordar que estos patrones de flujo representan a un promedio de cien campos instantáneos como se mencionó anteriormente.

En el plano inferior o C, en la parte posterior, también se puede observar una región vorticosa que tiene un ligero comportamiento de fuente. Sin embargo, es en este plano donde el flujo es básicamente unidireccional y con menores variaciones en comparación con los planos superiores (ver campos de intensidad de turbulencia de las figuras 3.12, 3.13 y 3.14, en la subsección de Distribución Espacial).

Es interesante observar que al descender de plano, la velocidad en la zona frontal aumenta ligeramente, mientras que en la zona posterior disminuye de la coordenada x/a : 6 a 6.5 y aumenta ligeramente de 4.5 a 5. En la zona posterior del plano C, la velocidad aumentó en ciertas zonas y en otras disminuyó; es decir, el flujo se hizo más heterogéneo. Las zonas de alta velocidad para el plano A y B son más puntuales y de menor área que en el plano C.

En el plano A y en menor medida en el B, se puede ver que en la zona frontal hay tendencia del flujo a salir por el par de ventanas. En las otras zonas (central y posterior) del plano A también se observan salidas pero menos marcadas. Esto no significa que por todas las ventanas salga todo el tiempo aire. Al observar con detenimiento los campos de velocidad instantáneos, se verificó que el flujo de aire entra (o sale) en ambos sentidos inclusive para una misma ventana. Sin embargo, como se comprobó en la sección de capacidad de ventilación de este capítulo, es evidente que en este plano, la mayor salida de flujo se dio en la parte frontal y las entradas, aunque en menor medida, en la zona posterior y central. El hecho de que en la zona aladaña a la abertura de las ventanas (último renglón de vectores) para las zonas central y posterior, se vea menos marcada la salida, indica que el flujo es principalmente tridimensional en esa zona. En consecuencia, es necesario hacer más mediciones en otros planos y a detalle en las ventanas, para buscar otras posibles entradas de flujo.

Es de resaltar que los resultados obtenidos para el plano A fueron muy similares al estudio realizado por Kale et al. (2007) y a lo reportado por Kettlewell et al. (sf); en donde el aire entra por la zona posterior, cambia de sentido y se dirige a la zona frontal para salir por las ventanas, donde existe una zona de baja presión al exterior.

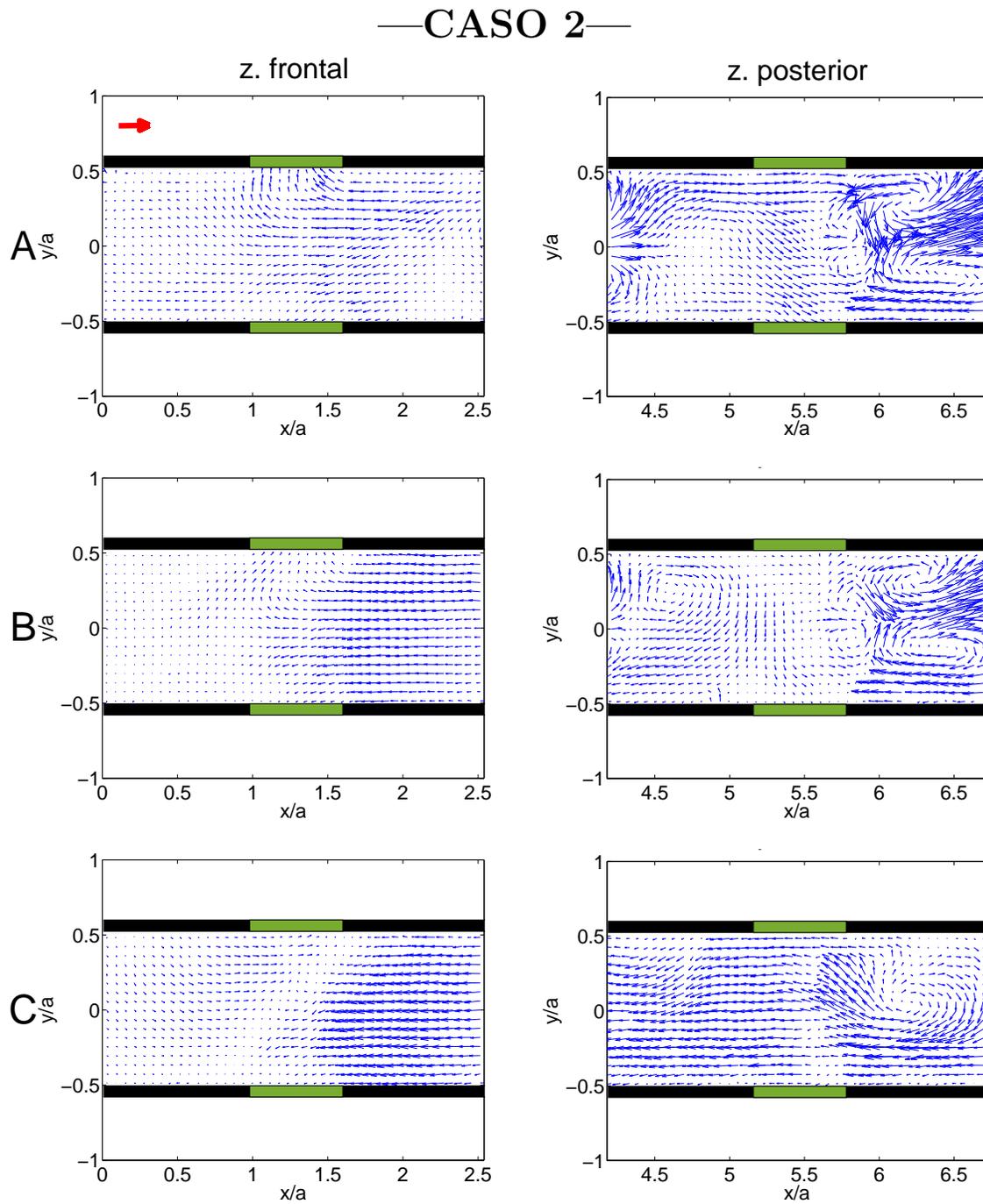


Figura 3.5: Campos vectoriales de velocidad promedio en diferentes planos, por zonas. Filas desde arriba: planos de medición A, B y C. Columna izquierda: zona frontal (f). Columna derecha: zona posterior (p). Velocidad en el túnel $v = 12 \text{ m/s}$; modelo en posición central; ventana corrediza. Misma escala para todos de 1.98 m/s . Factor de magnificación 7. Elaboración propia.

La figura 3.6 muestra campos vectoriales de velocidad promedio para el plano D. Se muestra el modelo completo dividido por las tres zonas. Los campos se escalaron con un único vector de tamaño 1.98 m/s . Se aplicó un factor de magnificación de 23 con un salto doble mixto. Este factor creció mucho debido a que las velocidades en general dentro del modelo fueron muy bajas a comparación del vector que se usó para escalar de 1.98 m/s . Se usó un tiempo entre pulsos de $500 \mu\text{s}$. Se puede ver que en la zona frontal las velocidades son mayores, principalmente en la dirección vertical y cercana de las ventanas. Esta va disminuyendo hacia la zona posterior. Se puede observar un flujo circulatorio a los lados de las ventanas en cada zona. Esto confirma la suposición hecha en las mediciones de que existe un flujo en la dirección vertical del vagón, aunque mucho menos perceptible que en la dirección horizontal. La distribución de velocidad es muy heterogénea y presenta valores bajos a comparación del flujo exterior (6 m/s) de alrededor de 0.5 m/s máximo.

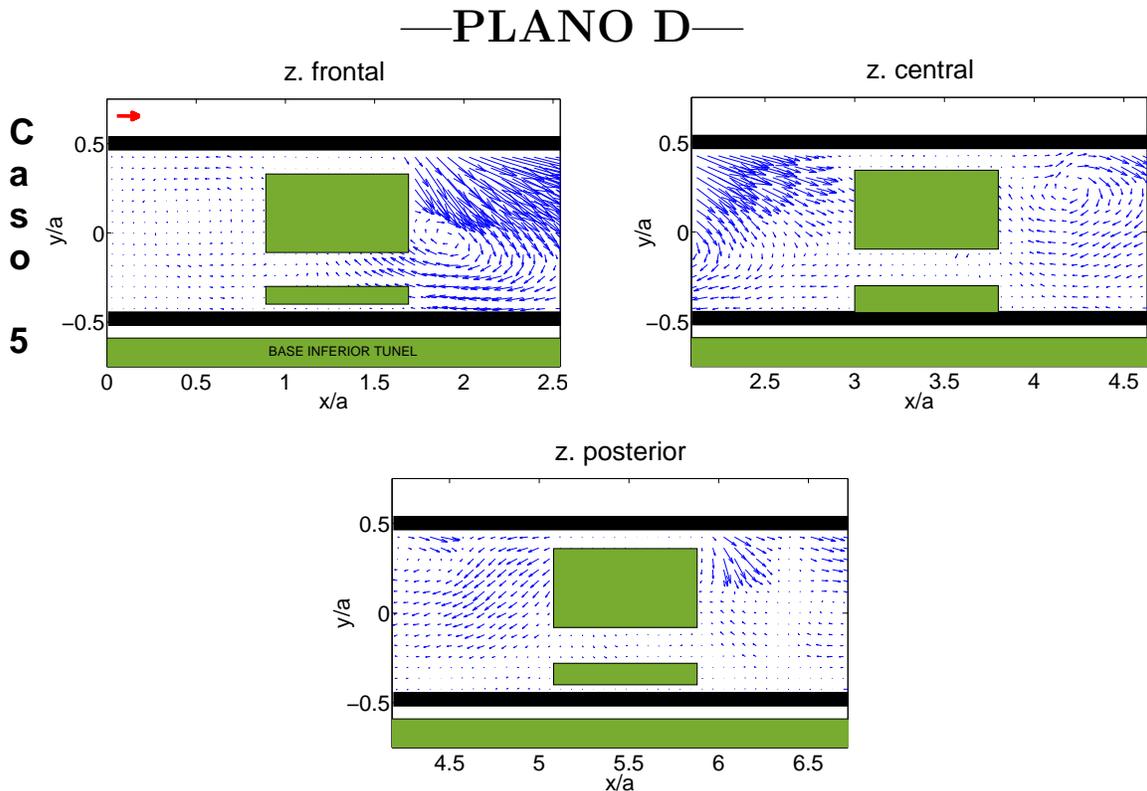


Figura 3.6: Campos vectoriales de velocidad promedio para el plano D (vertical) del modelo en configuración horizontal. Caso 5. Primera fila: zona frontal (izquierda) y zona central (derecha). Segunda fila: zona posterior. Velocidad en el túnel: $v = 6 \text{ m/s}$. Posición en el centro del túnel, ventana abatible. Misma escala de tamaño de vectores de 1.98 m/s . Factor de magnificación 23. Elaboración propia.

3.2.3. Perfiles de velocidad

En esta sección se muestran los perfiles de velocidad vectoriales en la dirección del flujo (eje X). Las tres zonas se escalaron con respecto al mismo vector de referencia de magnitud 1.98 m/s . En la figura 3.7 se muestran los perfiles de velocidad en el plano A, para la ventana corrediza y posición central en el túnel (Caso 2). En las zonas cercanas a la pared se puede observar claramente el gradiente de velocidades indicando que la velocidad disminuye por el principio de no deslizamiento.

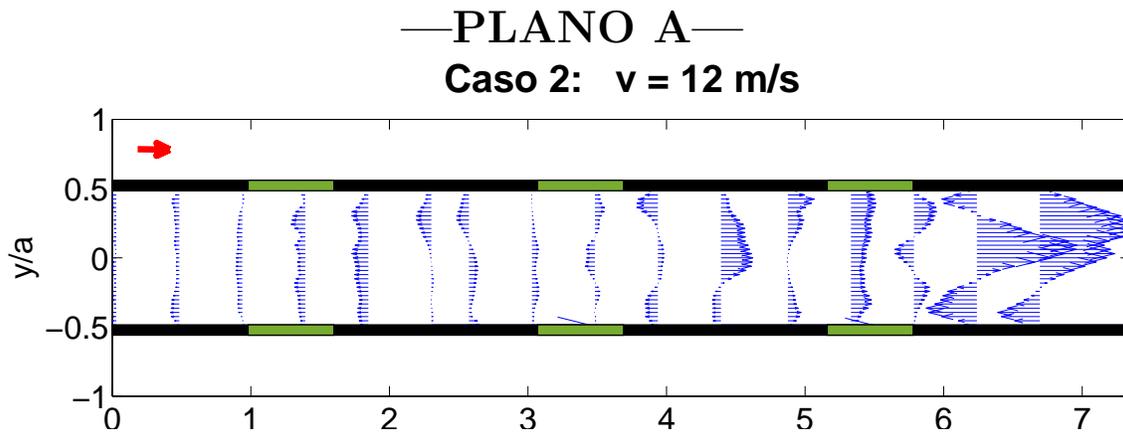


Figura 3.7: Perfil de velocidad promedio para el plano A del modelo completo. Caso 2. Velocidad en el túnel: $v = 12 \text{ m/s}$. Posición del modelo en el centro del túnel, ventana corrediza. Escala con 1.98 m/s y factor de magnificación 3. Elaboración propia.

