

MEJORA DE CALIDAD DE FLUJO EN TÚNEL DE VIENTO

Juan Manuel Escobar, Fausto Agustín Magnou Gaudino, Facundo Diaz, Nicolás Guillermo Coppolecchia, Pablo Alfredo Caron.

Grupo de Mecánica de Fluidos, Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Haedo
Haedo, Buenos Aires, Argentina.

Email: jescobar@frh.utn.edu.ar

RESUMEN

Este artículo muestra el trabajo realizado en el denominado túnel Mayor de la UTN Facultad Regional Haedo. Este es un túnel tipo Eiffel con una zona de prueba de 1.27 x 1.27 metros y un largo de 3 metros, aproximadamente, y está equipado con un ventilador axial de 25 HP. La velocidad máxima que se alcanza en la zona de prueba es aproximadamente de 80 Km/h.

Este trabajo es parte de un proyecto cuyo objetivo es mejorar la calidad del flujo actual del túnel (no uniformidades espaciales y temporales) que afectan directamente la calidad de las mediciones.

Para lograr este objetivo, se propuso la construcción de una cámara de tranquilización que permita mejorar la uniformidad del flujo de aire a lo largo de la zona de prueba del túnel.

En este artículo se muestra el diseño propuesto y construido, la comparación de modelos de la cámara de tranquilización con los resultados experimentales obtenidos en túnel de viento. Por otro lado, se muestran simulaciones computacionales para predecir la mejora una vez montada la cámara.

Palabras clave: CALIDAD DE FLUJO, CALIBRACIÓN, PRESIÓN, VELOCIDAD, TÚNEL DE VIENTO

INTRODUCCIÓN

El Túnel Mayor de la UTN Facultad Regional Haedo es un túnel subsónico de baja velocidad de uso general, que fue originalmente diseñado para ensayar modelos a escala tanto de vehículos y estructuras terrestres como de aeronaves.

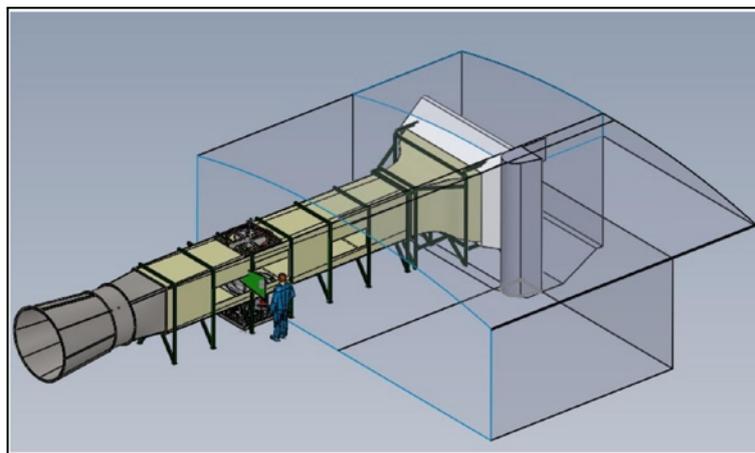


Figura 1. Vista actual del túnel de viento mayor. Modelo 3D.

Alrededor del año 2000, y en un intento por mejorar la calidad del flujo, se le agregó al túnel un *HoneyComb* inmediatamente luego de su contracción. Este dispositivo consta de chapas dobladas formando una geometría de panal de abejas que cumplen el objetivo de homogeneizar el flujo. Como refuerzo estructural, las chapas están montadas sobre una “cruz” de madera de 20mm de espesor, como se muestra en la Figura 2.

El sistema original de motorización del túnel constaba de cuatro ventiladores axiales. En los últimos años se identificó que este sistema presentaba fluctuaciones en la presión dinámica y bajo rendimiento, conduciendo a una pérdida considerable de la presión dinámica en la salida. A través de un estudio de las pérdidas de carga y análisis de la relación costo-beneficio, se exploraron dos alternativas: la modificación del sistema utilizando los cuatro ventiladores originales y la implementación de un ventilador único. El análisis reveló que el sistema de un ventilador único ofrecía un aumento en la velocidad de la cámara, una disminución del nivel sonoro y una mejora en la calidad del flujo. La empresa Ing. H. Ciarrapico Aerotécnica fabricó el ventilador con un único motor de 25Hp de 6 polos. Se instaló en el túnel junto a un difusor a la salida para la recuperación de la presión dinámica como se muestra en la Figura 1.



