

## MODELADO NUMÉRICO DE TORNADOS

**Juan P. Arroyo<sup>a</sup>, Victorio Sonzogni<sup>a</sup> y Gustavo Balbastro<sup>b</sup>**

<sup>a</sup>*CIMEC-INTEC-UNL-CONICET, Güemes 3450, 3000 Santa Fe, Argentina, arroyo\_jp@hotmail.com, sonzogni@intec.unl.edu.ar*

<sup>b</sup>*UTN, FR Parana y UTN, FR Santa Fe, Lavaise 610, 3000 Santa Fe, Argentina, gbalbastro@yahoo.com*

**Palabras Clave:** Tornado, Simulación Numérica, Large Eddy Simulation, M.E.F.

**Resumen.** Los tornados son fenómenos muy violentos que pueden ocasionar daños materiales y pérdidas de vida. Pueden producirse en determinadas zonas y tienen un efecto localizado y devastador. Por su naturaleza y ocurrencia no es sencillo medir velocidades y presiones de los mismos. A los efectos de estudiarlos se suele utilizar dispositivos que reproducen en laboratorios las condiciones de formación de tornados.

En este trabajo se trata el modelado numérico de tornados. Para ello se ha utilizado el software PETSc-FEM (Portable, Extensible Toolkit for Scientific Computation - Finite Element Method), desarrollado en el CIMEC (Centro Internacional de Métodos Computacionales para Ingeniería), basado en elementos finitos y que utiliza procesamiento distribuido (cálculo paralelo), corriendo sobre el cluster Aquiles del CIMEC, compuesto por 82 nodos de cálculo. PETSc-FEM modela las ecuaciones de Navier-Stokes no estacionarias incompresibles, mediante una formulación SUPG/PSPG (Streamline-Upwind Petrov-Galerkin / Pressure Stabilizing Petrov-Galerkin) de elementos finitos y con un modelo de turbulencia del tipo L.E.S. (Large Eddy Simulation).

Se ha modelado un dispositivo experimental, obtenido de la literatura, consistente en dos regiones diseñadas para reproducir el flujo de viento de un tornado, una región de convección y una región de convergencia, y en función del número de Reynolds y de la Relación de Remolino, obtenemos el patrón de flujo que simula al tornado.

En este trabajo se muestran algunos resultados preliminares que son similares a los reportados en la literatura. Esto permite considerar que la técnica utilizada puede servir a los efectos de evaluar la acción de tornados sobre las construcciones, que es el objetivo de nuestro proyecto.

## 1. INTRODUCCIÓN

Muchos de los problemas de ingeniería, a la hora de diseñar una estructura, consisten en conocer el comportamiento de la misma frente a fenómenos meteorológicos, que producen vientos extremos como ser tornados o corrientes descendentes. Para esto desarrollar herramientas que permiten tener un mayor conocimiento sobre estos fenómenos y sus efectos sobre cada tipo de estructuras es de gran importancia, tal como se ve reflejado en la literatura. Estas herramientas permiten estudiar la incidencia de estos fenómenos sobre las estructuras, a través de modelos a escala reducida, que se ensayan en laboratorios especiales. Los túneles de viento de capa límite permiten simular las condiciones del viento que afecta las construcciones civiles.

Evaluar estos diseños, desde los más convencionales, hasta otros menos comunes, que van desde estructuras para protección de cultivos hasta centrales nucleares o plantas químicas, permiten obtener los mejores resultados, evitando los daños que pueden provocar desde pérdidas económicas, que condicionan la viabilidad de un emprendimiento, hasta pérdidas humanas y efectos ambientales desastrosos.