Efecto del tipo de ventana

Los campos de la figura 3.8 muestran los perfiles de velocidad promedio en dirección del flujo (eje X) en el plano B para ambos tipos de ventana (Casos 2 y 3). La velocidad en el túnel fue de 12 m/s y el modelo se ubicó en el centro del túnel. Las tres zonas del campo unido se escalaron igualmente a un vector de magnitud 1.98 m/s . Se aplicó un salto cada 15 columnas y en renglones sencillo. El factor de magnificación único fue de 4.

Se puede ver que en la ventana corrediza (Caso 2), el flujo cambia de dirección a partir de la mitad del modelo como ya se había visto en este plano. Para la ventana abatible (Caso 3), el flujo es predominante en la dirección contraria al flujo exterior del modelo. La velocidad es más uniforme en la zona frontal para la ventana corrediza. En el caso de la ventana abatible, el flujo se ve más cercano a la pared superior.

—PLANO B—

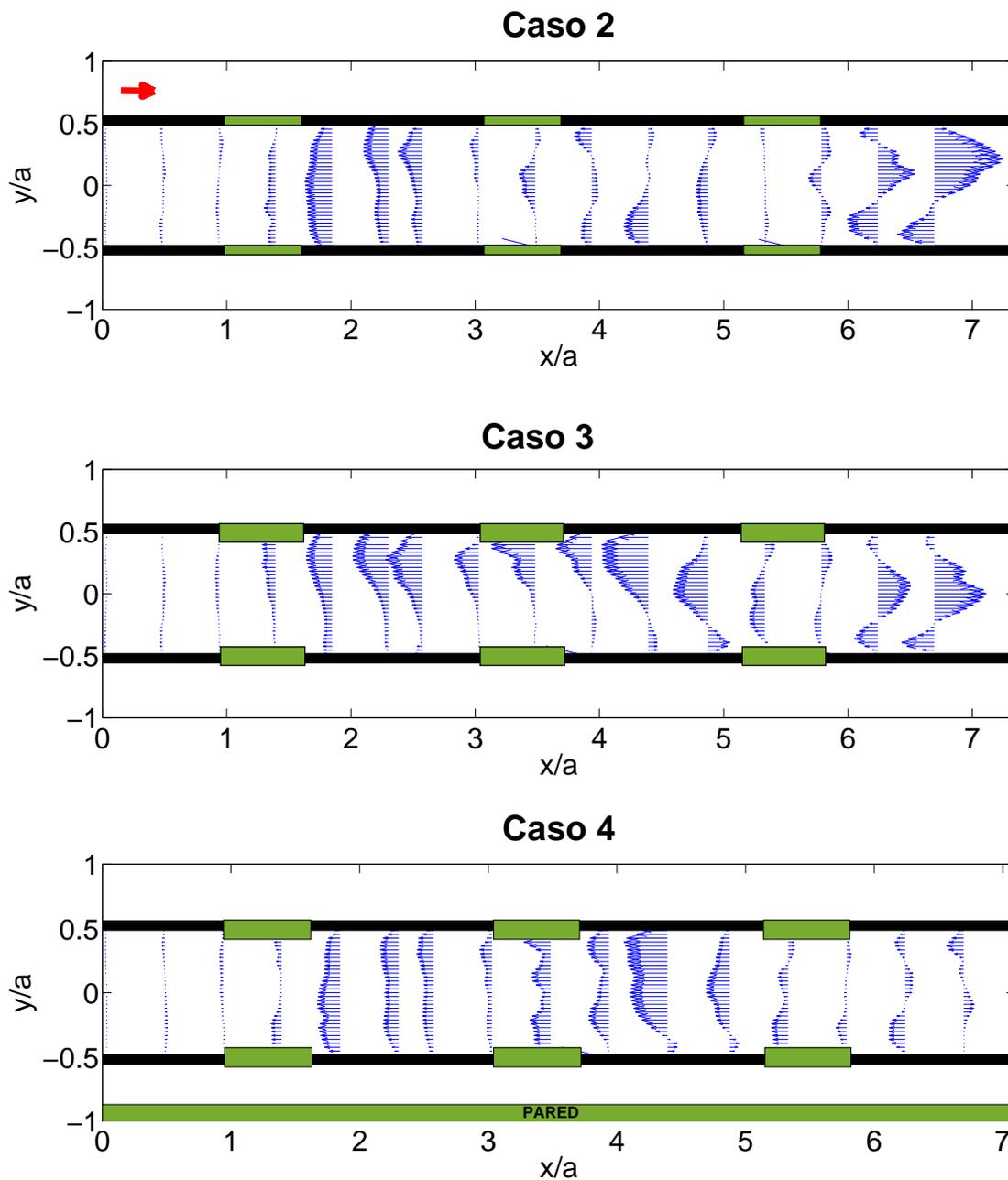


Figura 3.8: Efecto del tipo de ventana y posición del modelo en el túnel. Plano B. Perfiles de velocidad promedio. Efecto del tipo de ventana: Caso 2 (v. corrediza) vs Caso 3 (v. abatible): ambos en el centro del túnel. Efecto de la posición del modelo: Caso 3: centro del túnel vs Caso 4: pared. Para todos los perfiles: velocidad en el túnel: $v = 12 \text{ m/s}$, misma escala con 1.98 m/s y factor de magnificación 4. Elaboración propia.

En el caso de la ventana abatible se puede observar una corriente de fluido no simétrico que conecta las tres zonas del plano. Para ambos casos la velocidad fue menor en la zona frontal del modelo y además en la zona central se observa que el flujo comienza a ser más unidireccional hacia la zona frontal y en dirección contraria al flujo, como se ha demostrado en las figuras anteriores.

Efecto de la posición del vagón en el túnel

Los campos vectoriales de la figura 3.8 muestran los perfiles de velocidad promedio en dirección X para el efecto de la posición del modelo: Caso 3 (centro del túnel) y Caso 4 (cerca de la pared). Para ello las tres zonas del campo se escalaron igualmente a un vector de magnitud 1.98 m/s . Se aplicó un salto cada 15 columnas y en renglones sencillo. El factor de magnificación unificado fue de 4.

En ambos casos se puede ver que el flujo es predominante en dirección contraria al flujo externo. Hay mayor simetría en el flujo respecto al eje $y/a = 0$ con el modelo en posición cercana a la pared. Como ya se mencionó, esto no se esperaba.

3.2.4. Líneas de corriente

Las líneas de corriente promedio representan las trayectorias de las partículas en movimiento durante la medición. Para todos los casos se calcularon para iniciar su trazo cada 7 columnas y cada 6 renglones, para fines de una mejor visualización. Sobre estas se encimó el campo vectorial de velocidades normalizado, para que todos los vectores tuvieran el mismo tamaño y magnitud pero conservaran su dirección y sentido.

Estos campos resaltan la información de las estructuras de flujo encontradas en los campos vectoriales. Es importante mencionar que los resultados muestran lo que sucede en promedio con los flujos de aire y no son instantáneos. Debido a que el flujo fue tridimensional, en algunas zonas las líneas de corriente se ven discontinuas.

La figura 3.9 muestra las líneas de corriente calculadas para el plano A, con la ventana corrediza y posición central del modelo (caso 2). En la figura se pueden observar nuevamente las estructuras vorticosas obtenidas para los campos vectoriales del plano A.

—PLANO A—

Caso 2

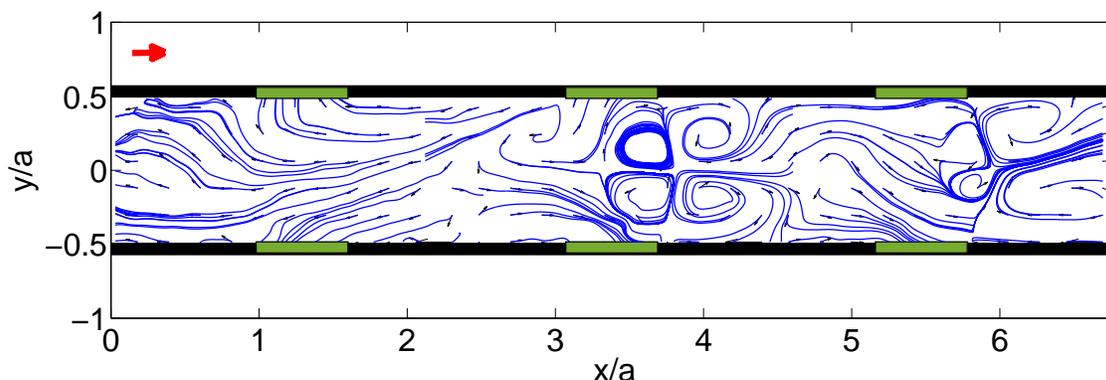


Figura 3.9: Líneas de corriente promedio para el plano A del modelo completo. Campo vectorial asociado con magnitudes de velocidad unitarias, manteniendo dirección. Caso 2. Velocidad en el túnel: $v = 12 \text{ m/s}$. Posición del modelo en el centro del túnel, ventana corrediza. Elaboración propia.

Efecto del tipo de ventana

Las líneas de corriente de la figura 3.10 corroboran que la ventana corrediza (Caso 2) en el plano B provoca un flujo interno más complicado y turbulento que la ventana abatible (Caso 3). Se puede ver que esta última ventana presenta un flujo principalmente unidireccional. Ambos casos presentan flujo asimétrico, sin embargo la ventana corrediza tiende a presentar un flujo más simétrico respecto al eje longitudinal del modelo.

Efecto de la posición del vagón en el túnel

Las líneas de corriente de la figura 3.10 indican que el flujo es similar en ambas posiciones: Caso 3 (centro del túnel) y Caso 4 (cerca de la pared), pero más uniforme y simétrico en la zona central, al pegarse a la pared del túnel. Como ya se mencionó, esto no se esperaba. Además se observa en la zona frontal para el modelo cercano a la pared, una tendencia del flujo a dirigirse hacia la ventana inferior.

