



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

CARACTERIZACIÓN EXPERIMENTAL Y NUMÉRICA DE TÚNEL AERODINÁMICO

Matías Llansa ^{*1}, Gerardo Franck ² y Gustavo G. Vignolo ¹

^{*1} Facultad de Ingeniería, Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco
Ruta Prov. N° 1, Km. 4, (9000) Comodoro Rivadavia, Argentina.
correo-e: lmf@ing.unp.edu.ar.

² Facultad Ingeniería y Ciencias Hídricas (FICH), Universidad Nacional del Litoral,
Aula FICH-CIMNE, Ciudad Universitaria. Ruta Nacional N° 168 - Km 472,4. (3000) Santa Fe,
Argentina.

RESUMEN

Los túneles aerodinámicos, también llamados túneles de viento, son instrumentos científico-tecnológicos cuya aplicación es la generación de una corriente fluida de propiedades conocidas para la medida de las acciones del viento sobre obstáculos de muy diversa naturaleza. Más generalmente, el estudio de los fenómenos físicos en los que el aire en movimiento juega un papel dominante (análisis de esfuerzos generados sobre estructuras, estudio de estelas, dispersión de contaminantes, apantallamientos, generación de energía eólica, etc.).

En el presente trabajo se presenta la caracterización experimental y numérica del flujo en la cámara de ensayos del túnel aerodinámico perteneciente al Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB).

Las mediciones experimentales incluyeron la toma de presión desde la sección de entrada hasta la cámara de ensayos y del perfil de velocidad en el plano medio de esta última. Así, se obtuvieron valores característicos como uniformidad de flujo, turbulencia, etc.

Para el modelado numérico se hizo uso de software de CFD en donde se realizaron simulaciones bajo las mismas condiciones de flujo buscando que los resultados obtenidos numéricamente se correspondiesen con los datos experimentales.

De esta manera, habiendo ajustado el modelo con las mediciones, puede predecirse el impacto que tendría sobre el flujo la realización de alguna modificación en el túnel. Así, dichas modificaciones sólo podrán ser llevadas a la práctica cuando las estimaciones muestren los resultados esperados de las mismas.

Palabras Claves: Túnel de Viento, Simulación Numérica.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

1. INTRODUCCIÓN

Los túneles aerodinámicos, también llamados túneles de viento (traducción literal de la expresión inglesa *wind tunnel*), son instrumentos científico-tecnológicos cuya aplicación es la generación de una corriente fluida de propiedades conocidas para la medida de las acciones del viento sobre obstáculos de muy diversa naturaleza y, más generalmente, el estudio de los fenómenos físicos en los que el aire en movimiento juega un papel dominante (análisis de esfuerzos generados sobre estructuras, estudio de estelas, dispersión de contaminantes, apantallamientos, generación de energía eólica, etc.) [1]. En el transcurso del diseño de un elemento o proceso que pueda estar sometido a la acción del viento, existen situaciones en las que, mediante la utilización de la información disponible sobre el tema, no se puede predecir consistentemente el desempeño del mismo. En tales circunstancias de incertidumbre el proceso de diseño deberá avanzar o asumiendo los riesgos que supone el desconocimiento de las cargas del viento, o aplicando factores de seguridad exagerados que den lugar a un diseño en extremo conservador (y casi con toda seguridad más caros), o bien intentando determinar con más precisión las cargas aerodinámicas, para lo que habrá que acudir, normalmente, a ensayos con modelos a escala en túneles aerodinámicos bajo determinadas consideraciones [1].

Asimismo, la determinación del potencial eólico de un sitio para generación de energía eléctrica mediante aerogeneradores, el cálculo de la producción anual de energía y el costo de la energía generada, son muy sensibles al valor de la velocidad del viento medida. Esto hace necesario adoptar una buena práctica en la selección del anemómetro, en su calibración y el montaje en campo, para reducir las incertezas y sus consecuencias [2]. Las valoraciones de las condiciones extremas de viento, niveles de turbulencia, efectos de estela en granjas eólicas, son de importancia porque afectarán a la vida útil de los aerogeneradores, determinarán su clase y afectarán también a la producción de energía. La calibración de un anemómetro de acuerdo a estándares internacionales requiere un túnel de viento con características de flujo muy estrictas [3].