Existen muchos y diferentes laboratorios en el mundo, que trabajan con modelos a escala y túneles de viento, tratando de reproducir el fenómeno y sus consecuencias. Otros encarar el estudio mediante el empleo de técnicas de mecánica computacional, empleando la llamada Dinámica de Fluidos Computacional (CFD), que permite simular numéricamente el comportamiento de fluidos como el aire y predecir su acción sobre las construcciones con adecuado realismo. Esto lleva a obtener resultados sin tener que realizar un modelo físico, o permite comparar resultados de laboratorio con la simulación, para contrastar si la simulación representa en forma real el problema, o si el modelo se puede mejorar optimizando el diseño de la simulación y llevándolo al modelo escala.

En el CIMEC (Centro Internacional de Métodos Computacionales para Ingeniería), dependiente del INTEC (Instituto de Desarrollo Tecnológico para la Industria Química) de Santa Fe, se está trabajando desde hace varios años en el desarrollo de métodos y software para simulación numérica de problemas de mecánica computacional, incluyendo aplicaciones en mecánica de fluidos, mecánica de sólidos, termomecánica, biomecánica y robótica, que en muchos casos han derivado en desarrollos de aplicación industrial.

En particular, se ha desarrollado el código computacional PETSc-FEM, una herramienta en CFD (Computational Fluid Dynamics) del tipo software libre. Está basada en el Método de los Elementos Finitos (FEM) usando procesamiento distribuido (cálculo paralelo en clusters de PC's) y programación orientada a objetos.

Estos programas son procesados en paralelo en los clusters del CIMEC, dado que se requiere de grandes potencias de cálculo para poder resolver problemas de gran tamaño, como son los que resultan de los flujos turbulentos.

Debido a los movimientos verticales y rotacionales, los tornados presentan un desafío para su estudio, ya que las herramientas desarrolladas en la ingeniería del viento, tales como coeficientes de presión, de arrastre, etc., en general sólo pueden considerarse válidas para vientos en estabilidad neutra, que no es el caso de estos vientos extremos.

En este trabajo se trata de poner a punto herramientas de modelado numérico que permitan estudiar este fenómeno. Se muestran algunos resultados preliminares. En primer lugar se incluye una pequeña descripción de los tornados. Luego se describe muy brevemente la técnica numérica y los programas utilizados. Finalmente se muestran algunos ejemplos en los que se modelan dispositivos experimentales o bien condiciones a escala natural.

## 2. TORNADOS

Los tornados son fenómenos meteorológicos muy violentos que, aunque su ocurrencia es muy baja, generan pérdidas de vidas y grandes pérdidas económicas por los daños que ocasionan. En la Figura 1, se observa un tornado registrado sobre en la ciudad de Santa Fe el 15 de febrero de 2010, nótese el tamaño del tornado en comparación con el edificio de la Facultad de Ingeniería de la UNL.



Figura 1: Tornado en la ciudad de Santa Fe - 15/02/2010. Fuente: Diario El Litoral

Un tornado es una columna de aire que gira violentamente y que desciende de una nube cumulonimbus hasta el suelo. La base de esta nube se encuentra a altitudes por debajo de los 2 Km y se caracteriza por su gran desarrollo vertical, en donde su tope alcanza aproximadamente los 10 Km de altura. El diámetro del tornado en el suelo no suele tener más de 25 ó 50 metros, pero puede girar a velocidades de más de 450 km/h, por lo que son tremendamente destructivos y aspiran hacia arriba todo lo que encuentran a su paso. Se desplazan a velocidades que rondan los 60-70 km/h y su sonido se puede oír a decenas de kilómetros de distancia. Los tornados duran pocos minutos y dejan sobre el suelo rastros de su poder devastador, que pueden tener medio centenar de metros de ancho. Estos rastros sirven para estimar la magnitud del tornado (Schwarkopff y Rosso, 1993). Se puede ver el tornado gracias al polvo aspirado hacia arriba y a las gotas de agua condensadas que hay dentro de ellos. Es muy fácil, por lo tanto, que en su inicio parezcan transparentes (o casi), puesto que aún no tuvieron tiempo de elevar la suficiente cantidad de polvo que les da un aspecto grisáceo.