—PLANO B—

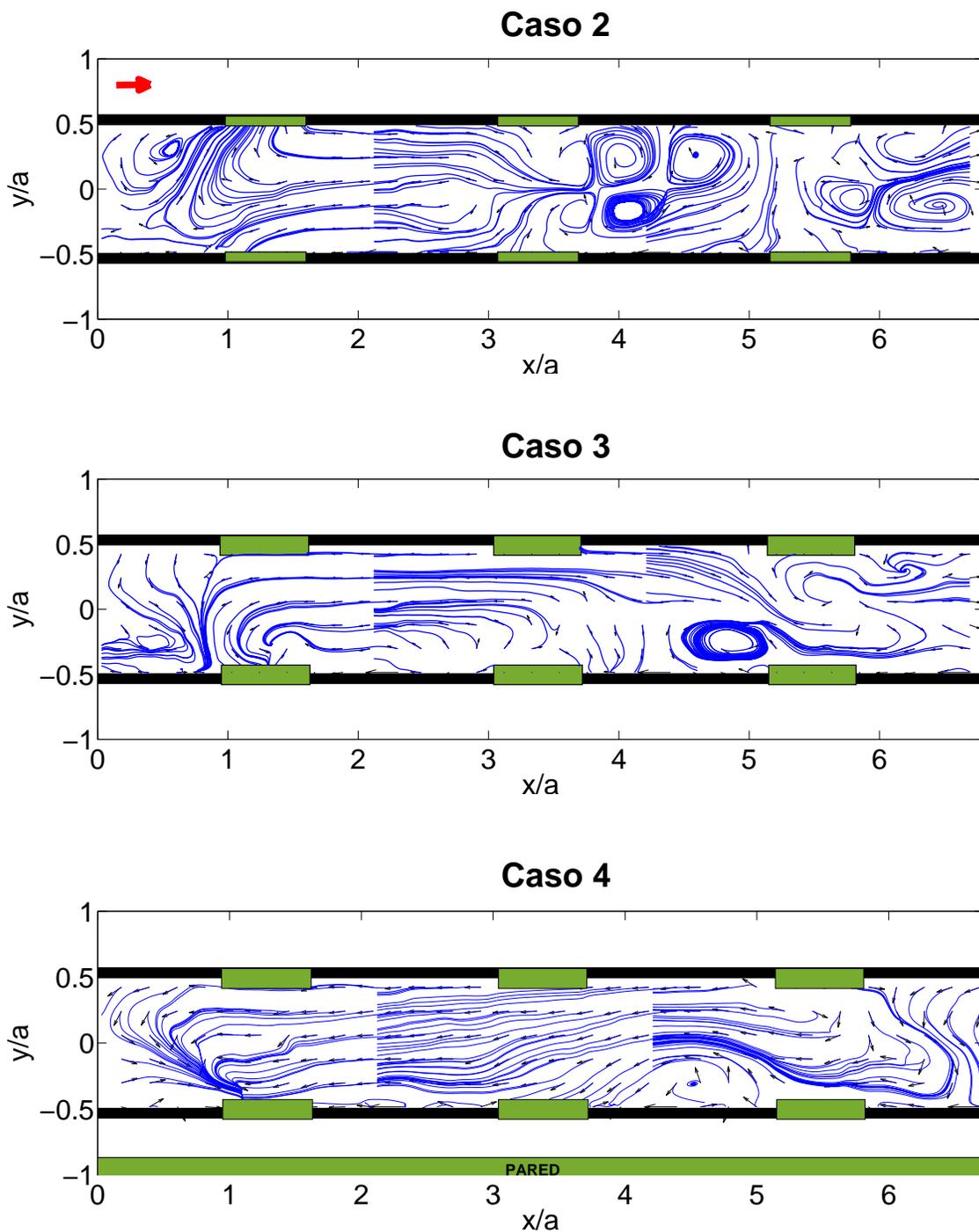


Figura 3.10: Efecto del tipo de ventana y posición del modelo en el túnel. Plano B. Líneas de corriente promedio. Efecto del tipo de ventana: Caso 2 (v. corrediza) vs Caso 3 (v. abatible): ambos en el centro del túnel. Efecto de la posición del modelo: Caso 3: centro del túnel vs Caso 4: pared. Para todos los campos: velocidad en el túnel: $v = 12 \text{ m/s}$ y misma escala. Elaboración propia.

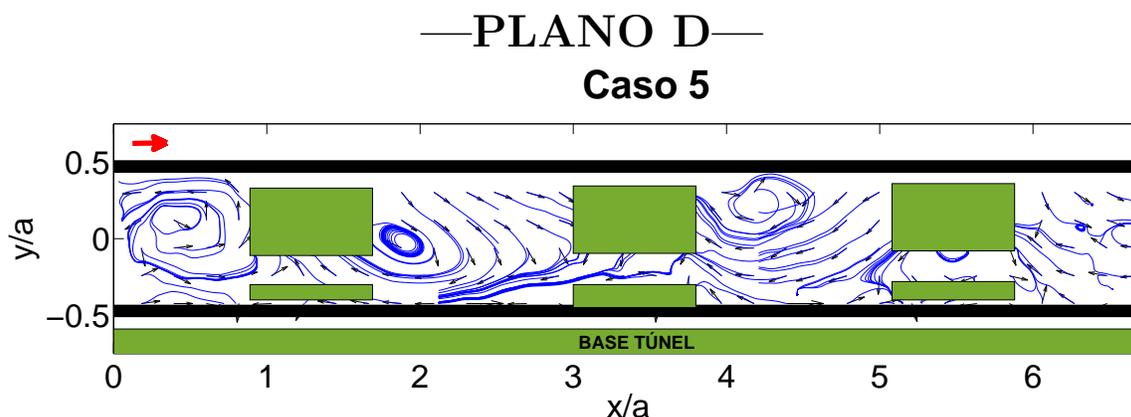


Figura 3.11: Líneas de corriente promedio para el plano D (vertical) del modelo completo. Campo vectorial asociado con magnitudes de velocidad unitarias, manteniendo dirección. Caso 5. Velocidad en el túnel: $v = 6 \text{ m/s}$. Posición del modelo en el centro del túnel, ventana abatible. Elaboración propia.

Distribución espacial (planos)

Las líneas de corriente para los cuatro planos se muestran para el caso 2 y el caso 5 incluidos en las figuras anteriores. Los planos en orden de aparición se muestran en las páginas 89-91.

Se puede observar que el flujo es complejo. Entre el plano A y B las estructuras de flujo son muy similares, sin perder de vista que al descender de plano la velocidad disminuyó en la mayor parte del modelo. En el plano A de la figura 3.9 se puede ver también que existe un flujo de entrada y salida en las cercanías de las ventanas de todo el modelo; siendo la zona frontal la que presenta más salidas. Esto no implica que no haya entradas en este mismo plano, pero probablemente ocurran también en otro plano desconocido.

Se puede observar que para el plano A y B las estructuras de flujo son muy similares, aunque a menor velocidad para el plano B. Para el plano C no se muestran líneas de corriente debido a los problemas mencionados de iluminación en la zona central.

Como ya se mencionó, las líneas de corriente para el plano D de la figura 3.11 confirman la suposición de que existe un flujo en la dirección vertical; siendo más marcado en la zona frontal.

3.2.5. Intensidad de turbulencia

Los campos escalares de intensidad de turbulencia dan una buena perspectiva para saber cualitativamente y cuantitativamente en dónde se está mezclando más el aire dentro del modelo debido a que muestran las regiones en donde hay mayor fluctuación del flujo. Se ha estudiado que en ambientes cálidos es favorable a la sensación de confort térmico; sin embargo, en ambientes a temperaturas bajas, puede ser incómoda. Debe de existir cierta combinación entre velocidad del flujo e intensidad de turbulencia, ya que incluso una corriente a alta velocidad y baja intensidad de turbulencia puede provocar discomfort (Xia et al., 2000) y (Griefahn et al., 2000).

Efecto de la velocidad del flujo

La figura 3.12 muestra la comparación del efecto de la velocidad exterior en los campos de intensidad de turbulencia. El plano de medición fue el A a una velocidad en el túnel de 6 m/s (caso 1) y de 12 m/s (caso 2), al centro y ventana corrediza. La intensidad de turbulencia I se obtuvo usando la ecuación $I = U_{fluc}/U_{ref}$ donde $U_{ref} = U_{ext}$, como lo muestran las ecuaciones 2.13 y 2.14 del capítulo anterior. La escala de colores representa la intensidad de turbulencia adimensional, donde los colores cálidos son valores mayores y los colores fríos valores menores. Todos los campos de este tipo se encuentran igualmente escalados. En los campos se pueden observar unas líneas punteadas que indican la unión entre las tres secciones del vagón (frontal, central y posterior). Debido a que las imágenes tenían un traslape común de 31 mm en cada unión, esta zona se dividió en dos para respetar la mitad correspondiente de cada campo en esta unión y no repetir información. Las líneas punteadas indican la mitad de cada traslape. Este procedimiento se aplicó para todas las uniones de secciones del vagón en los campos mostrados.

Se puede notar que la magnitud de la intensidad de turbulencia, así como su extensión aumentan a mayor velocidad en el túnel. En general, se pueden ver los mismos patrones de intensidad de turbulencia para ambas velocidades. En la zona frontal se tienen valores de turbulencia bajos para ambos casos, indicando posible estancamiento del flujo.

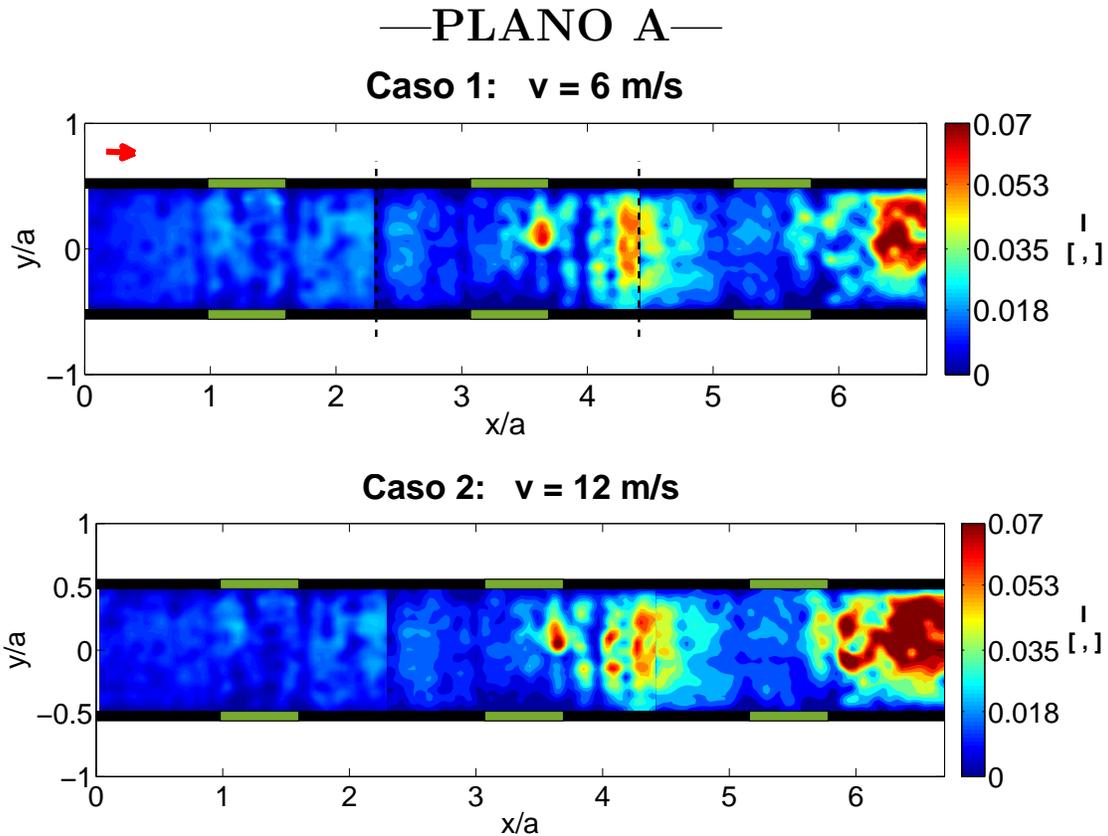


Figura 3.12: Efecto de la velocidad en el túnel. Plano A. Campos de intensidad de turbulencia promedio (adimensional) para el modelo completo. Arriba: Caso 1: $v = 6 \text{ m/s}$; Abajo: Caso 2: $v = 12 \text{ m/s}$. Modelo en el centro del túnel. Ventana: corrediza. Elaboración propia.

Efecto del tipo de ventana

Los campos de intensidad de turbulencia (Fig. 3.13) muestran que para ambos tipos de ventana (Caso 2 y 3), la mayor fluctuación de velocidad ocurre en la parte posterior (a $2/3$ de longitud) del vagón, en la región entre las ventanas adyacentes. Es decir, en la zona donde entra el flujo exterior. Los valores de turbulencia mayores se presentaron en la ventana corrediza (Caso 2) en las mismas zonas que la otra ventana. Por tanto, se podría decir que el mezclado de aire interno y externo es mayor para este tipo de ventana; debido a que la intensidad de turbulencia puede servir como indicativo del mezclado de diferentes capas de fluido, como reportan Xia et al. (2000) y Palacios-Morales et al. (2016).