1.1. Túnel de Viento.

De acuerdo a los argumentos expuestos, y teniendo en cuenta la multiplicidad de aplicaciones de los túneles aerodinámicos, se entiende que la mayoría de los mismos estén construidos para un cierto uso específico. Todo ello hace que exista una amplia variedad de túneles aerodinámicos, pudiéndose encontrar una gran diversidad en los números de Reynolds (Re) y Mach (M) de funcionamiento, tamaños de cámara de ensayo y formas de los conductos.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

El túnel aerodinámico del Laboratorio de Mecánica de Fluidos (LMF) de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB) nace como un proyecto del Departamento de Ingeniería Mecánica [4]. Su objetivo fue la construcción del túnel de viento para posibilitar tareas de extensión, didácticas y de investigación en lo referente a fluidodinámica, aerodinámica y energía eólica. El proyecto comenzó en el año 1989 y se finalizó en el año 1993. Para su construcción se utilizó un antiguo motor eléctrico de origen Alemán con su sistema de control de velocidad de reóstato de ocho posiciones, y un turboventilador centrífugo tipo “Sirocco”. Todo este equipamiento conformaba originalmente uno de los equipos de tiro forzado de la antigua central de vapor instalada en km 5 en la ciudad de Comodoro Rivadavia, construida a mediados de la década de 1920 con una potencia instalada de 25Mw [5].

El túnel así construido (Figura 1) es en circuito abierto (tipo Eiffel) [1,6] con cámara de ensayos cerrada. Puede clasificarse como un túnel “pequeño de baja velocidad” [6]. Tiene una cámara de ensayos con un área de $0,8\text{m}^2$ y una velocidad máxima de 18 m/s.



Figura 1 Túnel de Viento del Laboratorio de Mecánica de Fluidos, UNPSJB.

La implementación de nuevos estándares en materia de seguridad laboral, el control más estricto de las condiciones ambientales en los lugares de trabajo y la concepción de nuevos proyectos en el país tendientes a aumentar la producción de energía eólica, generaron una creciente demanda del empleo del túnel para la calibración de anemómetros. En este sentido, en [2] se expresa ...”*Argentina no cuenta con túnel de viento certificado con los estándares internacionales, y lo necesita. Esta es una necesidad muy importante, tanto porque nuevas granjas eólicas van a desarrollarse en el país, como por certificaciones de curvas de potencia de aerogeneradores...*”. Esta necesidad ha contribuido a la decisión de la caracterizar el flujo en el túnel dado que para cumplir los requisitos de la norma IEC



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

61400-12-1– Annex F [7] para la calibración de anemómetros se requiere que la corriente de aire dentro del túnel cumpla con las siguientes condiciones [3]:

Tabla 1 Requerimientos del túnel del viento para calibración de anemómetros de copa según IEC 61400-12-1.

Característica del Túnel de Viento	Descripción	Requerimiento Mínimo
Relación de Bloqueo	Relación del área del anemómetro y su montante respecto del área total del túnel en la sección de prueba	No exceder 0,1 para secciones de prueba abiertas, 0,05 para secciones cerradas
Uniformidad de Flujo	Diferencia porcentual de la velocidad dentro del volumen de la sección de pruebas	Menos que 0,2% en las direcciones longitudinal, transversal y vertical
Gradiente de Viento Horizontal	Presión dinámica diferencial en el área cubierta por el anemómetro de copas girando	Debe ser menor que 0,2%
Intensidad de Turbulencia	Relación entre el desvío estándar y la velocidad media	Debe ser menor que 2%

En el presente trabajo se presenta la caracterización experimental y numérica del flujo en la cámara de ensayos del túnel aerodinámico perteneciente al Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Nacional de la Patagonia San Juan Bosco (UNPSJB) con la finalidad primera de verificar el cumplimiento de las especificaciones de la Tabla 1 (se verifica una relación de bloqueo con un anemómetro típico de 0,035) y de validar un modelo computacional que permita ensayar numéricamente las condiciones del flujo del mismo. Así, habiendo ajustado el modelo con las mediciones, puede predecirse el impacto que tendría sobre la corriente fluida la realización de alguna modificación. De esta manera, en caso de requerirse una intervención en el diseño original del túnel para ajustarlo a los requisitos de la Tabla 1, por ejemplo, los cambios sólo podrán ser llevados a la práctica cuando las estimaciones muestren los resultados esperados de los mismos.