Figura 2. Vista del *HoneyComb*

Se realizaron simulaciones computacionales cualitativas de la zona lindante a la contracción del túnel. Como se observa en la Figura 3, al lado de la admisión del túnel hay una oficina que influye negativamente en el patrón de flujo. Se llegó a la conclusión de que la esquina de la oficina presentaba un borde afilado y que era responsable de gran parte de la no uniformidad y vorticidad del flujo de aire en la zona de la contracción. La adición de un radio de entrada tuvo como objetivo mitigar este problema, como se muestra en la Figura 3 izquierda en color azul. En la misma figura, observamos las simulaciones bidimensionales en un plano horizontal. En (a) sin radio de acuerdo, el flujo presenta una asimetría en su velocidad en la entrada hacia la derecha. En (b) con radio de acuerdo se mejora la simetría de velocidades por izquierda y por derecha a la entrada de la contracción.

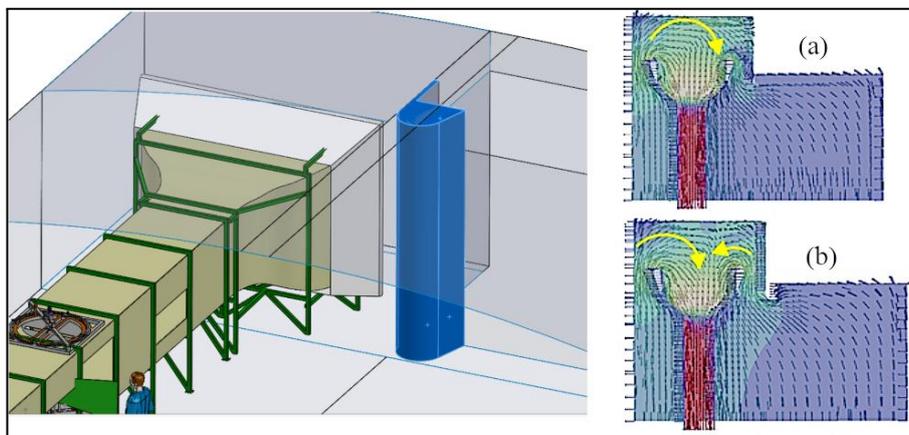


Figura 3. Simulaciones cualitativas de la entrada, plano horizontal.

Por otro lado, se realizaron simulaciones para contemplar la construcción de una cavidad en el piso del Laboratorio a la altura de la contracción. En la Figura 4 se observa cómo mejora la uniformidad del ingreso del flujo en la contracción para la simulación (b). Esto se corrobora en la simulación

tridimensional (c) de la misma figura donde se constata que la presencia de la cavidad y el radio de acuerdo disminuye la vorticidad a la entrada y mejora la uniformidad. Se decidió entonces la construcción de la cavidad y el radio de entrada.

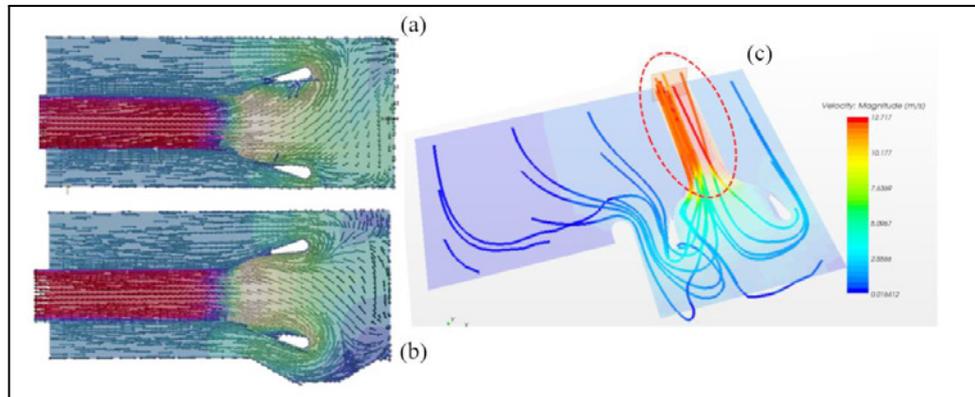


Figura 4. Simulaciones cualitativas de la entrada, plano vertical y 3D.