El principal país donde se registran tornados es en los Estados Unidos, pero también se registran con frecuencia en otros países del mundo que incluyen a Sudáfrica, Argentina, Uruguay, el sur de Brasil, Australia y Nueva Zelanda, así como en Europa y parte de Asia. En Argentina las provincias más afectadas por tornados son Córdoba, Santa Fe, Entre Ríos, Sur de Corrientes y Norte y Centro de Buenos Aires. (Figura 2)

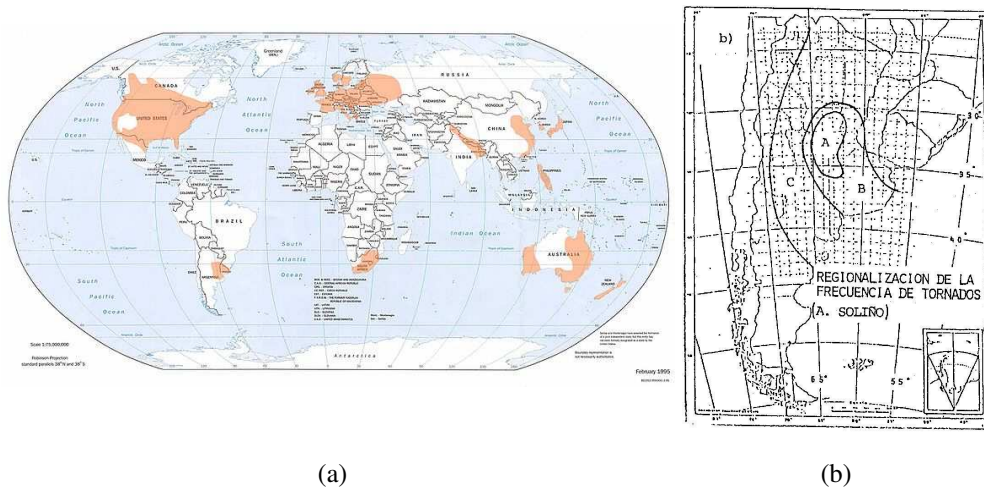


Figura 2: Zona de formación de tornados, (a) en el mundo (Wikipedia, 2001), y (b) en la Argentina (Schwarkopff y Rosso, 1993)

La medición en campo de presiones o velocidades producidas por un tornado son muy difíciles, por la pequeña escala espacial, por la corta duración temporal y por lo impredecible de la ocurrencia del fenómeno. La información disponible de los mismos es muy limitada y casi inexistente en cuanto a la evaluación de fuerzas o presiones actuante sobre las estructuras, lo que motiva este estudio para la simulación de tornados.

La mecánica de fluidos computacional (CFD) ha sido utilizada exitosamente para muchos problemas ingenieriles y en particular para aerodinámica de construcciones (Balbastro, 2009).

Existen varios laboratorios en el mundo donde se intenta reproducir las condiciones imperantes en un tornado. Para ello se construyen dispositivos en los cuales se reproducen la geometría y los campos de velocidades y presiones. En este trabajo se ha efectuado el modelado numérico de uno de estos dispositivos (Monji y Mitsuta, 1985). El objetivo es el de corroborar la adecuación de la técnica numérica para su uso en la estimación de presiones sobre objetos o construcciones.

### 3. MODELO NUMÉRICO

El modelo numérico empleado para simular el tornado, es un dispositivo que consiste en dos regiones diseñadas para reproducir el flujo de viento de un tornado, una región de convección y una región de convergencia, ambas cilíndricas, similar a la configuración empleada en los laboratorios experimentales (Nomura et al., 2009), como se indica en la Figura 3.

Como hipótesis simplificativas para el cálculo, se tuvo en cuenta que el fluido es incompresible, que no hay flujo de fondo, y que no intervienen factores termodinámicos, ó el efectos de Coriolis, dada la pequeña escala espacial del fenómeno.