2. DESARROLLO

Para la caracterización experimental del flujo dentro del túnel de viento se realizaron exhaustivas mediciones de las principales variables de flujo. Los instrumentos utilizados para ello son los descritos en la Tabla 2. Asimismo, para el modelado numérico se empleó el software Solid Works Flow Simulation 2013.

Tabla 2 Equipamiento empleado para las mediciones.

Micromanovacuómetro. Marca: Alnor. Modelo: 560. Número de serie: 56057034. Certificado de Calibración N° 16364. Emitido por INTI.
Tubo Pitot Dwyer. Tipo: 160-12. Modelo: A16R. Número de serie: 108001-00. Número de parte: 634634000.
Instrumento Multifunción. Modelo: TESTO 435. Número de serie: 02385358/208.
Sonda de hilo caliente para TESTO 435. Tipo de instrumento: Termómetro electrónico. Modelo: Testo 435-2. Sonda número: 0635 1025. - Tipo de instrumento: Anemómetro electrónico. Modelo: Testo 435-2. Sonda número: 0635 1025. Certificado de Calibración N° 15635. Emitido por TESTO Argentina.



2.1. Mediciones Experimentales

Para realizar las mediciones, se determinó una cuadrícula en el plano medio transversal de la cámara de ensayos, como se muestra en la Figura 2a. En cada punto se determinó el valor de velocidad y temperatura, muestreados cada 1 segundo y por un período mínimo de 60 segundos. Asimismo, se tomó la presión dinámica en el eje axial central del túnel desde la entrada hasta la cámara de ensayos (Fig. 2b).

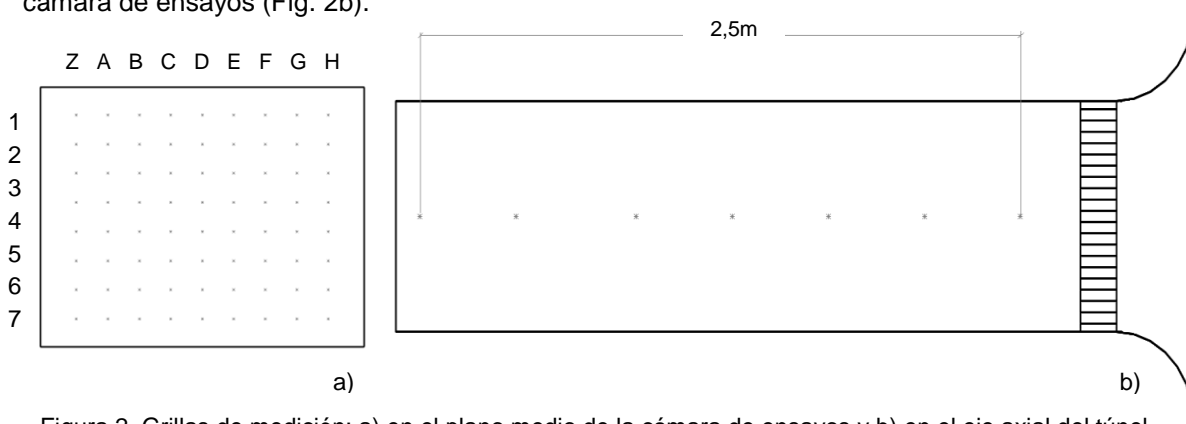


Figura 2 Grillas de medición: a) en el plano medio de la cámara de ensayos y b) en el eje axial del túnel.

Tal como se mencionó, el túnel en estudio dispone de un sistema de control de velocidad reostático. Consta de ocho velocidades que proporcionan saltos discretos desde 0 m/s en la posición cero a 18 m/s en la posición ocho. Las regulaciones de velocidad intermedias entre puntos del reóstato se logran abriendo o cerrando un by-pass que admite aire exterior detrás de la cámara de ensayos, regulando la velocidad del flujo en la misma. Para las mediciones experimentales se mantuvo el reóstato en posición constante, en el punto cuya velocidad dentro del túnel más se aproxima a 10m/s, y se dejaron los by-pass cerrados. Los resultados de las velocidades medias registradas en cada punto se muestran en la Figura 3. Asimismo, las Figuras 4, 5 y 6 contienen los resultados derivados de turbulencia, uniformidad de flujo vertical y uniformidad de flujo transversal, respectivamente. Puede apreciarse que el perfil de velocidad presenta un valor aproximadamente uniforme en toda la sección y una capa límite delgada. Los resultados de turbulencia muestran que el flujo dentro del túnel se encuentra dentro de los parámetros establecidos en [7] y sintetizados en la Tabla 1, mientras que la uniformidad de flujo debe ser mejorada.