Como menciona J.B Barlow [1], existen tres factores de suma relevancia que deben ser analizados y controlados para finalmente disponer de un túnel calibrado y apto para los tipos de ensayos que se esperan realizar. Se desea que el flujo en la cámara de testeo sea uniforme, estacionario y no turbulento, si esto no ocurre la extrapolación de los datos medidos hacia el modelo de gran escala no será nunca satisfactoria. Existe una diferencia clave entre el flujo no estacionario o inestable y la turbulencia, una diferencia arbitraria pero práctica. El flujo inestable es principalmente causado por una separación del flujo intermitente que se manifiesta por lo general en bajas frecuencias. La turbulencia involucra fluctuaciones de mayor frecuencia relacionadas con diversos factores, de motorización, acústicos, de capa límite, entre otros.

Con el objetivo de evaluar la calidad de flujo luego de las modificaciones se realizó un mapeo transversal del túnel. El mapeo se realizó utilizando una sonda calibrada de 5 agujeros de desarrollo propio del Laboratorio montada en un sistema X-Y de movimiento sincronizado. Las 5 tomas de presión se conectaron a un sistema de adquisición de presiones denominado SAPY que es también desarrollo propio del Laboratorio. El sistema mide presiones durante 20 segundos en cada punto con una frecuencia de 100 Hz demostrando una incertidumbre menor al 4% sobre el valor medido [3]. Se realizaron mediciones de presión en 400 puntos, se convirtieron los valores de presión a velocidad valiéndonos de una calibración realizada en otro túnel de viento diseñado para esa tarea específica [4]. En la Figura 5 se muestra el resultado del mapeo y además se muestra con un contorno negro el límite geométrico de la cámara de testeo. El plano transversal de la cámara de testeo tiene una dimensión aproximada de 127 cm². La superficie mapeada alcanza los 70 cm². En el gráfico se puede ver la magnitud de la velocidad en una escala de rojo a amarillo. Se puede apreciar con claridad la caída de velocidad generada por la cruz del *Honeycomb*. La magnitud de la velocidad varía desde los 12 m/s en las posiciones alineadas con la cruz hasta los 14 m/s en las zonas que no están alineadas. Por otro lado, en la escala de colores azules se pueden ver las componentes de la velocidad contenidas en el plano utilizando la descomposición de Reynolds. Donde:

$$u(x) = u(x) + u'(x) \quad (1)$$

En la Figura 5 se indica por VR a la parte desviadora de la magnitud del vector velocidad media en el plano. Es decir, que el vector VR está conformado por el vector velocidad en el plano menos la velocidad media respectiva a cada componente. La descomposición de Reynolds tiende a revelar más vórtices porque los vórtices frecuentemente se mueven a velocidades cercanas a la velocidad media local [5]. Se observa claramente la presencia de cuatro vórtices, uno por cada cuadrante del *Honeycomb*. Se observa además una estructura secundaria en el cuadrante superior izquierdo. Se puede ver claramente que en los cuadrantes superiores la velocidad media tiende hacia arriba y en el inferior hacia abajo. Se presume que estos vórtices son generados por desprendimientos en la zona de

la cruz. Probablemente se encuentren en un rango de baja frecuencia por su escala con respecto al diámetro hidráulico del túnel. Por lo tanto, a priori se observa que la zona de testeo presenta una baja uniformidad de velocidad y fluctuaciones probablemente a baja frecuencia. En este rango de frecuencias se producen fluctuaciones en la presión dinámica, ángulo de ataque y deslizamiento lateral, lo que puede llevar a errores en las mediciones estáticas [2]. Por ende, la sección de testeo manifiesta no uniformidades en