En base a esta configuración se diseñó nuestro modelo numérico, obteniendo resultados comparables con la bibliografía (Arroyo et al., 2011). Pero dado que la velocidad estaba fija como condición de contorno a la salida, y no siendo esto matemáticamente muy correcto, se rediseñó el modelo matemático con una configuración similar a la presentada por Matsui y Tamura (2009) (Figura 4), diseñando la base del modelo cúbica, y fijándole la velocidad en la condición de contorno de entrada, y ya que el modelo es incompresible, este no debe presentar ninguna diferencia, quedando mejor planteado desde el punto de vista matemático.

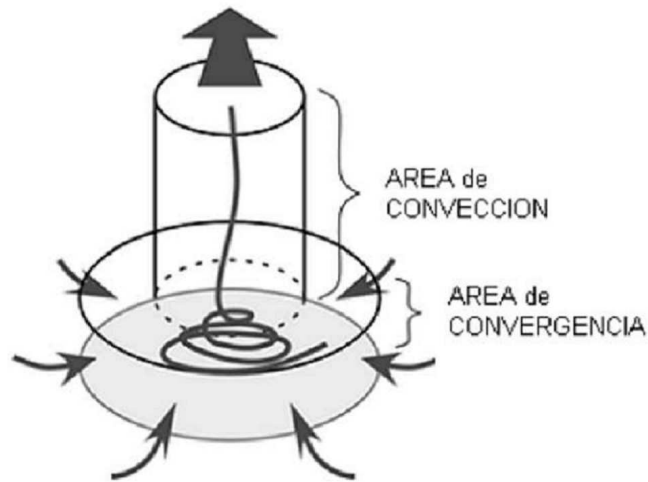


Figura 3: Esquema del Simulador de Tornados (Nomura et al., 2009)

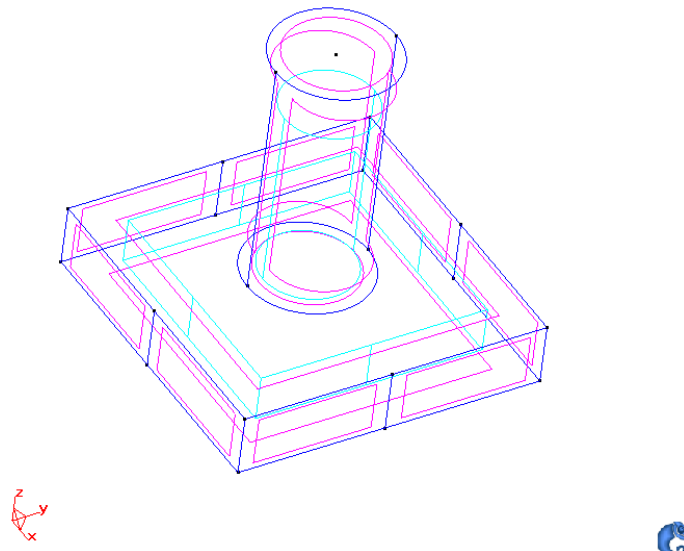


Figura 4: Geometría del dominio simulado

Esta geometría se discretizó mediante el método de elementos finitos, utilizando el software GID (GID, 2011). El modelo consta de aproximadamente 390.000 elementos tetraedros. El paso de tiempo empleado es  $\Delta t = 0,01$  y se calcularon 1000 pasos de tiempo para resolver el problema. Para la resolución del problema, se utilizó el software PETSc-FEM (PETSc-FEM, 1999) que modela las ecuaciones de Navier-Stokes no estacionarias incompresibles, mediante una formulación SUPG/PSPG de elementos finitos y utiliza un modelo de turbulencia del tipo L.E.S. (Large Eddy Simulation), cumpliendo con la premisa de la ecuación de continuidad

$$\nabla \cdot v = 0 \quad (1)$$

Siendo la Ecuación de Navier-Stokes incompresible:

$$\rho \left[ \frac{\partial v}{\partial t} + v \cdot \nabla v \right] = -\nabla p + \mu \nabla^2 v + \rho g \quad (2)$$

donde  $v$  la velocidad del fluido,  $\rho$  la densidad,  $\mu$  la viscosidad dinámica,  $p$  la presión y  $g$  la fuerza de la gravedad.