La Figura 7 muestra la variación de presión entre la entrada del túnel y la cámara de ensayos. Puede apreciarse que la pendiente del cambio de presión en el entorno del plano de medición es de 3,45 Pa/m. Si se considera que el diámetro tipo de un anemómetro de copas es de 200mm, el cambio porcentual de presión dinámica en el volumen de influencia de la misma es del orden de 10^{-4} %, satisfaciendo los requerimientos de la norma [7].



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

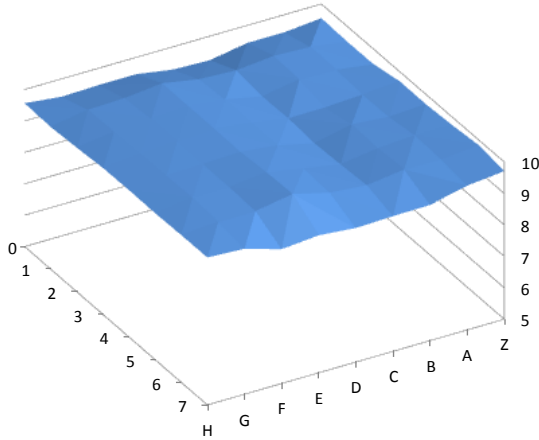


Figura 3 Velocidad medida en la cámara de ensayos (m/s).

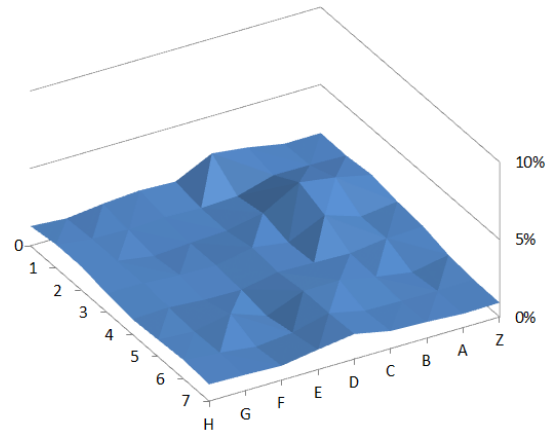


Figura 4 Turbulencia medida en la cámara de ensayos (%).

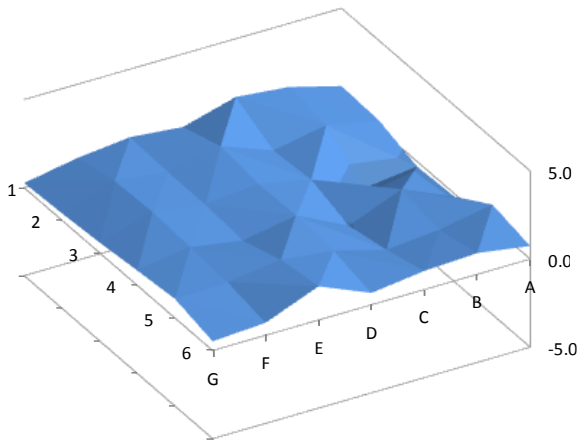


Figura 5 Uniformidad de flujo vertical medida en la cámara de ensayos (%).

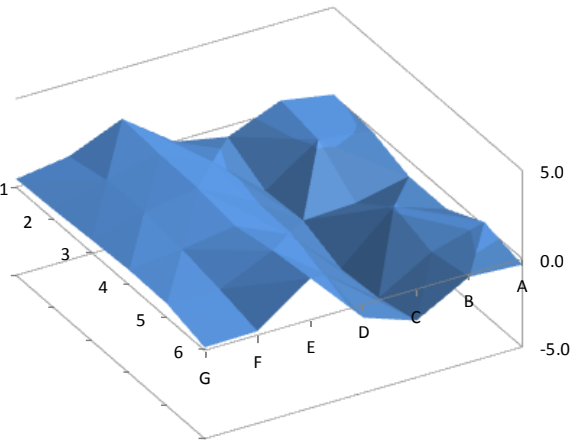


Figura 6 Uniformidad de flujo transversal medida en la cámara de ensayos (%).