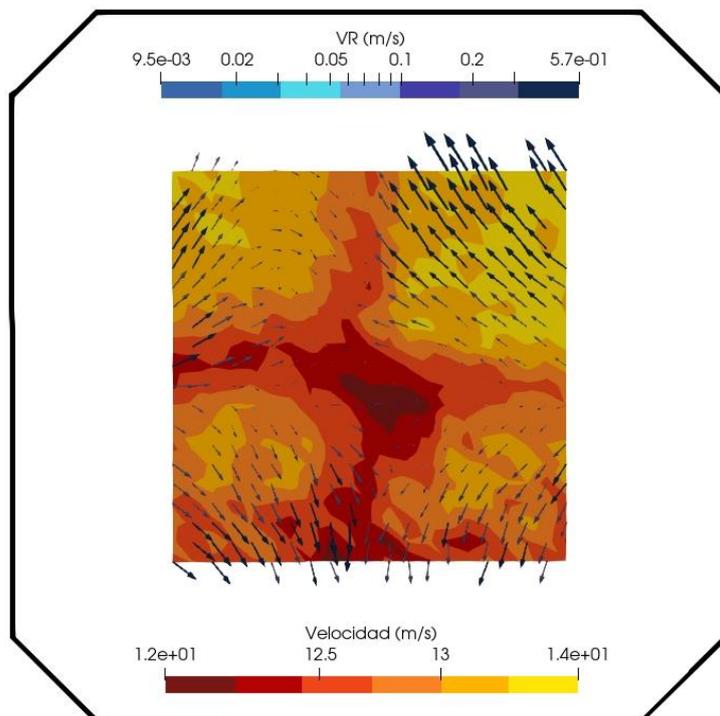


Figura 5. Mapeo del túnel de viento mayor

el flujo de aire y fluctuaciones temporales de baja frecuencia pese a las modificaciones recientemente realizadas.

De lo expuesto previamente, queda de manifiesto que las modificaciones previas no lograron compensar adecuadamente las no uniformidades espaciales y temporales en la zona de testeo. Esto motivó el desarrollo de una cámara de tranquilización. Se espera que, además de resolver los problemas enunciados, esta cámara reduzca los niveles de turbulencia.

El objeto de este trabajo es dar a conocer el estado de avance del proyecto de la nueva cámara de tranquilización y proponer nuevas actividades a desarrollar para obtener una calidad de flujo apta para los ensayos que se esperan realizar.

METODOLOGÍA

La nueva cámara de tranquilización del túnel mayor del Laboratorio es un diseño de varios módulos que serán ubicados en el inicio de la contracción del túnel. A diferencia del *HoneyComb* actual, que se encuentra actualmente al final de la contracción, la nueva cámara se ubicará aguas arriba y será atravesada por una menor velocidad de aire. El diseño modular permitirá el mantenimiento y la limpieza de los módulos para evitar el problema de su capacidad para acumular polvo. El polvo siempre tiene una distribución no uniforme. Por lo tanto, la porosidad del módulo y la caída de presión cambiarán, lo que a su vez cambiará la distribución de velocidad y angularidad en la sección de prueba de una manera impredecible con el tiempo [1]. Cada módulo será construido siguiendo una estrategia que ya se probó en el Laboratorio para el caso de otro túnel más pequeño. El diseño consta de placas de policarbonato alveolar de 10mm de espesor cortadas en forma de tiras de 100 mm apiladas y pegadas con sellador a base de silicona, una sobre otra de manera que el aire circula a través de

rectángulos de 9x10mm. Diferentes mallas con relación de área abierta y tamaño se combinaron para optimizar la reducción del nivel de turbulencia, teniendo en cuenta que la máxima supresión de turbulencia para una pérdida de presión total dada se obtiene con una combinación tipo cascada de mallas supercríticas con un tamaño de malla decreciente en la dirección del flujo [6]. Según lo medido en el laboratorio la pérdida de carga para la cámara de tranquilización del túnel pequeño calculada para la máxima velocidad 3.98 m/seg es de 47.07 Pa . El coeficiente k característico de la cámara resulta:

$$k = \frac{\Delta p}{\frac{1}{2}\rho v^2} = \frac{47.07152 Pa}{.5 \cdot 1.21 Kg/m^3 \cdot 3.98^2 m/s} = 4.91 \quad (2)$$