Las condiciones de contorno para este problema han sido las siguientes: En la superficie cilíndrica las condiciones de bordes son deslizantes o "slip". En la tapa superior del cilindro, la condición es libre. En el cubo, en la tapa superior, la condición es deslizante o "slipz en la base la condición es no deslizante o "no slip". En las caras laterales, en la mitad izquierda, la condición es libre y en la mitad derecha, le impusimos una condición de velocidad de entrada. Además se especificó una presión de referencia  $p_0$  en el punto central de la tapa superior.

El patrón del flujo resultante, que se espera del comportamiento del modelo, depende del número de Reynolds y de la relación de remolino (*swirl ratio*). El número de Reynolds se define como

$$Re = Q/\nu \quad (3)$$

donde  $\nu$  es la viscosidad cinemática y  $Q = u_0 A/h$  siendo  $u_0$  la velocidad de salida;  $A$  el área del tubo de convección; y  $h$  la altura del cubo. El denominado *swirl ratio* se define como

$$S = R \tan\theta/(2h) \quad (4)$$

siendo  $R$  el radio del tubo de convección y  $\theta$  el ángulo con respecto a la normal, con que entra el flujo en la superficie cúbica de la zona de convergencia. Cabe mencionar que según los valores de  $Re$ , podemos interpretar una zona circunscripta dentro del cubo (Figura 5), donde  $S$  fuerza el ángulo de entrada que varía dentro del dispositivo, obteniéndose diferentes patrones de flujo.

#### 4. RESULTADOS NUMÉRICOS

Para postprocesar la información obtenida de PETSc-FEM, se utilizó MatLab (MatLab, 1984), y para la visualización de los resultados se empleó el software GID. En las Figuras 6 a 14 se muestran algunos resultados obtenidos. En la Figura 6 se pueden ver las líneas de corriente donde se observa el patrón del escurrimiento que asciende con corrientes helicoidales. En las Figuras 7 a 10 se muestran los resultados obtenidos de presión, y en las Figuras 11 a 14 los resultados de velocidades, dentro del dispositivo.

Estos resultados corresponden a un número de Reynolds  $Re = 1000$ , y tienen una relación de remolino  $S = 0,20$ . Estas condiciones son equivalentes a los ensayos reportados por Nomura et al. (2009), y los resultados obtenidos se condicen con los indicados en ella. Para valores de número de Reynolds menores, el patrón de flujo se hace más irregular, en tanto que para valores

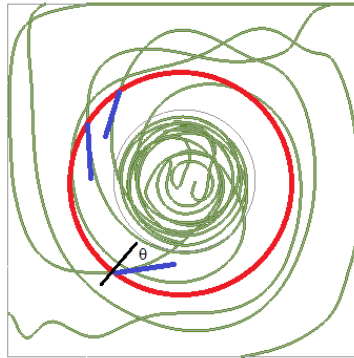
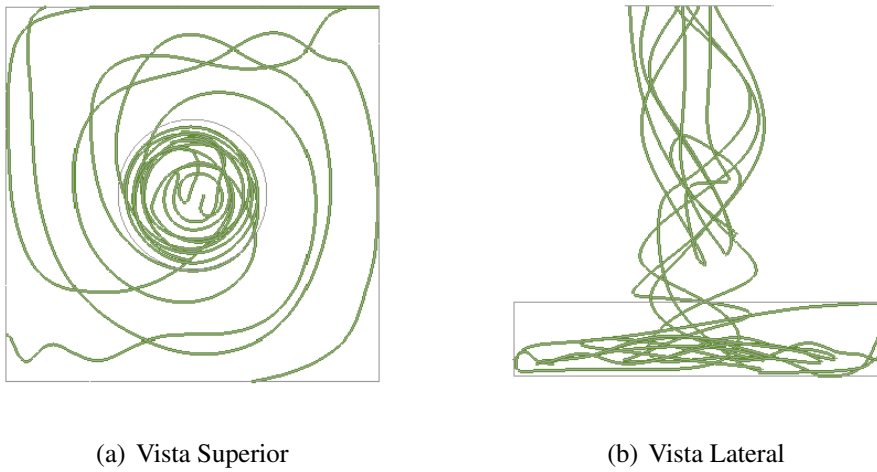