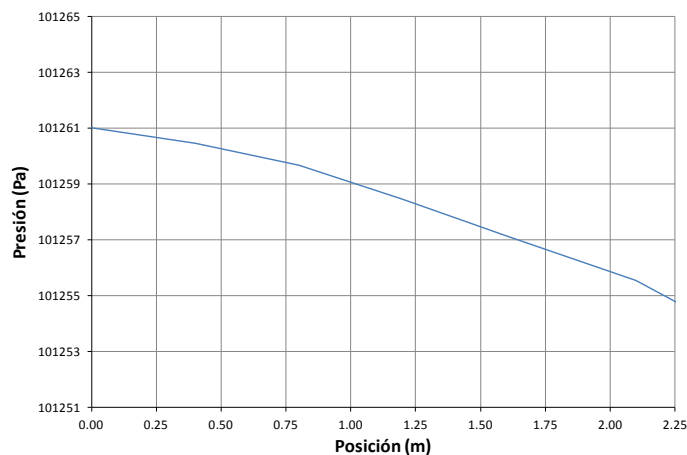


Figura 7 Presión medida en el eje axial del túnel desde la entrada a la cámara de ensayos.



2.1. Simulación Numérica

Para realizar el modelado computacional del flujo en el túnel aerodinámico, se recurrió al software SolidWorks Flow Simulation 2013. Este programa resuelve las ecuaciones gobernantes con el método de volúmenes finitos (FV) en una malla computacional rectangular en coordenadas cartesianas con los planos ortogonales a sus ejes y con refinamiento, principalmente, en las interfases. Los valores de todas las variables físicas se almacenan en los centros de las celdas de la malla. Las derivadas espaciales de las ecuaciones de conservación se aproximan con diferencias implícitas de segundo orden, mientras que las derivadas temporales se aproximan con un esquema implícito de Euler de primer orden. La turbulencia se aborda mediante el modelo $k-\epsilon$, que estima la viscosidad de remolino (Boussinesq's eddy viscosity) en función de la energía cinética asociada a las fluctuaciones turbulentas y a su tasa de disipación de energía [8].

En la Figura 8 se muestra un esquema del dominio computacional empleado para las simulaciones y su correspondiente mallado. Como condiciones de contorno para la simulación se fijó un caudal de $7,6 \text{ m}^3/\text{s}$ en la sección aguas debajo de la cámara de ensayos, presión ambiente en las superficies del volumen de admisión (simulando el ambiente del laboratorio), y condición de no deslizamiento sobre las paredes sólidas.

El tamaño de dicho volumen de admisión ha sido ajustado sistemáticamente hasta obtener sobre todas sus superficies condiciones uniformes. Asimismo, el mallado ha sido refinado hasta mantener resultados dentro de márgenes estrechos en simulaciones con distintos tamaños de elemento.

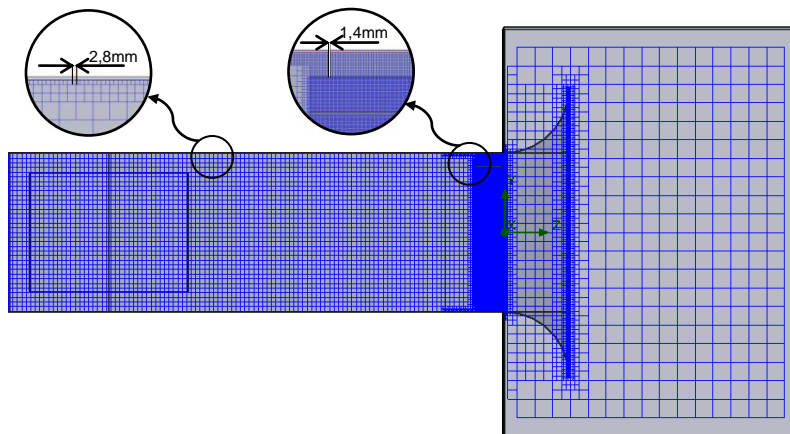


Figura 8 Grilla computacional empleada en la simulación.