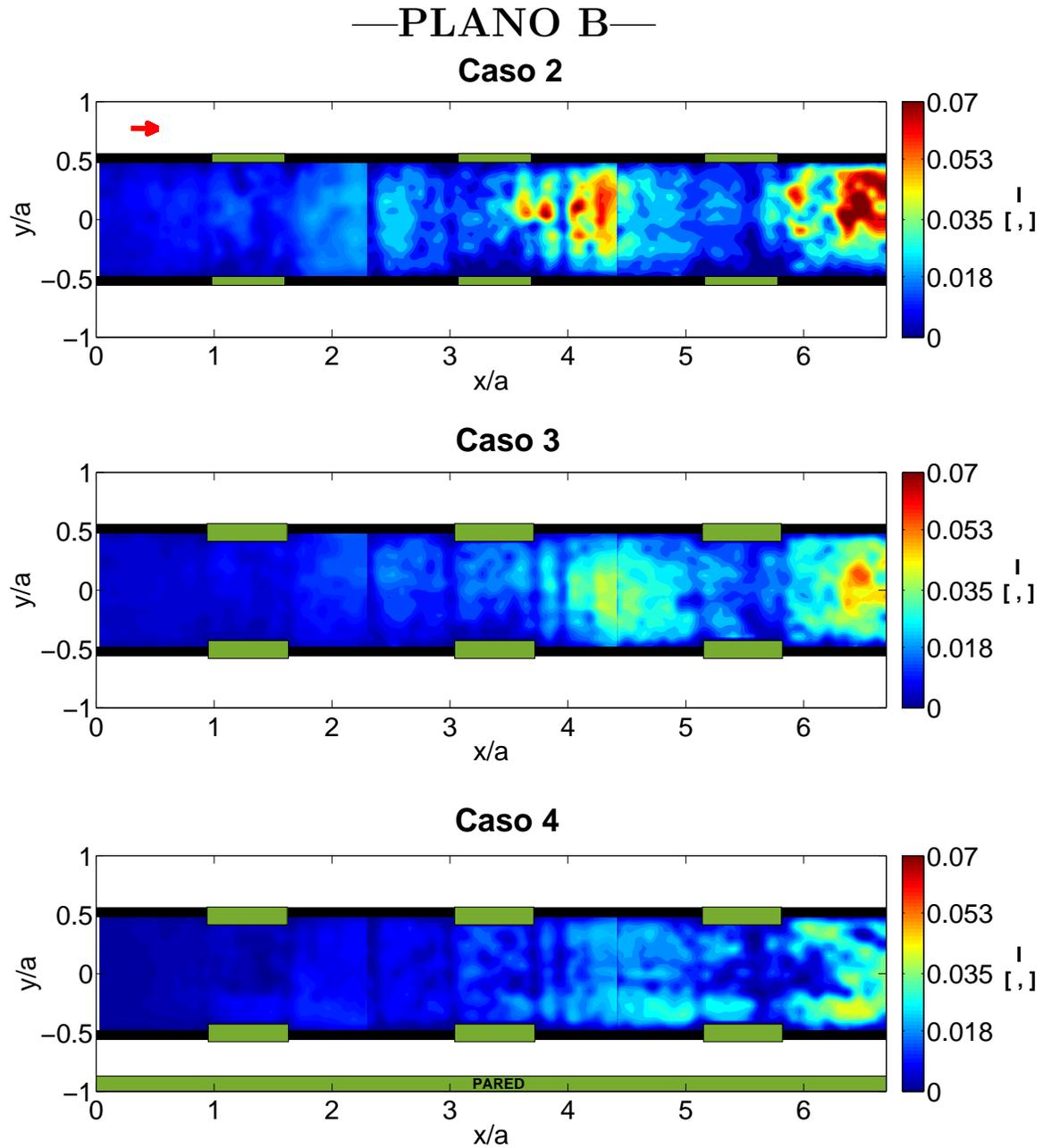


Figura 3.13: Efecto del tipo de ventana y posición del modelo en el túnel. Plano B. Intensidad de turbulencia promedio. Efecto del tipo de ventana: Caso 2 (v. corrediza) *vs* Caso 3 (v. abatible): ambos en el centro del túnel. Efecto de la posición del modelo: Caso 3: centro del túnel *vs* Caso 4: pared. Para todos los campos: velocidad en el túnel: $v = 12 \text{ m/s}$ y misma escala. Elaboración propia.

En la zona frontal ambos tipos presentan valores muy bajos, ligeramente mayor para el tipo corrediza. Debido a esto, es de esperar que el confort térmico en esta zona sea menor debido a que hay menores fluctuaciones de la velocidad del aire, necesarias en cierta medida para sentir confort como se reporta en el apartado de ventilación del capítulo anterior. Debido a tener menor fluctuación de velocidades, es de esperar que la temperatura sea mayor debido a un menor mezclado y por lo tanto, una menor transferencia de calor.

La ventana corrediza presenta una mejor y mayor distribución de la misma. Esto es más deseable que tener concentraciones elevadas de intensidad de turbulencia en zonas puntuales, donde sólo unos cuantos pasajeros se podrían sentir cómodos. En general, ambos presentan regiones de turbulencia similares.

Efecto de la posición del vagón en el túnel

En la figura 3.13 se puede ver que la distribución de la intensidad de turbulencia es similar para ambas posiciones del vagón (casos 3 y 4). Los valores son muy parecidos también, siendo ligeramente mayor para el modelo en el centro del túnel. Las zonas inmediatas a la abertura de las ventanas presentan baja intensidad, mientras que las zonas donde se ubican las puertas es mayor. En la zona frontal se puede ver que para ambos casos, la turbulencia es baja y se tiene un flujo con pocas variaciones tal y como se ha visto en todos los casos anteriores.

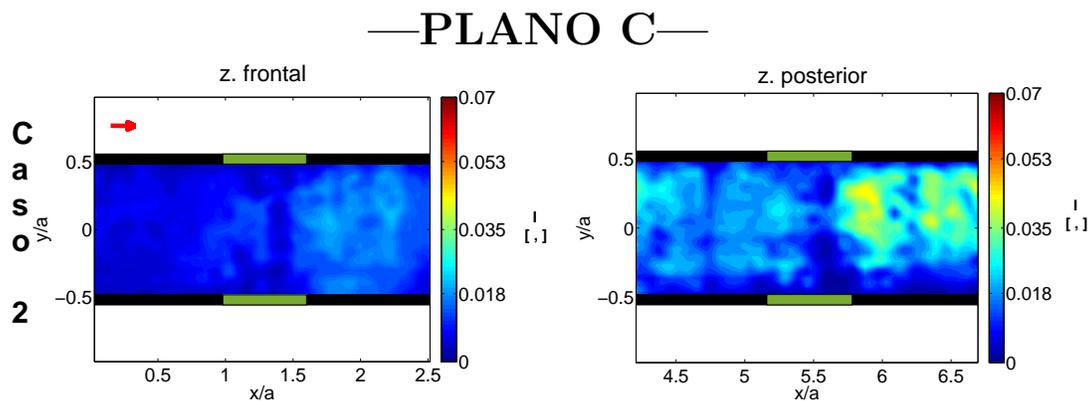


Figura 3.14: Intensidad de turbulencia promedio para el plano C. Zona frontal (izquierda) y zona posterior (derecha). Caso 2: velocidad en el túnel: $v = 12 \text{ m/s}$, posición del modelo en el centro del túnel, ventana corrediza. Misma escala. Elaboración propia.

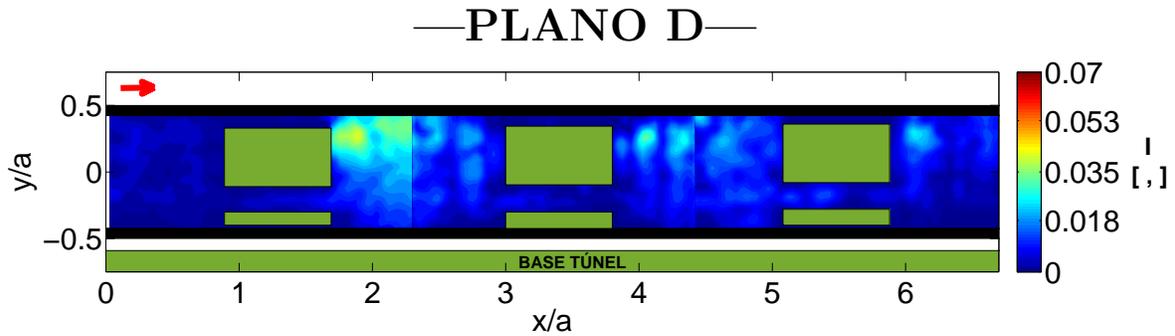


Figura 3.15: Intensidad de turbulencia promedio para el plano D (vertical) del modelo completo. Caso 5. Velocidad en el túnel: $v = 6 \text{ m/s}$. Posición del modelo en el centro del túnel, ventana abatible. Elaboración propia.

Distribución espacial (planos)

Los planos A, B y C (superior, central e inferior) forman parte del caso 2 que se encuentra en las figuras anteriores. Los planos en orden de aparición se muestran en las páginas 93-96.

En general, todos los campos muestran una intensidad de turbulencia baja (en una escala del 100%). Los valores de turbulencia mayores se concentraron en la parte posterior y central del modelo para el plano A y B en la vecindad de las puertas del vagón real. El mayor valor obtenido en todos los campos fue de 0.1103 u 11% para el plano A en la parte posterior, donde también se encuentran las corrientes más rápidas, indicando las entradas de flujo. Esto indica que dichas zonas presentan mayor fluctuación y recirculación (mezclado) de aire en comparación con el resto del vagón. Por otro lado, disminuye conforme se desciende de plano para las mismas ubicaciones.

La zona frontal del vagón es la que presenta menores valores. Por tanto, puede deducirse que las fluctuaciones de velocidad son menores en esta región, indicando nuevamente, menor mezclado. Como ya se mencionó anteriormente, estas condiciones de flujo podrían ser desfavorables para el confort térmico; como lo reportan autores como Osborne (1970); donde un ambiente cómodo se caracteriza por condiciones estimulantes con pequeñas variaciones en el flujo, que estimulan a los órganos sensoriales y dan un efecto psicológico de bienestar a diferencia de un flujo de aire invariable a cualquier velocidad.

Puede observarse también que el plano C (fig. 3.14) es el que presenta menores variaciones de flujo; es decir, una baja intensidad de turbulencia. Se puede observar también

que el plano B presenta un ligero aumento respecto al plano A para la zona central.

El campo de intensidad de turbulencia de la figura 3.15 muestra que las mayores fluctuaciones de velocidad ocurren en la zona frontal, entre ventanas en la parte superior (techo). No fue posible visualizar la zona de la ventana suficientemente bien debido a los reflejos del láser. En la parte posterior del vagón, sus valores resultaron relativamente bajos, al menos en el plano de medición.

Es interesante observar que para los planos de medición horizontales estudiados en esta tesis (superior, intermedio e inferior), la mayor intensidad de turbulencia ocurre en la parte posterior del modelo (véase por ejemplo las figuras 3.12, 3.13 y 3.14), lo cual es contrario al resultado obtenido para el plano de medición vertical mostrado en la figura 3.15.

Como se reportó en la introducción de esta tesis, el confort térmico depende de una adecuada combinación de muchos factores; por ejemplo, la intensidad de turbulencia y la velocidad del aire interior como estudiaron Xia et al. (2000). En este estudio se reporta que para ambientes cálidos (26 a 30.5 °C; 35 y 65 % de humedad relativa; Intensidad de turbulencia: 25 y 40 %), una alta intensidad de turbulencia es deseable, con valores de velocidad relativamente bajos para no causar molestias. En el caso particular de un ambiente generalmente cálido como el metro (≈ 30 °C), será necesario estudiar la combinación óptima de estos dos factores para que haya suficiente enfriamiento por velocidad del aire sin causar molestias, e intensidad de turbulencia para un mezclado efectivo. Una propuesta sería tener velocidades de bajas a moderadas e intensidad de turbulencia de moderada a alta. Es de resaltar que con los resultados encontrados es deseable que la intensidad de turbulencia obtenga una distribución más homogénea a lo largo del vagón.

3.3. Análisis de capacidad de ventilación (plano A)

En esta sección se presenta un análisis de la capacidad de ventilación o de manera formal, el gasto o caudal a través de superficies y líneas de control. Se habla de un gasto volumétrico por unidad de longitud Q , debido a que el estudio de PIV fue bidimensional en planos de medición y no se conoció completamente la distribución de velocidades tridimensional. Este análisis pretende hacer un acercamiento a obtener mayor información sobre las características del flujo real tridimensional.

Se realizaron cálculos y análisis de conservación de masa únicamente en el plano A o plano superior para la abertura de la ventana corrediza. Esto con el fin de cuantificar qué tanto aire entró o salió por las ventanas y fluyó a través de las zonas frontal, central y posterior.

El cálculo del gasto Q se basó en la información del campo vectorial de velocidades del plano mencionado (a la velocidad exterior del aire de 12 m/s). Para ello, se discretizó cada lado de las superficies de control rectangulares, en pequeñas secciones de longitud Δl , correspondientes al tamaño de las áreas de interrogación o separación entre vectores (2 mm). La delimitación o definición de estas superficies se muestra en la siguiente sección.

El gasto volumétrico a través de una superficie de control rectangular se define como $G = \bar{v}A$, donde A es el área que atraviesa el flujo y \bar{v} la componente de la velocidad promedio perpendicular al área. En el caso particular en dos dimensiones, el gasto por unidad de longitud, a través de cada elemento discretizado Δl se definió como:

$$q_i = v_i \Delta l \quad [m^2/s] \quad (3.5)$$

donde q_i es el gasto por unidad de longitud a través de cada segmento i de un lado de la superficie de control, v_i corresponde a la componente del vector velocidad del campo vectorial, i , normal a la frontera y Δl es la longitud del segmento i -ésimo.