Suponiendo la misma performance llevada a la cámara de tranquilización del túnel mayor tendríamos a una velocidad en la cámara de tranquilización de 5.7m/s y una pérdida de carga estimada en 96.5 Pa.

$$\Delta p = \frac{1}{2} k \rho v^2 = \frac{1}{2} \cdot 4.91 \cdot 1.21 Kg/m^3 \cdot 5.7^2 m/s = 96.5 Pa \quad (3)$$

El honeycomb actual de la Figura 2, dado que carece de screens tiene un K más bajo igual a 0.36, pero al encontrarse en una zona de mayor velocidad presenta una pérdida de carga mayor que la que tendría la nueva cámara de tranquilización con su mejora en la calidad de flujo. La pérdida de carga para 25 m/s y $k = 0.36$ es de 136 Pa.

Por lo expuesto la nueva cámara de tranquilización no solo permitirá mejorar la calidad de flujo dentro de la cámara de ensayos si no que se estima presentará una reducción del 29% en la pérdida de carga, por lo cual se podrá obtener con la misma potencia instalada una velocidad máxima superior.

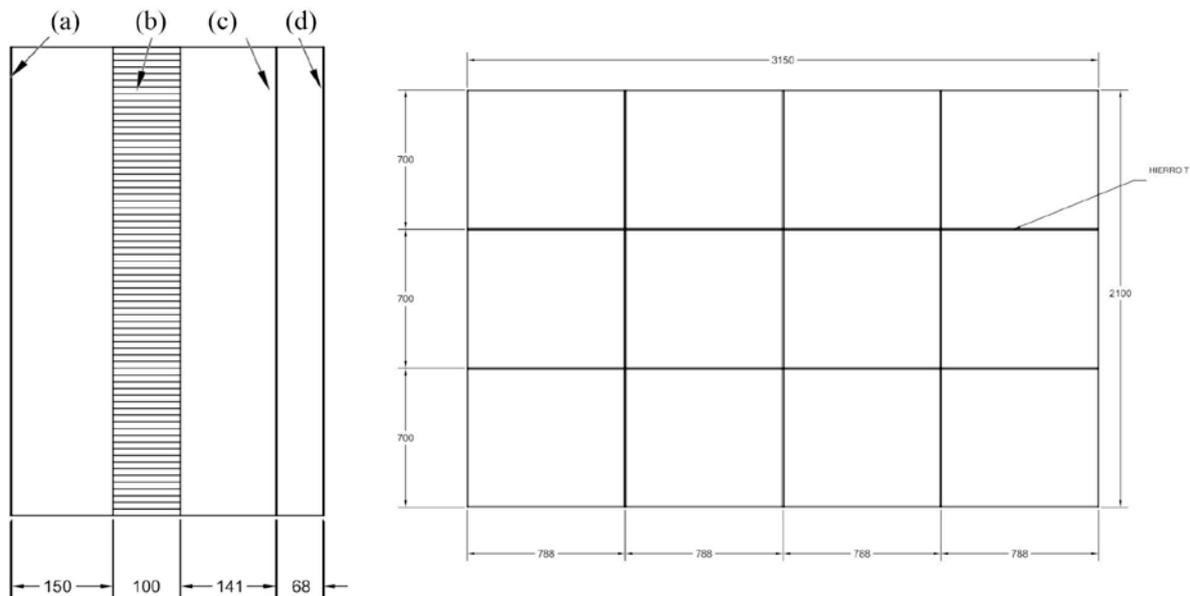


Figura 6. Diseño de la nueva cámara de tranquilización (mm)

En la Figura 6 se puede observar el diseño de la cámara. Se trata de una matriz de 3x4 módulos de 788 mm de ancho, 700 mm de altura y 465 mm de profundidad. Cada módulo está conformado por 4 componentes, 3 mallas metálicas y un honeycomb, en una estructura de chapa.