En la Figura 9 se muestra la distribución de velocidades en el plano medio del túnel, mientras que en la Figura 10 puede verse la distribución de presión. La Figura 11 muestra las líneas de trayectoria del fluido.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

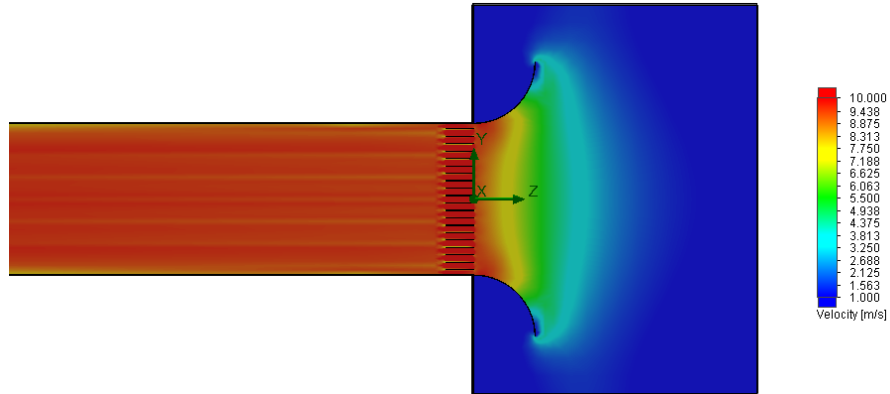


Figura 9 Distribución de velocidades en el plano medio del túnel resultante de las simulaciones.

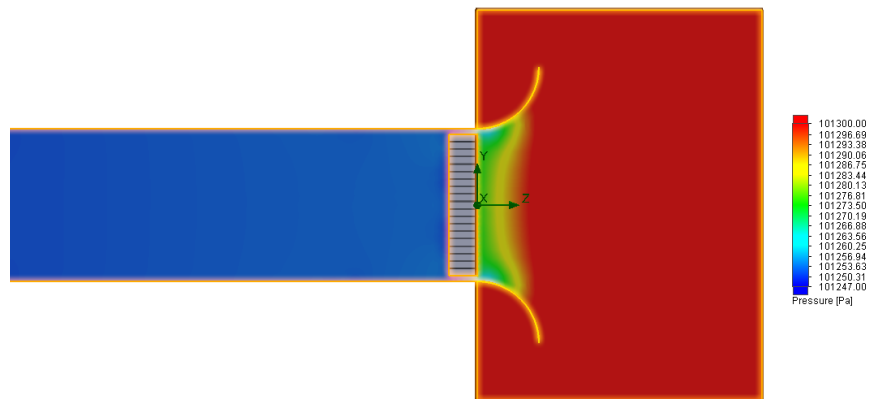


Figura 10 Distribución de presión en el plano medio del túnel resultante de las simulaciones.

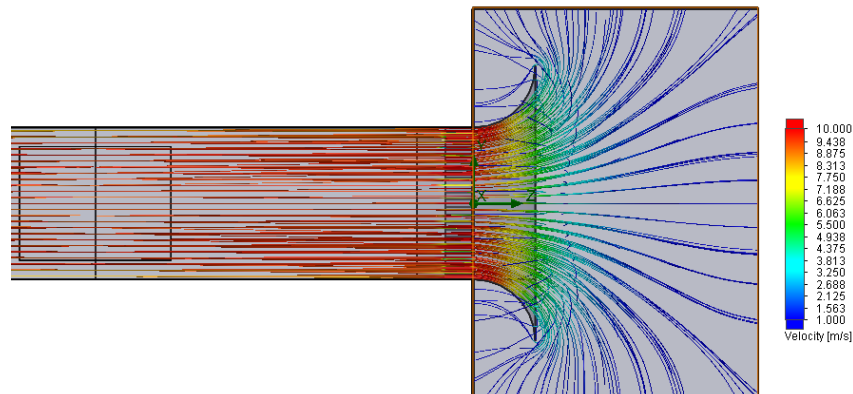


Figura 11 Líneas de trayectoria del fluido.

Puede apreciarse que si bien la presión decrece monótonamente desde la succión hasta la cámara de ensayos, la velocidad presenta “franjas” variación de velocidad producto de una admisión no uniforme.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

En la Figura 12 se muestra el perfil de velocidad en la sección media de la cámara de ensayos, mientras que en la Figura 13 puede verse su turbulencia. Estas figuras ponen de manifiesto las discrepancias mencionadas en la velocidad del fluido.