El gasto total a través de cada lado de la superficie de control rectangular o de una línea para el caso de las ventanas, viene dado por la suma de gastos discretizados:

$$Q = \sum_i^l q_i \quad [m^2/s] \quad (3.6)$$

donde Q es el gasto total por unidad de longitud, l la longitud de la línea de control y q_i el gasto a través del elemento i -ésimo de longitud Δl . Se estableció la convención de que el flujo entrante tendría signo positivo y el saliente signo negativo.

3.3.1. Análisis de conservación de masa por zonas

Para realizar este análisis, se basó en la figura 3.16 que muestra las zonas al interior del modelo (frontal, central y posterior). Cada superficie de control se delimitó dentro de un área rectangular (recuadro azul), que sus bordes prácticamente coincidieron con los límites de la zona entre cada par de ventanas contrarias.

A través de cada lado de una superficie de control atraviesa un flujo en dos dimensiones o gasto por unidad de longitud, Q calculado como se explicó anteriormente. A cada flujo se le puso un nombre de acuerdo al lado de la superficie de control que atravesaba: Q1, Q2, Q3, Q4 y Q5; siendo Q5 el gasto sobrante o faltante para que se cumpliera el balance de masa. Para poder calcular el gasto neto, se usó la convención de que lo que entraba tendría signo positivo y lo que saliera, signo negativo, como se muestra en la figura 3.16.

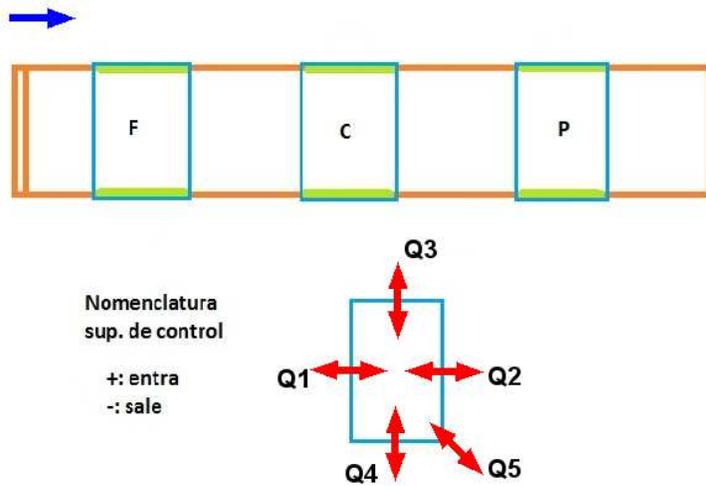


Figura 3.16: Esquema guía para representar el gasto calculado en las distintas superficies de control: frontal, central y posterior. Elaboración propia.

La conservación de masa implica que para un sistema con un flujo en estado estacionario, la cantidad o proporción de masa que entra, sea la misma que la que sale ($\dot{m}_{entra} = \dot{m}_{sale}$). Donde cada flujo másico es $\dot{m} = \rho A \bar{v}$. Debido a que el flujo se considera incompresible en este caso y de densidad constante, la contribución de la densidad se cancela y se calcula sólo el gasto volumétrico por unidad de longitud ($Q = A \bar{v}$). Entonces, la ecuación de conservación de masa se puede expresar de la siguiente manera:

$$\sum_{i=1}^5 Q_i = 0 \tag{3.7}$$

donde Q_i es el flujo volumétrico i -ésimo que entra o sale de una región de control.

Como el cálculo se realizó en un plano 2D, fue difícil que se cumpliera este balance; ya que el flujo es tridimensional. Por lo tanto, Q_5 da un estimado del flujo que entra

o sale fuera de la superficie de control en dirección perpendicular. Se calculó de la siguiente manera, con base en los gastos de 1 a 4:

$$Q_5 = - \sum_{i=1}^4 Q_i \quad (3.8)$$

Así, si Q_5 es muy pequeño, el flujo indica que tiene un comportamiento más planar (2D) que tridimensional (3D). Los resultados se indican en la tabla 3.2, que muestra el gasto promedio en el tiempo de la medición de PIV (25 s a frecuencia de captura de 4 Hz) por unidad de longitud para cada superficie de control delimitada por la zona de las ventanas: frontal, central y posterior. Se muestra la suma en valores absolutos de los gastos para cada zona ($|\Sigma|$). Así mismo se muestra el porcentaje que representa cada gasto respecto a la suma o 100 %.

Nomenclatura	Zona frontal		Zona central		Zona posterior	
	$\bar{Q} \times 10^{-3}$ (m^2/s)	%	$\bar{Q} \times 10^{-3}$ (m^2/s)	%	$\bar{Q} \times 10^{-3}$ (m^2/s)	%
\bar{Q}_1	-2.9	13.9	2.9	38.2	6	50
\bar{Q}_2	6.7	32.2	-1.1	14.5	-3	25
\bar{Q}_3 (vent. sup.)	-5.9	28.4	-2.1	27.6	-0.2	1.7
\bar{Q}_4 (vent. inf.)	-1.6	7.7	-0.6	7.9	-2.4	20
\bar{Q}_5	3.7	17.8	0.9	11.8	-0.4	3.3
$ \Sigma $	20.8	100	7.6	100	12	100
$\bar{Q}_{ventanas}$	-12.8					

Tabla 3.2: Resultados del gasto promedio por unidad de longitud por cada lado de las tres superficies de control en el plano A. Elaboración propia.

Al observar la tabla 3.2, se puede deducir y comprobar que el gasto fue asimétrico por las ventanas en el plano A (superior). No se puede saber con certeza la razón de esto, pero se esperaba que lo fuera, debido a la aparente simetría respecto al eje del modelo en los campos vectoriales correspondientes.

Se puede ver que la zona frontal es la que presenta un gasto más desbalanceado en el plano, indicado por $Q5$, el gasto sobrante más grande de las tres zonas; esto señala que esta zona es la que presenta un mayor flujo tridimensional. Así mismo, los valores indican que en esta zona (entre el par de ventanas frontales) es donde más fluido se moviliza, aunque sea a velocidades relativamente bajas. Por otro lado, $Q5$ para la zona posterior indica que el flujo es más bidimensional en esta región, ya que su valor es menor y hay un mayor balance en el plano. Estos resultados muestran consistencia con las gráficas del plano D, donde se ve un flujo ascendente y descendente principalmente para la zona frontal.

El gasto $Q_{ventanas}$ representa el flujo neto a través de todas las ventanas; siendo negativo o saliente en promedio.

3.3.2. Análisis del gasto instantáneo a través de las ventanas

Como caso particular, se calculó el gasto instantáneo a través de las ventanas en el mismo plano A. La gráfica de la figura 3.17 muestra la evolución en el tiempo del gasto por unidad de longitud a través de cada ventana durante el tiempo que se realizó la medición de PIV (25 segundos a una frecuencia de captura de 4 Hz). En la misma gráfica se puede ver la nomenclatura empleada para distinguir el gasto de cada ventana y el total a través de ellas.

Se puede ver en la tabla 3.2 de gasto promedio y en la gráfica de la figura 3.17, que el flujo neto a través de las ventanas $Q_{ventanas}$ o Q_{total} respectivamente, es negativo (de adentro hacia afuera del modelo), con variaciones y sin patrones definidos en general. Esto indica que en este plano y zonas adyacentes a las ventanas, hay más salidas de aire que entradas, pero no significa que no haya entradas. Aún así, este resultado no se esperaba.

En la gráfica de la figura 3.17 se puede ver que las ventanas que mostraron un flujo positivo; es decir, entradas de aire, fueron en orden de mayor a menor: e , c y f . Esto representa a algunas de las ventanas centrales y posteriores, sólo durante algunos instantes de tiempo.

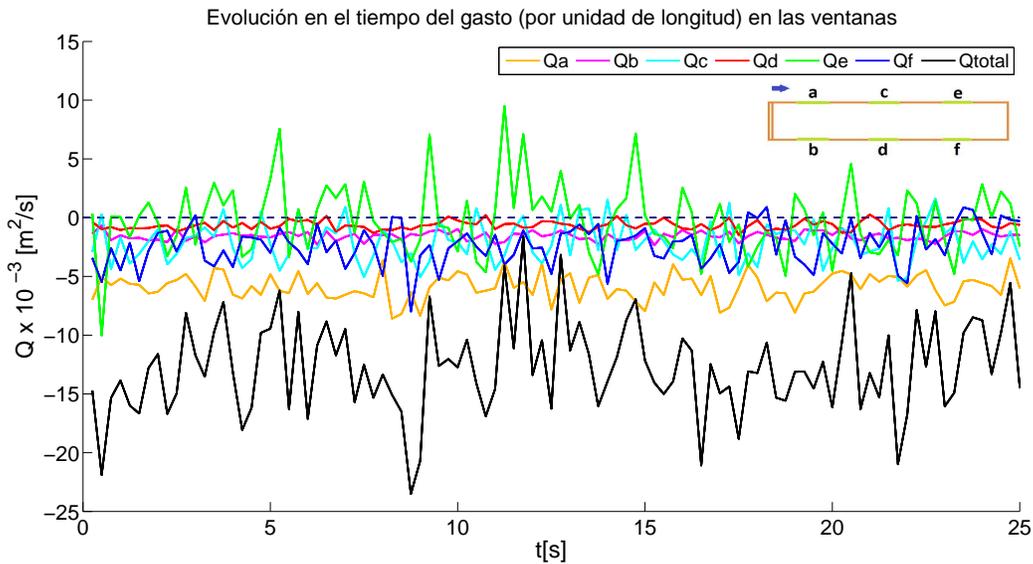


Figura 3.17: Gráfica de la evolución en el tiempo del gasto de cada ventana. Cada ventana está representada por letras: Qa, Qb, Qc, Qd, Qe y Qf como se muestra en el diagrama de la derecha. Intervalo de medición: 0.25 s. Tiempo total 25 s. Elaboración propia.

Es de notar que el flujo por la ventana *e* o posterior superior, presenta el flujo alternado de entrada y salida más marcado de todas las ventanas y es por donde entró más aire en este plano. La gráfica confirma que la mayor parte de la salida de aire se da a través de las ventanas frontales en este plano.

Por el principio de conservación de masa, al haber salidas de aire del modelo, implica que debe haber entradas, pero en un plano desconocido. Es por esto que es necesario hacer más mediciones en otros planos para ubicar con mayor certeza estas entradas. Así mismo, es recomendable hacer mediciones más detalladas cerca de las ventanas o emplear la técnica PIV-Stereo para obtener información en 3D.

3.4. Visualización

En esta sección se muestran imágenes obtenidas de visualización por humo. Estas imágenes fueron obtenidas con la misma iluminación que la usada para PIV, es decir, el mismo láser pulsado sincronizado con la cámara CCD. Lo que cambió fue el lente de la cámara, ya que se usó el lente grande (Nikon 24-120 *mm* 1:3.5-5.6D) para poder enfocar la mayor parte del modelo. El generador proporciona humo blanco con tamaño de partículas más pequeñas que las del usado para PIV, pero igual del orden de 1-3

μm . Las imágenes obtenidas en esta sección se realizaron a una velocidad del túnel relativamente baja; ya que a velocidades muy altas, la rápida dispersión del humo no permitió observar de manera detallada las características del flujo.

En las imágenes que se muestran, el flujo externo al modelo va de derecha a izquierda, en similitud con las mediciones hechas antes de invertir las imágenes en *Matlab*. Además a estas se les aumentó el brillo mediante el programa *ImageJ* para visualizar mejor el flujo interno.

Para esta serie de experimentos se enfocó el plano A, es decir, el plano para la abertura de la ventana del tipo corrediza. Las capturas fueron realizadas en modo *Single Frame Mode* en *DynamicStudio 2015a* a una frecuencia de adquisición de 4 Hz.

La figura 3.18 muestra una secuencia de ocho imágenes donde aparece el modelo enfocado en la zona frontal. En cada imagen se puede observar el primer par de ventanas y un tramo muy pequeño de las ventanas centrales. Las ventanas se pueden identificar por las líneas verdes y las sombras que proyectan sus bordes. El experimento se realizó inyectando humo en una parte del túnel aguas arriba de los paneles de rectificación del flujo. Una vez programada la velocidad en el túnel, se accionó el motor y comenzó el flujo. Se esperó un poco a que el flujo se desarrollara, aunque no por completo, debido a que el humo se dispersaba muy rápidamente. Se programó en este caso para frecuencia del motor de 2 Hz, correspondiente a una velocidad principal en el túnel de viento de 1 m/s. Cada imagen está igualmente espaciada en el tiempo por 2.5 s, dando un total de 17.5 s.