Se realizó un cálculo detallado entre varios tipos de mallas disponibles comercialmente, quedando seleccionado el conjunto que menor caída de presión generaba. El Honeycomb quedó conformado por 70 tiras de policarbonato alveolar apiladas con silicona. En la Tabla 1 se pueden ver las características referenciadas a la Figura 6. Donde R_d es el número de Reynolds referido al diámetro de entramado o espesor de policarbonato.

Tabla 1. Características de cada componente

Screen	AISI 304 N°	Diámetro [mm]	Luz	Área abierta	Rd
(a)	10	0,6	1,984	58 %	232
(c)	14	0,4	1,410	64 %	155
(d)	25	0,16	0,687	66 %	62
honeycomb (b)	-	0,2286	-	67 %	89

$$K = K_0 + \frac{55.2}{R_d} \quad K_0 = \left(\frac{1-0.95\beta}{0.95\beta}\right)^2 \quad (4)$$

Se calculan los coeficientes de pérdida de carga usando las estimaciones que se muestran en las Ecuaciones 4 [6]. Donde β es igual al área abierta o el porcentaje del total de área frontal vacía de la cámara.

Tabla 2. Coeficientes de cada componente

Screen	1	2	3	Honeycomb
área abierta	58,3%	63,5%	65,9%	67 %
Rd	232	155	62	89
K0	0,647	0,432	0,357	0,321
K	0,884	0,788	1,247	0,944
fa	0,531	0,559	0,445	0,514
fl	0,728	0,748	0,667	0,717

$$f_a = \frac{1}{1+K} \quad f_b = \frac{1}{\sqrt{1+K}} \quad (5)$$

Tabla 3. Coeficiente total de un módulo

	Screen	Honeycomb	Total
K	2,920	0,944	3,864
fa total	0,132	0,514	0,068
fl total	0,363	0,369	0,134

En la Tabla 3 se observan los coeficientes totales obtenidos, por un lado el coeficiente de pérdida de carga total $K = 3.864$ y por otro lado los coeficientes de reducción de turbulencia axial y lateral respectivamente. Según esta estimación, la cámara de tranquilización proyectada reduciría en un 93.2% la turbulencia axial y en un 86,6% la turbulencia lateral, con una pérdida de carga de 75 Pa aproximadamente.

Se llevó a cabo la elaboración de un prototipo de módulo de cámara de tranquilización para evaluar su performance antes de fabricar los 11 restantes. Se realizaron mediciones de pérdida de carga insertando al prototipo dentro de una manga de plástico reforzado para mantener el área constante. El prototipo en conjunto con su manga fueron ubicados en la cámara de testeo del túnel de viento mayor. Se ubicaron dos tubos pitots uno aguas arriba y otro aguas abajo, como se observa en la Figura 7. Se obtuvo una caída de presión medida en diferentes posiciones y con diferentes sensores de 96 Pa aproximadamente [7]. Una caída de presión similar a la de la cámara construida en el túnel de viento menor pero más de un 20% de la estimada con el método descrito previamente.



Figura 7. Ensayo de performance de prototipo

PREDICCIONES DE LA MEJORA

Actualmente se está desarrollando un modelo computacional del túnel. Se realizó una primera simulación computacional del Túnel de viento sin el *HoneyComb* original para comparar con un mapeo. El análisis del modelo computacional se llevó a cabo mediante el software OpenFOAM®.

Especificaciones de la configuración:

- **Geometría:** Se incluyó parte de la infraestructura del Laboratorio, principalmente los volúmenes lindantes a la contracción del Túnel. Se hizo un diseño 3D.
- **Mallado:** Se utilizó un mallador integrado llamado *snappyHexMesh*. Se tomó una malla base y se refinó la misma basándose en la geometría definida previamente. Se definieron niveles de refinamiento específicos para diferentes regiones y superficies, indicando el nivel de refinamiento de la malla en esas áreas. Se estableció una tolerancia relativamente baja para la no-ortogonalidad de las celdas. Se establecieron diversos controles de calidad de malla que permitieron hallar la convergencia de la misma.