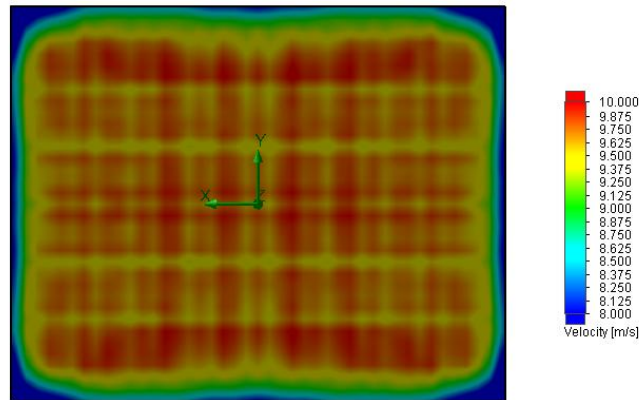


Figura 12 Distribución de velocidad en el plano medio de la cámara de ensayos resultante de las simulaciones.

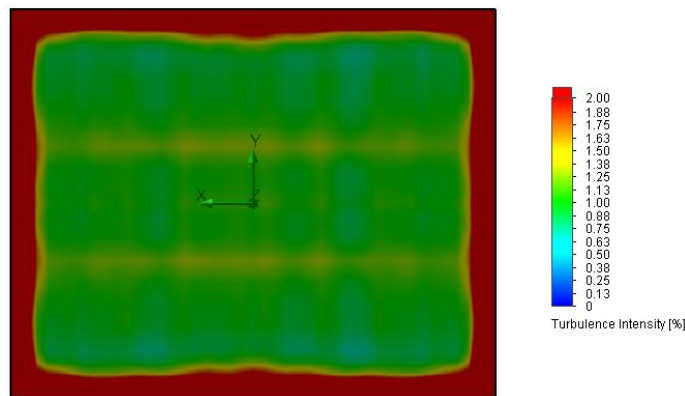


Figura 13 Turbulencia en el plano medio de la cámara de ensayos resultante de las simulaciones

2.3. Comparación de Resultados

En la Figura 14 se muestra la comparación de los perfiles de velocidad obtenidos en las mediciones y en las simulaciones, en la línea vertical delimitada por la intersección del plano medio axial del túnel y el plano medio transversal de la cámara de ensayos. En la Figura 15 puede verse la comparación de las turbulencias medidas y simuladas. La Figura 16 muestra la comparación de las caídas de presión medidas en el eje axial central del túnel desde la entrada hasta la cámara de ensayos.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL AREA
MECANICA
DE LAS
INGENIERIAS

FoDAMI

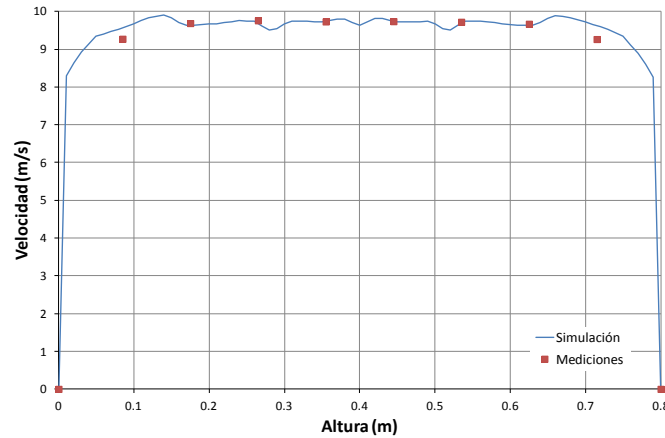


Figura 14 Comparación de velocidad sobre la línea vertical central de la cámara de ensayos.

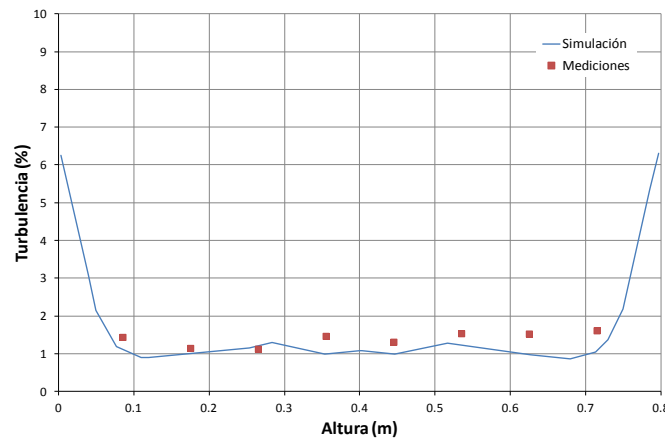


Figura 15 Comparación de turbulencia sobre la línea vertical central de la cámara de ensayos.