Se puede ver en la figura claramente el flujo externo al modelo, con comportamiento turbulento. Se constatar que primero no hay mucho humo dentro del modelo y al avanzar el tiempo, el humo entra al modelo y avanza en dirección contraria del flujo exterior hacia el frente del modelo, lo cual es consistente con los resultados de PIV mostrados anteriormente. También se observa un perfil de velocidades curvado al interior del modelo, donde la velocidad disminuye al pegarse a la pared (en concordancia con la condición de no deslizamiento). Lo que se observó en este experimento fue que no hubo muchas entradas de humo significativas en la zona frontal del vagón, sino que el flujo en el interior del mismo provenía principalmente de las ventanas ubicadas en la parte central del modelo para salir por las ventanas frontales. El flujo en la zona frontal parece ser más lento y se estanca conforme avanza más al frente. Esto muestra también congruencia con lo reportado en los resultados de PIV, donde las velocidades menores se presentaron en la zona frontal.

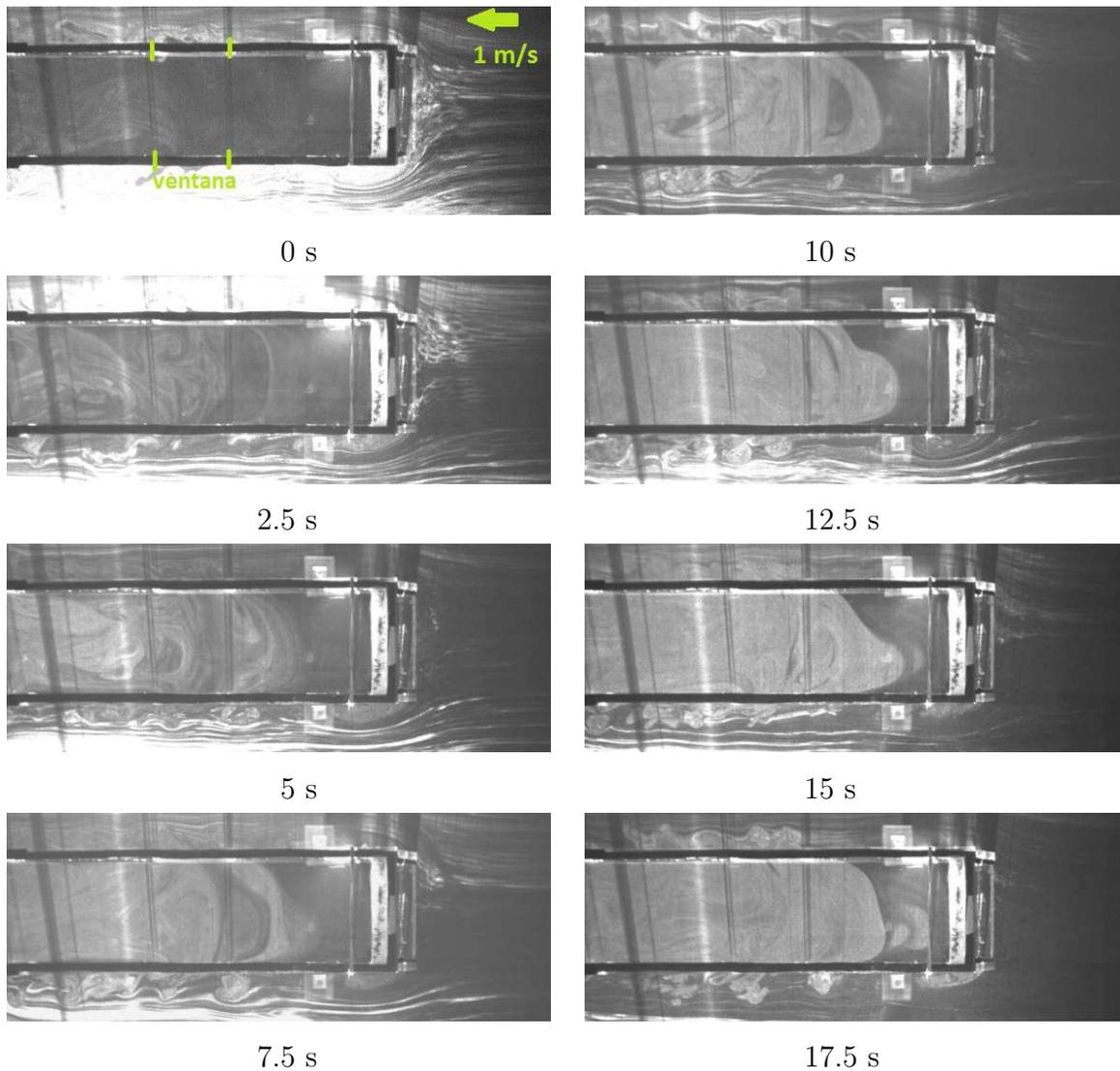


Figura 3.18: Flujo interno y externo en la zona frontal del modelo. El tiempo avanza desde la figura superior izquierda, hacia abajo, para continuar a la columna derecha. Tiempos: 0, 2.5, 5, 7.5, 10, 12.5, 15, 17.5 s. Velocidad del túnel: 1 m/s. Plano A, ventana corrediza. Elaboración propia.

La figura 3.19 muestra al modelo enfocado para observar las tres ventanas. Cada imagen está espaciada en el tiempo de la otra 0.5 s, dando un total de 3.5 s. Esta secuencia de ocho imágenes fue obtenida con las mismas condiciones de la figura anterior. Se puede observar un flujo de entrada al modelo por las ventanas centrales y posteriores, particularmente por la parte superior de cada imagen y entre cada par de ventanas. Estas entradas son aproximadamente simétricas respecto al eje longitudinal del vagón.

Se puede ver que el flujo entrante al centro tiende a dirigirse a la zona posterior del modelo, donde se frena porque choca con otro flujo en dirección contraria proveniente de la zona posterior.

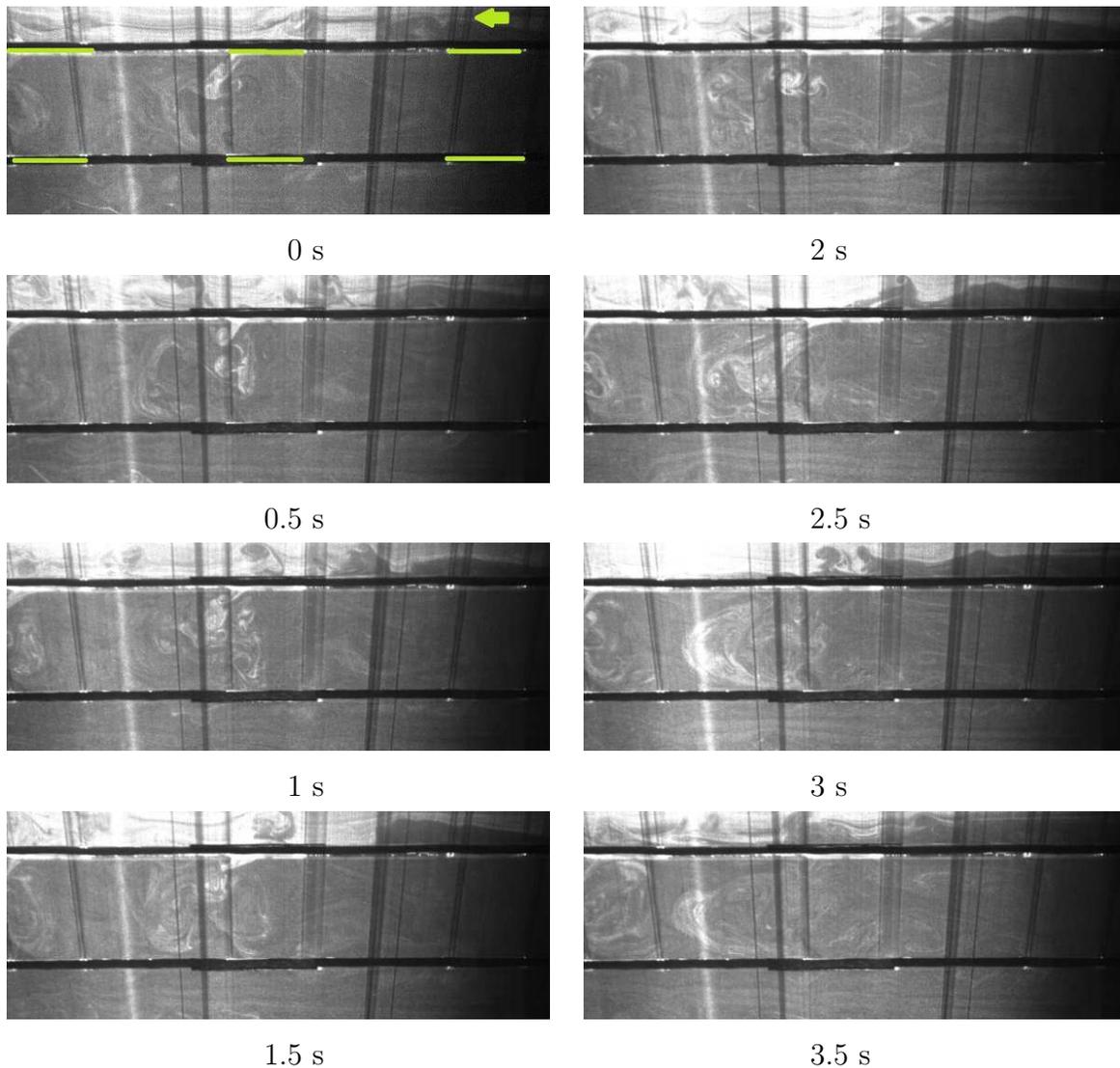


Figura 3.19: Flujo interno y externo en la zona central del modelo. El tiempo avanza desde la figura superior izquierda, hacia abajo, para continuar a la columna derecha. Tiempos: 0, 0.5, 1, 1.5, 2, 2.5, 3, 3.5 s. Velocidad del túnel: 1 m/s . Plano A, ventana corrediza. Elaboración propia.

Si se observa cuidadosamente el extremo izquierdo de cada imagen, justamente donde termina el par de ventanas posteriores, se puede ver un flujo de entrada aproximada-

mente simétrico por las mismas. El flujo entra con una dirección de entre 30 y 45° con respecto a la pared lateral del modelo con dirección igual al flujo exterior. Este flujo que entra provoca vórtices que interaccionan entre sí y provocan mezclado en el vagón. No se observa mucha entrada de flujo por las ventanas frontales. Entre cada par de ventanas se observa una alta fluctuación de velocidad y por lo tanto mayor turbulencia, todo esto en concordancia con lo mostrado en las mediciones con PIV.

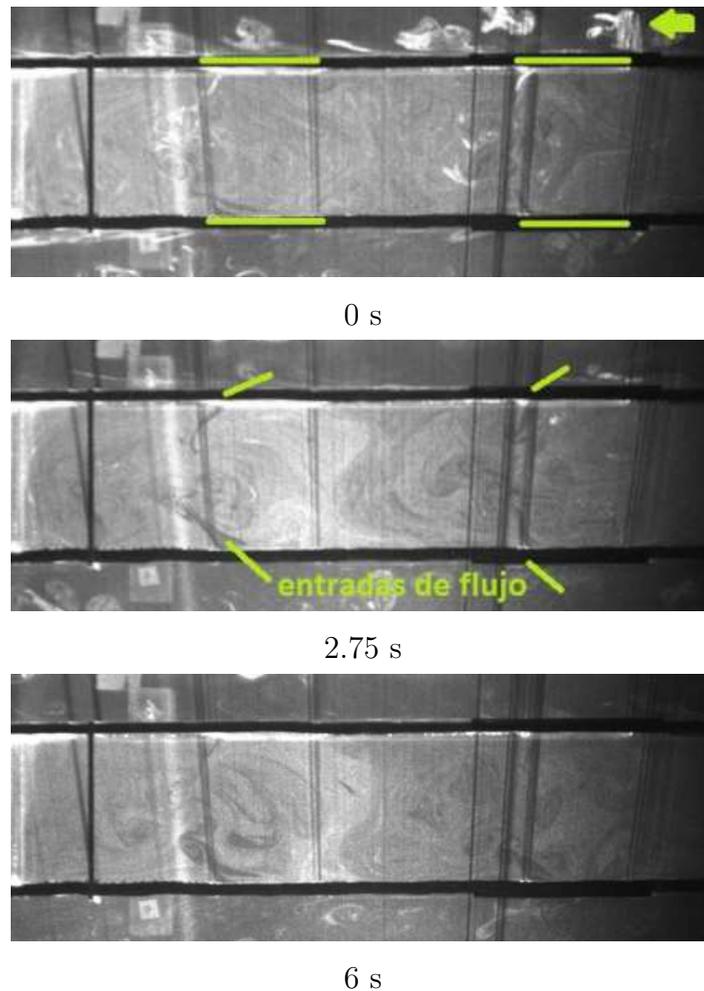


Figura 3.20: Flujo interno y externo en la zona central y posterior del modelo. El tiempo corre de la parte superior hacia abajo. Tiempos: 0, 2.75, 6 s. Velocidad del túnel: 1 m/s. Plano A, ventana corrediza. Elaboración propia.