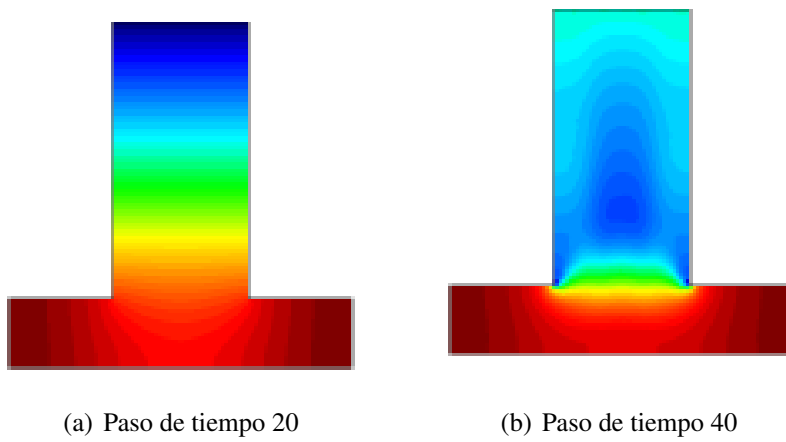
Figura 5: Ángulo  $\theta$



(a) Vista Superior

(b) Vista Lateral

Figura 6: Líneas de Corriente



(a) Paso de tiempo 20

(b) Paso de tiempo 40

Figura 7: Perfil de Presiones

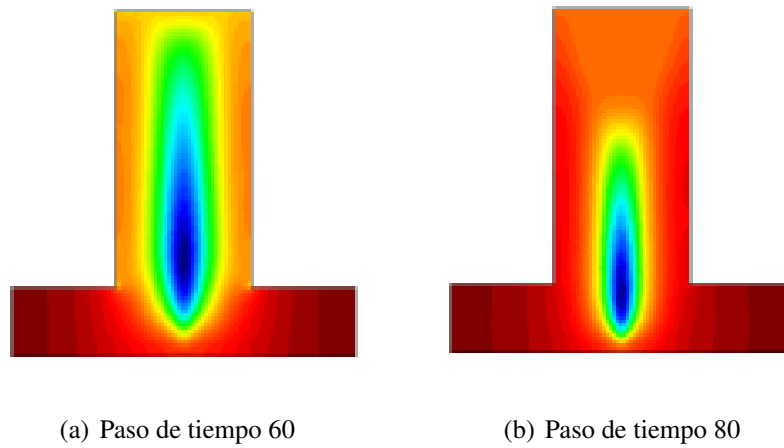


Figura 8: Perfil de Presiones

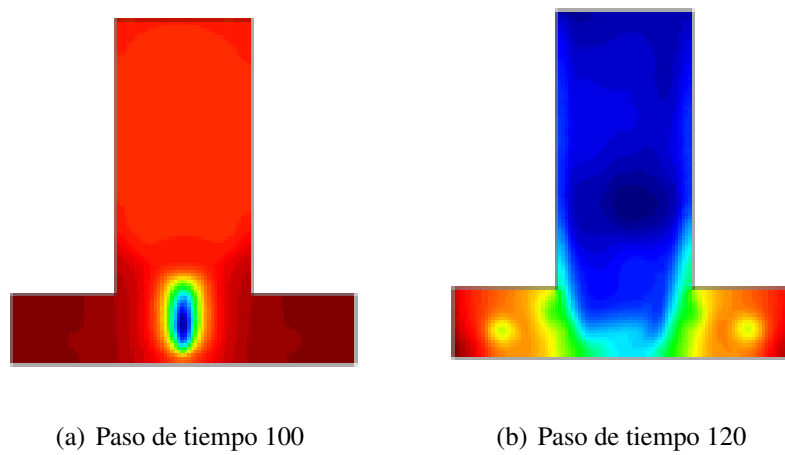


Figura 9: Perfil de Presiones

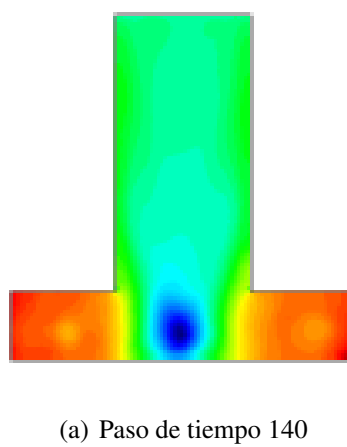


Figura 10: Perfil de Presiones



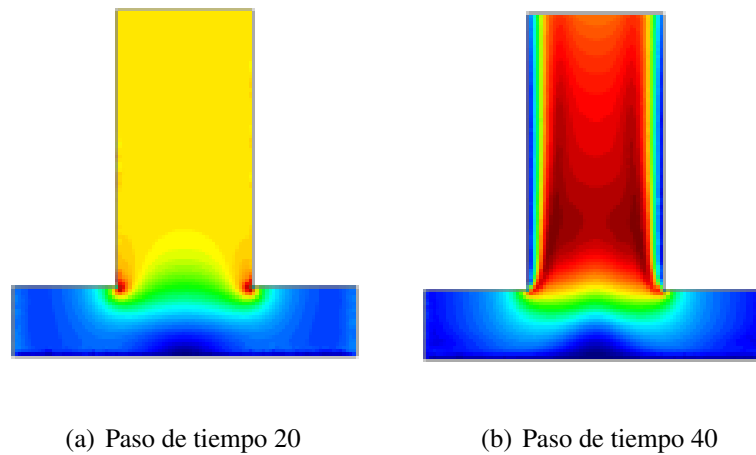