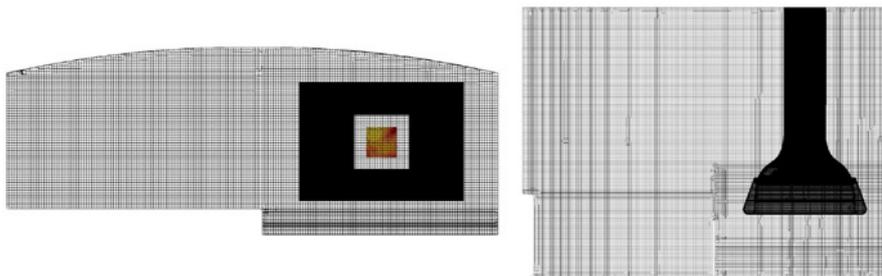


Figura 7. Vistas frontal y superior del mallado.

- **Modelo de turbulencia:** Se utilizó el tipo de Simulación de las Aproximaciones de Reynolds, donde las ecuaciones de Navier-Stokes se promedian para obtener un conjunto de ecuaciones que describen el comportamiento promedio del flujo. El modelo de turbulencia elegido fué el $k-\Omega SST$ (*Shear Stress Transport*) por ser un modelo robusto, de aplicación general y buena precisión cerca de los contornos. Se hizo una estimación inicial de la energía cinética de la turbulencia y de la tasa específica de disipación según las recomendaciones expuestas en la guía del software [8].
- **Condiciones Iniciales:** Se representó la planta de poder del túnel de viento imponiendo una velocidad media aguas abajo de la cámara de testeo.
- **Solver:** Se utilizó SimpleFoam porque se deseaba conocer la velocidad media de la solución.

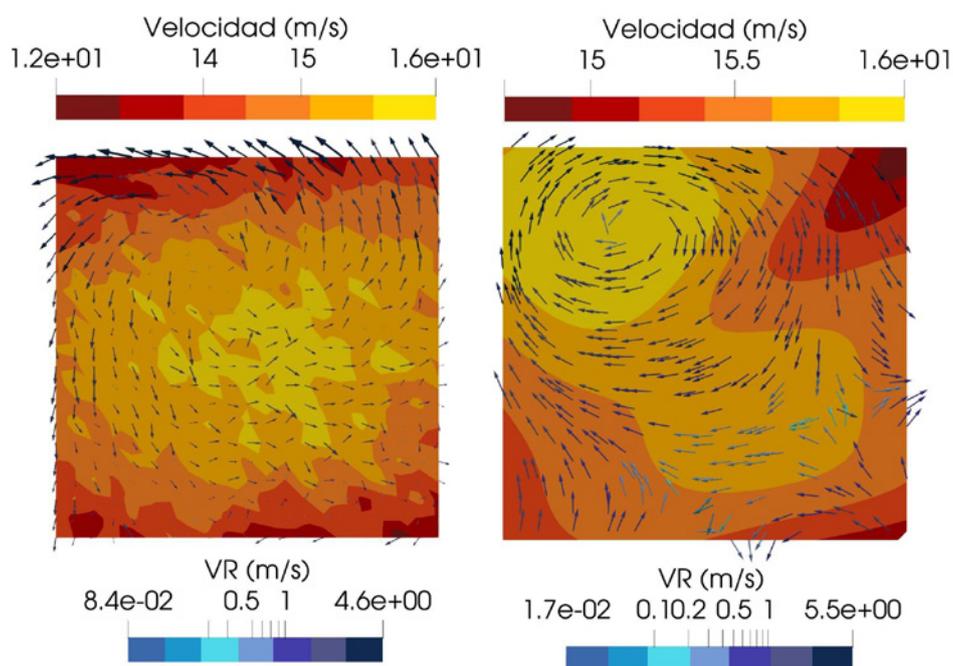


Figura 8. A la izquierda: Mapeo. A la derecha: Simulación.