La figura 3.20 muestra el modelo enfocado en la zona central-posterior. Las imágenes están espaciadas cada 2.75 s, variando el último intervalo por 3.25 s. El extremo

izquierdo de las imágenes coinciden prácticamente con la pared posterior del modelo y se puede ver una liga marcada por una sombra más oscura.

Se pueden observar entradas de flujo similares a la figura 3.19. En la primera imagen se pueden ver dos vórtices a la altura del par de ventanas posteriores, sobre el eje longitudinal del modelo. Estos vórtices se formaron por la entrada de aire de estas ventanas. En las ventanas centrales también aparecen estas estructuras de flujo pero más deformadas. El flujo entra con la misma dirección del flujo exterior para las ventanas posteriores con un ángulo aproximado de 45° . Esto muestra congruencia y similitud con los resultados obtenidos por PIV para este mismo plano, donde se pueden ver estas estructuras de flujo en la misma ubicación (en el área donde se ubicarían las puertas del vagón o entre ventanas) aunque a diferente velocidad del túnel. También existe coincidencia respecto al artículo de San Román Gutiérrez (2004), que refiere a estas zonas de entrada como patrones o de infiltración máxima.

Como anexo de esta tesis se incorporan algunos videos de las secuencias de imágenes mostradas. Estos pueden ser de utilidad para entender mejor el flujo y observar su comportamiento.

3.5. Comparación con un caso de investigación

Como se mencionó en la sección de estudios realizados, un caso relevante para esta tesis es un artículo en donde se midieron las velocidades del aire al interior de un vagón de metro real.

San Román Gutiérrez (2004) obtuvo que para un vagón vacío en reposo y en la cercanía de un ventilador encendido, las velocidades medidas en un plano 10 cm abajo del techo disminuían conforme se alejaba de su eje.

Se puede suponer que cuando el vagón está en reposo y no existe viento exterior, la velocidad cerca de la ventana es mucho menor ($\approx 0\text{ m/s}$) que la reportada a una distancia de 30 cm del ventilador, la cual fue de aproximadamente de 0.35 m/s . Es importante recordar que el ancho del interior de un vagón real es de aproximadamente 2.25 m . Por otro lado, en el mismo artículo, las mediciones a 20 cm de la ventana en la zona de infiltración del aire (ver figura 3.20), con el vagón en movimiento a una velocidad desconocida, indican que la velocidad del aire es de $v \approx 2\text{ m/s}$. Por lo tanto, podemos suponer que este último valor de velocidad se debe principalmente a la infiltración mencionada y la contribución del flujo generado por el ventilador es mínima

o nula en esta zona.

El gasto volumétrico a través de las ventanas, se puede calcular como:

$$G = \bar{v}A = U_{int}A_{ventana} \quad [m^3/s] \quad (3.9)$$

donde \bar{v} es la componente de la velocidad perpendicular a la ventana, que se puede considerar como la velocidad promedio en la zona de infiltración reportada, debido a su cercanía a la abertura U_{int} ; $A_{ventana}$ representa el área libre de entrada de aire por esta.

Suponiendo que el vagón se mueve a una velocidad nominal de 12 m/s (44 km/h), y que la velocidad relativa entre el vagón y el aire es justamente 44 km/h , entonces podemos calcular un gasto adimensional a través de las ventanas con base en parámetros del problema conocidos, definido como \dot{V}_{adim} . Sustituyendo al gasto volumétrico de la ecuación 3.9, se tiene:

$$\dot{V}_{adim} = \frac{G}{U_{ref}L^2} = \frac{U_{int}}{U_{ext}L^2}A_{ventana} \quad [,] \quad (3.10)$$

donde \dot{V}_{adim} es el gasto adimensional para el vagón a escala real y modelo, $U_{ref} = U_{ext}$ representa la velocidad de referencia exterior promedio del aire, U_{int} la velocidad representativa al interior (en la zona de infiltración), L es la longitud característica (en este caso el ancho externo) y $A_{ventana}$ el área libre de abertura de la ventana.

Con los datos obtenidos en el artículo y suponiendo una velocidad externa nominal de 12 m/s (44 km/h), se puede calcular la proporción U_{int}/U_{ext} para el vagón real (p):

$$\frac{U_{int}(p)}{U_{ext}(p)} = \frac{2}{12} = \frac{1}{6} = 0.166 \quad (3.11)$$

que sería esencialmente igual que para el caso del modelo en la misma zona de infiltración, para el plano A en la zona posterior (ver campos vectoriales para este plano) a una velocidad medida de 1.98 m/s .

$$\frac{U_{int}(m)}{U_{ext}(m)} = \frac{1.98}{12} = 0.165 \quad (3.12)$$

Es importante mencionar que si se invierte el cociente anterior, se obtiene una relación de que las velocidades al interior del modelo son aproximadamente 6 veces menores en magnitud que la velocidad exterior. Esto muestra similitud con el artículo

de San Román Gutiérrez (2004) y con Kale et al. (2007), donde se reporta que las velocidades al interior fueron un orden de magnitud menores que la velocidad externa al autobús escolar.

Adicionalmente, se puede suponer que las características geométricas adimensionales $A_{ventana}/L^2$ son esencialmente las mismas para el vagón y el modelo. Por lo tanto, se pueden igualar los gastos adimensionales entre el modelo y el vagón real (o prototipo), considerando una constante de proporcionalidad c que incluya el error por las diferencias entre ellos, como los detalles de la forma geométrica:

$$\dot{V}_{adim}(p) = c\dot{V}_{adim}(m) \quad (3.13)$$

Entonces el gasto adimensional para modelo (m) y vagón (p) puede ser similar:

$$\dot{V}_{adim}(m) \simeq \dot{V}_{adim}(p) \quad (3.14)$$

Por lo tanto, suponiendo todo lo anterior, podemos esperar que aunque los números de Reynolds del modelo y vagón no coincidan, las características cinemáticas (estructuras y patrones) del flujo sean similares entre modelo y vagón a escala real, debido a que los gastos adimensionales en la zona de infiltración son proporcionales y el flujo es principalmente inercial. Así mismo, las imágenes de visualización o el ejemplo de PIV al inicio del capítulo, indican que el flujo interno no cambió mucho a una velocidad significativamente menor.

Capítulo 4

Conclusiones

En la presente tesis se realizó un estudio del comportamiento del flujo de aire al interior de un modelo a escala de vagón de metro para analizar la ventilación. El modelo está basado en un tren tipo MP-82. Se obtuvo el campo de velocidades a través de la técnica de velocimetría por imágenes de partículas (PIV). Los experimentos se realizaron en un túnel de viento cerrado. En particular, se estudió el efecto de tres variables en distintos planos de medición: velocidad en el túnel de viento, tipo de ventana y posición del vagón con respecto a la pared del túnel. Los resultados indican que, en general, el flujo es tridimensional en todas las secciones del vagón. Sin embargo, existe un flujo preferencial de la parte posterior a la frontal del modelo como se ha reportado en algunos estudios.

Se validó la suposición de que a mayor velocidad externa, mayor velocidad interna. Las estructuras de flujo no cambiaron significativamente. Como consecuencia de esto, la intensidad de turbulencia aumentó, aunque con la misma distribución para los dos casos. La información de los otros campos muestra consistencia entre sí.

Con respecto al tipo de ventana, se observó que los valores más grandes de velocidad se presentaron para la ventana corrediza en la parte posterior. Para ambas ventanas la distribución de intensidad de turbulencia fue similar, aunque significativamente mayor en magnitud para la ventana corrediza. Esto indica que hay mayor mezclado de aire para este tipo de ventana. Los perfiles de velocidad señalan que el flujo es más unidireccional para la ventana abatible, aunque en general ambas presentan flujo en ambos sentidos.

En relación a la posición del vagón, los resultados fueron inesperados y poco concluyentes. Los campos de velocidad obtenidos con el vagón centrado al túnel indicaron que el flujo es asimétrico con relación al eje longitudinal del vagón. En contraste, cuando

el vagón se acercó a una de las paredes del túnel, los patrones de velocidad mostraron un flujo mucho más simétrico. Se necesitarían hacer más mediciones. Se observó que la intensidad de turbulencia fue similar en distribución pero mayor para la posición central.

Para distintos planos de medición, se observó que en general al descender de plano, la velocidad disminuye. Las velocidades al interior siempre son menores respecto a la velocidad del flujo externo en una amplia proporción; siendo la magnitud de la velocidad exterior seis veces la de la velocidad interior. Esto se pudo comparar consistentemente con algunos casos de investigación. Los campos de velocidad en el plano D (vertical) confirman la suposición de que existe flujo en dirección vertical del vagón, principalmente en la zona frontal, aunque a una velocidad considerablemente menor comparada con los planos horizontales.

La intensidad de turbulencia disminuye y su distribución es más homogénea al descender de plano, lo que indica menos fluctuaciones de velocidad. En la zona frontal se observó poca velocidad y pocas variaciones, indicando posible desconfort térmico según lo establecen los estándares y teoría de la ventilación reportada. Los valores más grandes ocurrieron en el plano A, donde se tienen las velocidades más altas, particularmente en la zona central y posterior, entre ventanas y sobre el eje del vagón. Es en estas zonas donde ocurre mayor mezclado debido a las corrientes de aire entrantes. Es deseable que se mejore su distribución para obtener un confort general en todo el vagón para cualquier ventana y posición. Además se propone una combinación de velocidad de baja a moderada con intensidad de turbulencia de moderada a alta.

Los balances de gasto (por unidad de longitud) en las diferentes regiones analizadas corroboraron que el flujo no es simétrico dentro del modelo y la conservación de masa en el plano no ocurrió, mostrando nuevamente que el flujo fue tridimensional. En la zona frontal es donde el flujo es más tridimensional por presentar un gasto muy desbalanceado. Además, es donde se presenta la mayor salida de aire. Es en la zona posterior donde el gasto es más balanceado, lo que indica un flujo más bidimensional. El gasto promedio en las ventanas fue negativo, es decir saliente, con dirección de adentro hacia afuera del vagón, lo que indica que las entradas de aire se pueden presentar en un plano no medido. El análisis de gasto instantáneo por las ventanas mostró muchas fluctuaciones de entrada y salida particularmente en las ventanas posteriores.

Los resultados de visualización a baja velocidad complementaron a los de PIV. Las imágenes obtenidas muestran que existe completa congruencia con los patrones de flujo obtenidos con PIV. Se observó, nuevamente que el flujo es completamente

tridimensional al interior y que existen diferentes estructuras de flujo tales como la formación de vórtices que evolucionan dentro del vagón.

Aunque el número de Reynolds no se empató para el experimento y la realidad, se puede esperar, que en general las estructuras de flujo y el efecto de las variables estudiadas no deberían cambiar demasiado; debido a que el gasto adimensional fue muy similar entre modelo y vagón real y el flujo es principalmente inercial.

Es de resaltar que hace falta más experimentación para estudiar otras variables del problema; por mencionar algunas: otros vagones del tren, efecto de los ventiladores, transferencia de calor, geometría interna, ocupación de personas, otros planos, combinación de ventanas abiertas o cerradas, comunicación entre vagones, etc. A su vez se recomienda hacer mediciones más detalladas en la cercanía con las ventanas o emplear la técnica PIV-Stereo para obtener información de la tercera componente de la velocidad.

Los resultados obtenidos ofrecen la posibilidad para buscar hacer más eficiente la ventilación natural en trenes subterráneos, mediante nuevos diseños de ventilación que también se puedan combinar con sistemas de aire acondicionado.

Bibliografía

Admin.

marzo, 2017. What types of ventilation are there. Ambient Air Conditioning UK Ltd. Recuperado el 14 de agosto de 2017, de <http://www.ambienthvac.co.uk/2017/03/what-types-of-ventilation-are-there/>

Arau, S., Arango, L., y Pedraza, J.

2012. Vagón de metro asientos. [Imagen]. Recuperado el 12 de junio de 2017, de <http://cdn.thecitylovesyou.com/wp-content/uploads/2012/04/Vagon-de-metro-asientos.jpg>

Atkinson, J., Chartier, Y., Pessoa-Silva, C., y et. al., editores

2009. Natural Ventilation for Infection Control in Health-Care Settings. Geneva: World Health Organization. [en línea]. ISBN-13: 978-92-4-154785-7. Recuperado el 14 de agosto de 2017, de <https://www.ncbi.nlm.nih.gov/books/NBK143277/>

Bahena, U.