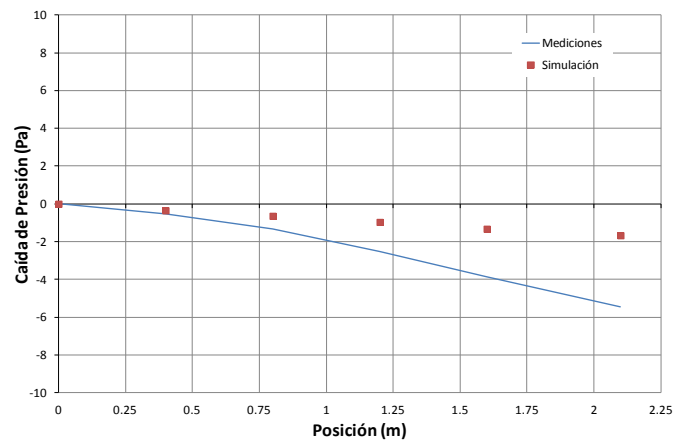


Figura 16 Comparación de caída de presión en el eje axial del túnel desde la entrada a la cámara de ensayos.



IV CAIM 2014

Cuarto Congreso Argentino de Ingeniería Mecánica



UNIVERSIDAD NACIONAL DEL NORDESTE
FACULTAD DE INGENIERÍA
Resistencia Chaco - Rep. Argentina

FORO
DOCENTE
DEL ÁREA
MECÁNICA
DE LAS
INGENIERÍAS

FoDAMI

Puede apreciarse que los resultados de las simulaciones de presión presentan una pendiente menor que los obtenidos de las mediciones experimentales. Esta discrepancia puede corregirse modificando la rugosidad impuesta para las simulaciones o bien cambiando el modelo de turbulencia empleado (κ - ϵ). No obstante, se admitió en esta instancia esta diferencia dado que tanto el espesor de la capa límite como los perfiles de velocidad y turbulencia mostraron buena concordancia entre mediciones y simulaciones.

3. CONCLUSIONES

Se realizó una campaña de mediciones para determinar las características del flujo en la cámara de ensayos del túnel del Laboratorio de Mecánica de Fluidos de la UNPSJB y se encontró que el mismo cumple con los requisitos de la norma IEC 61400-12-1 – Annex F [7], salvo para la uniformidad de flujo. Asimismo, se realizó la simulación numérica del flujo en el túnel bajo condiciones similares.

Habiendo obtenido buena correlación entre los resultados de las simulaciones y de las mediciones, es posible intervenir en el diseño del túnel para ajustarlo a los citados requisitos. Así, las propuestas de reforma serán sometidas a simulación antes materializarlas, de modo de reducir las incertezas respecto del impacto que tendrán sobre el flujo.

4. REFERENCIAS

- [1] J. Meseguer, A. Sanz, J.M. Perales y S. Pindado, Aerodinámica Civil: Cargas de viento en las edificaciones, McGraw-Hill, España, 2001.
- [2] H.F. Mattio y F. Tilca, Recomendaciones Para Mediciones de Velocidad y Dirección de Viento con Fines de Generación Eléctrica y Medición de Potencia Eléctrica Generada por Aerogeneradores, CREE – INENCO CONICET – SECRETARÍA DE ENERGÍA, Argentina, 2009.
- [3] MEASNET Measurement Procedure for Cup Anemometer Calibrations. Final Technical Experts Group Draft. MEASNET, Leuven, Belgium. 1998.
- [4] S. Costa y D. Barilá, Desarrollo y Construcción de un Túnel de Viento de 30Kw, P.I. 106, Facultad de Ingeniería UNPSJB, Argentina, 1990.
- [5] R. Becker, La Central Eléctrica de Comodoro Rivadavia, La AEG al Día, Año II, Número 5/6, pp.102-118,1926.
- [6] W.R. Rae y A. Pope, Low-Speed Wind Tunnel Testing, John Wiley & Sons, EEUU, 1984.
- [7] IEC 61400-12-1. Power performance measurements of electricity producing wind turbines. 2005.
- [8] Flow Simulation 2013 Technical Reference, Dassault Systemes, 2013.