El mapeo que se observa en Figura 8 izquierda, fué realizado con la misma metodología que el explicado en detalle en la Figura 5. La única diferencia es que se removió físicamente el *HoneyComb* del túnel de viento. A continuación, se compara el mapeo con la simulación en la misma región de 70 cm^2 ubicada dentro de la cámara de testeo. El rango de velocidades obtenido se encuentra en el mismo orden de magnitud, tanto para la Velocidad como para las VR. En cuanto a la estructura vorticiosa presente en la esquina superior izquierda se observa una diferencia de sentido y de magnitud. En cuanto a la distribución de la Velocidad se observan diferencias relevantes. El mapeo presenta una distribución más uniforme, mientras que en la simulación, se manifiesta un sesgo en Velocidad en torno al vórtice superior.

CONCLUSIONES

La calidad del flujo en la cámara de testeo actual no es adecuada para mediciones estáticas. La inestabilidad de flujo en bajas frecuencias impide una similitud precisa entre el modelo estudiado y su contraparte a escala real [2]. Según Barlow, la variación en la distribución de velocidades dentro de la cámara de testeo no debería exceder el 0.25% de la velocidad media [1]. Sin embargo, el túnel muestra variaciones superiores al 10%, además de una angularidad elevada. La estimación previa sobre el prototipo de la cámara de tranquilización no concordó completamente con los métodos literarios propuestos, aunque sí fue coherente con las expectativas iniciales, donde se anticipa una notable mejora en la velocidad y una disminución significativa en turbulencia. Además, se espera lograr una

homogeneización del campo de velocidades en la zona de testeo. El próximo paso es refinar el modelo computacional excluyendo el *HoneyComb*. Para esto se propone hallar y comparar con soluciones dependientes del tiempo. Posteriormente, modelar la nueva cámara de testeo y compararlo con un mapeo post-construcción. Finalmente, utilizar un modelo computacional para identificar y rectificar posibles fuentes de perturbaciones no deseadas en el proceso de calibración del túnel.

REFERENCIAS

1. Rae, Pope, "Low-Speed Wind Tunnel testing", second edition, John Wiley & Sons, USA, 1984. 123-125. 222-223.
2. F. Kevin Owen, Andrew K. Owen, Measurement and assessment of wind tunnel flow quality, Progress in Aerospace Sciences, Volume 44, Issue 5, 2008
3. [Laboratorio de Aerodinámica y Fluidos UTN-FRH, "COMPARACIÓN INSTRUMENTO SAPY CON FLUKE 922", Registros, HAEDO, BS.AS., ARGENTINA, 2022](#)
4. Ruscio, Juan & Aguirre, Miguel Angel & Santonja, F & Domecq, B & Sanchez, M & Vicharelli, M & Vescovo, E & Caballini, V & Olmedo, C. (2016). CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE SONDAS DIRECCIONALES MULTIAGUJERO.
5. Adrian, Ronald & Christensen, Kenneth & Liu, Z.-C. (2000). Analysis and interpretation of instantaneous turbulent velocity fields. Experiments in Fluids. 29. 275-290. 10.1007/s003489900087.
6. Junca-Laplace, Jean-Philippe, "Design, Fabrication and Characterization of a New Wind Tunnel Facility – Linear Cascade with a Wake Simulator" (2011). LSU Master's Theses. 2773.
7. [Laboratorio de Aerodinámica y Fluidos UTN-FRH, "MEDICIÓN DE LA PÉRDIDA DE CARGA EN UN PROTOTIPO DE CÁMARA DE TRANQUILIZACIÓN DE TÚNEL MAYOR", Registros, HAEDO, BS.AS., ARGENTINA, 2022](#)
8. Greenshields, Christopher. (2023). OpenFOAM v11 User Guide. The OpenFOAM Foundation. London, UK. U25-U26 .Disponible en: <https://doc.cfd.direct/openfoam/user-guide-v11>