Figura 11: Perfil de Velocidades

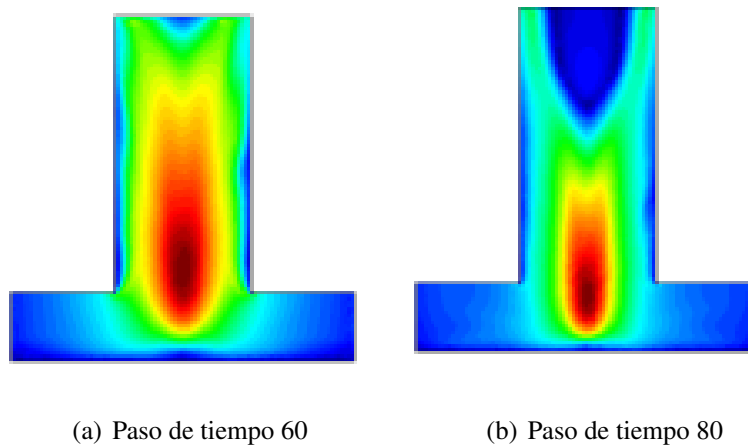


Figura 12: Perfil de Velocidades

mayores, se produce una columna ascendente sin rotaciones, prácticamente. La relación de remolino  $S$  representa la relación entre las componentes tangenciales y axiales de la velocidad. Valores bajos de  $S$  suelen estar asociados a flujos laminares y valores entre 0.3 y 0.7, según [Nomura et al. \(2009\)](#), a flujos turbulentos.