31 mayo, 2017. Nueva ventilación prevé bajar 3° calor en Línea 7 del Metro. *La Razón*. Recuperado el 25 de agosto de 2017, de <http://www.razon.com.mx/spip.php?article349177>

Berlitz, T. y Matschke, G.

2002. Interior air flow simulation in railway rolling stock. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part F: Journal of Rail and Rapid Transit*, 216(4):231–236.

Cengel, Y. A. y Cimbala, J. M.

2006. *Mecánica de Fluidos: Fundamentos y Aplicaciones*. México: McGraw-Hill. Traducido de la primera edición. ISBN 970-10-5612-4.

Cepeda Mazón, C.

s.f. Ventilación por Desplazamiento, una Forma de Minimizar la Energía Utilizada en la Climatización. *Revista Mundo HVACR*. Recuperado el 14 de agosto de 2017, de <https://www.mundohvacr.com.mx/mundo/2008/08/ventilacion-por-desplazamiento-una-forma-de-minimizar-la-energia-utilizada-en-la-climatizacion/>

Cho, Y., Jung, W.-S., Kwon, S.-B., y Park, D.-S.

2015. Effect of air mixing on subway cabin temperature during heating in winter season. Atlantis Press. 2nd International Conference on Civil, Materials and Environmental Sciences, DOI:10.2991/cmcs-15.2015.10

Chow, W.

2002. Ventilation of enclosed train compartments in Hong Kong. *Applied Energy*, 71(3):161–170.

Dantec Dynamics A/S

2002. *FlowManager software and Introduction to PIV Instrumentation (Software User's Guide)*. Dantec Dynamics A/S, Tonsbakken 18, DK-2740 Skovlunde, Denmark, Fifth edition. Publicación no.: 9040U3625.

Dantec Dynamics A/S

2005. *2D PIV Reference Manual*. Dantec Dynamics A/S, Tonsbakken 16-18, DK-2740 Skovlunde, Denmark, Second edition. Publicación no.: 9040U1752.

Dantec Dynamics A/S

s.f. Measurement Principles of PIV. Recuperado el 24 de marzo de 2017, de <https://www.dantecdynamics.com/measurement-principles-of-piv>

Durst, F., Melling, A., y Whitelaw, J.

1981. *Principles and practice of Laser Doppler Anemometry*, second edition. University of Michigan: Academic Press. ISBN: 0122252608, 9780122252600.

GAED

2012. FE-10. [Imagen]. Recuperado el 8 de junio de 2017, de https://es.m.wikipedia.org/wiki/Archivo:FE-10_06.jpg

Griefahn, B., Künemund, C., y Gehring, U.

2000. The significance of air velocity and turbulence intensity for responses to horizontal drafts in a constant air temperature of 23°C. *International Journal of Industrial Ergonomics*, 26(6):639–649.

Guzmán Velázquez, E.

2011. *Diseño y simulación de intercambiadores de calor para túneles del metro de la Ciudad de México*. Tesis de licenciatura, Facultad de Ingeniería, Universidad Veracruzana, Coatzacoalcos. Recuperado el 5 de mayo de 2016, de <https://www.yumpu.com/es/document/view/14687750/diseño-y-simulación-de-intercambiadores-de-calor-para-túneles-del>

Hamamatsu Photonics

2009. Digital CCD Camera C8484-05C. [Ficha técnica]. Recuperada el 10 de marzo de 2017, de <https://www.electronicsdatasheets.com/manufacturers/hamamatsu/parts/c848405c>

infecktedunder25

2009. Alsthom Atlantique MP-82. [Imagen]. Recuperada el 9 de julio de 2017, de <http://www.fotolog.com/infecktedunder25/24769278/>

Inoyamanaka79

2010. MP-82 con cromática de FE-07. [Imagen]. Recuperado el 8 de junio de 2017, de https://es.wikipedia.org/wiki/Archivo:MP-82_con_crom%C3%A1tica_de_FE-07.jpg

International Organization for Standardization [ISO]

febrero, 2007. Ergonomics of the thermal environment - evaluation of thermal environments in vehicles - part 1: Principles and methods for assessment of thermal stress. (ISO/TS 14505-1:2007). Recuperado el 1 de agosto de 2017, de <https://www.iso.org/obp/ui/#iso:std:iso:ts:14505:-1:ed-1:v1:en>

Jahanmiri, M.

marzo, 2011. Particle Image Velocimetry: Fundamentals and Its Applications. [reporte de investigación en pdf]. Chalmers University Of Technology. Göteborg, Sweden. Recuperado el 5 de agosto de 2017, de <http://publications.lib.chalmers.se/records/fulltext/138219.pdf>. ISSN 1652-8549

Kale, S., Veeravalli, S., Punekar, H., y Yelmule, M.

2007. Air flow through a non-airconditioned bus with open windows. *Sadhana*, 32(4):347–363.

Kettlewell, P. y Mitchell, M.

2005. *Livestock transport vehicles: A guide to best practice for vehicle ventilation*. Department for Environment, Food and Rural Affairs [defra].UK. [documento pdf]. Recuperado el 30 de julio de 2017, de https://www.gov.uk/government/uploads/system/uploads/attachment_data/file/69375/pb11260-livestock-vehicle-ventilation-051104.pdf

Kettlewell, P., Mitchell, M., y Harper, E.

s.f. *Guide to the ventilation of livestock during transport*. [documento pdf]. Recuperado el 30 de julio de 2017, de <http://www.jmrt.co.uk/pdf/Ventilation%20guide.pdf>

Kwon, S.-B., Park, D.-S., Cho, Y., Kim, J. B., y Kim, T.

2012. Mechanical ventilation strategy for subway cabins using numerical simulations. *Journal of Civil Engineering and Architecture*, 6(8):1070.

LaVision GmbH

s.f. PIV Image Evaluation. [Imagen]. Recuperado el 24 de marzo de 2017, de http://www.piv.de/piv/measurement_principle/page_1.php

Lee, J. P., Kim, H. L., y Lee, S. J.

2011. Large-scale piv measurements of ventilation flow inside the passenger compartment of a real car. *Journal of Visualization*, 14(4):321–329.

Martínez, F. y Aldaz, P.

4 de mayo, 2012. Metro alcanza 41 grados centígrados. *El Universal*. Recuperado el 1 de diciembre de 2016, de <http://archivo.eluniversal.com.mx/ciudad/111399.html>

Metropolí 2025

noviembre, 2006. Ocupa Metro del DF tercer lugar mundial en captación de usuarios. México: Ciudadanos en red-Metropolí 2025. Recuperado el 1 de diciembre de 2016, de <http://web.archive.org/web/20160312220719/http://www.metropoli.org.mx/nod/e/2028>

Notimex

4 septiembre, 2015. Metro del DF cumple hoy 46 años: transporte que mueve 5.3 millones de personas al día. Recuperado el 25 de agosto de 2017, de <http://www.economiahoy.mx/nacional-eAm-mx/noticias/6981222/09/15/Metro-del-DF-cumple-hoy-46-anos-transporte-que-mueve-53-millones-de-personas-al-dia.html>

Osborne, W. C.

1970. *Guía práctica de la ventilación*. Barcelona: Blume.

Palacios-Morales, C., Aguayo-Vallejo, J., Trujillo-Roldán, M., Zenit, R., Ascanio, G., y Córdova-Aguilar, M.

2016. The flow inside shaking flasks and its implication for mycelial cultures. *Chemical Engineering Science*, 152:163–171. <http://dx.doi.org/10.1016/j.ces.2016.06.016>

picssr.com

2012. NM-02 interior. [Imagen]. Recuperado el 8 de junio de 2017, de http://picssr.com/photos/luis_world_proyect/interesting/page49?nsid=133657772@N05

picssr.com

s.f. NM-02. [Imagen]. Recuperado el 12 de junio de 2017, de <http://picssr.com/tags/nm02/page2>

Royal Dutch Shell

s.f. Shell Ondina Oil 917. [Ficha técnica]. Recuperada el 10 de marzo de 2017, de http://www.lubrifianti.com/documente-up/fisa-tehnica_59850.pdf

San Román Gutiérrez, O. R.

2004. Estimación de la ventilación y el ruido en el metro de la Ciudad de México. *Ingeniería. Investigación y Tecnología*, 5(2):125–135.

SCITEK Consultants Ltd

s.f. LS-10 Remote Operation Liquid Droplet Seeder. [Ficha técnica]. Recuperada el 10 de marzo de 2017, de <http://scitekconsultants.co.uk/products/liquid-seeders/>

Scott, J.

9 mayo, 2016. Rail Passenger Vehicle Guideline Published By ASHRAE. Atlanta.

Recuperado el 27 de junio de 2017, de <https://www.ashrae.org/news/2016/rail-passenger-vehicle-standard-published-by-ashrae>

Secretaría del Trabajo y Previsión Social [STPS]

24 de noviembre, 2008. Edificios, locales, instalaciones y áreas en los centros de trabajo-Condiciones de seguridad/14. Concordancia con normas internacionales/Guía de referencia I. Ventilación de confort. (NOM-001-STPS-2008). Ciudad de México. DIARIO OFICIAL. Recuperado el 19 de mayo de 2017, de <http://www.stps.gob.mx/bp/secciones/dgsst/normatividad/normas/Nom-001.pdf>

Singh, O. P., Raut, R., Biswas, M., y Singh, R.

2015. Effect of dynamic vents on the thermal comfort of a passenger car. *Journal of Mechanical Engineering*, 61(10):561–570. DOI:10.5545/sv-jme.2015.2469

Sistema de Transporte Colectivo [STC]

2008. Características del parque vehicular. [Tabla]. Recuperado el 8 de agosto de 2017, de <http://www.metro.cdmx.gob.mx/operacion/mas-informacion/material-rodante>

Sistema de Transporte Colectivo [STC]

24 mayo, 2015. Se incrementa sustitución de ventiladores nuevos en trenes para confort de los usuarios. (STC/062/2015). Recuperado el 25 de agosto de 2017, de http://data.metro.cdmx.gob.mx/comunicados/detalleComunicados.html?id_comunicado=1170

Sistema de Transporte Colectivo [STC]

agosto, 2014. Fideicomiso Maestro del Metro: Once Compromisos Asumidos por el Sistema de Transporte Colectivo. [pdf]. Recuperado el 8 de junio de 2017, de <http://www.metro.cdmx.gob.mx/storage/app/media/Fideicomiso/informe11compromisos.pdf>

Sistema de Transporte Colectivo [STC]

s.f. MP-68R96C. [Imagen]. Recuperado el 8 de junio de 2017, de http://data.metro.cdmx.gob.mx/imagenes/operacion/mp68r96c/mp68c_4ok.jpg/

Tosun, I., Uner, D., y Özgen, C.

1988. Critical Reynolds number for Newtonian flow in rectangular ducts. *Industrial and Engineering Chemistry Research*, 27(10):1955–1957. DOI: 10.1021/ie00082a034. Recuperado el 4 de septiembre de 2017, de https://www.researchgate.net/publication/231368760_Critical_Reynolds_number_for_Newtonian_flow_in_rectangular_ducts

White, Jr., J.

1985. *The American Railroad Passenger Car, Part 2*. USA: JHU Press. (pp. 400-407).[Vista previa en línea] Recuperado el 18 de abril de 2017, de <https://books.google.com.mx/books?id=bz0OBGxRjjcC&printsec=frontcover&hl=es#v=onepage&q&f=false>

Xia, Y., Niu, J., Zhao, R., y Burnett, J.

2000. Effects of turbulent air on human thermal sensations in a warm isothermal environment. *Indoor Air*, 10(4):289–296.

Yáñez Coto, D.

2015. *Análisis del efecto pistón en la ventilación de túneles ferroviarios*. Recuperado el 5 de mayo de 2016, del Repositorio Institucional de la Universidad de Oviedo: <http://hdl.handle.net/10651/32146>

Yuan, F.-D. y You, S.-J.

2007. CFD simulation and optimization of the ventilation for subway side-platform. *Tunnelling and Underground Space Technology*, 22(4):474–482.

Zavala, L.

8 de mayo, 2016. Usuarios de Metro consideran insuficiente sistema de ventilación. *Diario DF, Información en movimiento*. Recuperado el 15 de julio de 2017, de <http://www.diariodf.mx/ciudad/usuarios-de-metro-consideran-insuficiente-sistema-de-ventilacion>

Zhang, H., Dai, L., Xu, G., Li, Y., Chen, W., y Tao, W.

2009. Studies of air-flow and temperature fields inside a passenger compartment for improving thermal comfort and saving energy. Part II: Simulation results and discussion. *Applied Thermal Engineering*, 29(10):2028–2036.