Como puede verse en los perfiles de presiones, al formarse el tornado, se produce un descenso de presión en el centro de éste, que produce a su vez una recirculación del flujo dentro del tornado, en el núcleo del mismo, como los descritos por [Jischke y Parang \(1978\)](#). Esto es importante a la hora de entender el comportamiento del tornado. Estos descensos de presión han llevado a suposiciones y mitos respecto a como reducir los daños ante un tornado.

En las Figuras 9(b) y 10 se observa la formación de centros de baja presión a los lados del tornado, que visto en 3-D tiene una forma de anillo alrededor del mismo. Estos se forman por la fuerza del tornado y por la diferencia de presión que se genera por el paso de éste. Esto puede verse en tornados de gran magnitud, F4 o mayores, según la escala Fujita.

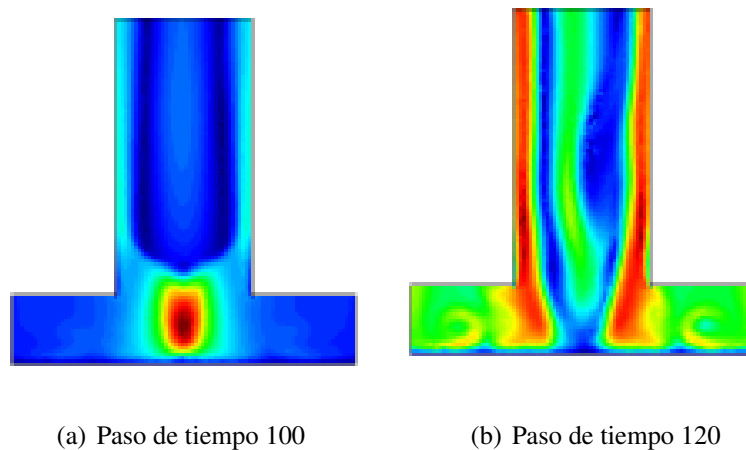


Figura 13: Perfil de Velocidades

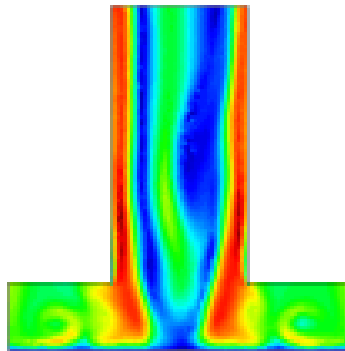


Figura 14: Perfil de Velocidades

## 5. CONCLUSIONES

En este trabajo se han mostrado algunos resultados preliminares para el modelado numérico de tornados. Debido a la carencia de datos medidos sobre fenómenos reales, se ha procedido a modelar numéricamente un dispositivo experimental utilizado para generar condiciones similares a la de los tornados, basándonos en la bibliografía. El uso de programas de CFD de elementos finitos, con técnicas de L.E.S. para representación de la turbulencia ha resultado adecuado para este estudio. Los resultados se condicen con los publicados en la bibliografía.

Dadas las dimensiones relativas de los centros de baja presión observados alrededor del tornado, se va a rediseñar el dominio de la simulación, en próximas investigaciones, a fin de evitar que la geometría del mismo incida en los resultados.

A partir de esto, el objetivo del proyecto será estimar numéricamente las presiones sobre las estructura o construcciones, cuando éstas están sometidas a los esfuerzos producidos por el paso de un tornado (Maruyama, 2009). Esta estimación de presiones tendrá directa aplicación para la evaluación de la seguridad de instalaciones que puedan comprometer vidas humanas, como ser instalaciones de generación de energía, plantas nucleares, líneas de alta tensión, plantas

químicas, etc.

## AGRADECIMIENTOS

Este trabajo se realizó con beca doctoral del CONICET. Se recibió apoyo de los proyectos PICT 2006/1506 y PICT 2010/2492 de la ANPCYT, PIP 112-200801-2956 del CONICET, CAI+D 2009-III-4-2 de UNL y PID UTI-1257 de UTN.

## REFERENCIAS

- Arroyo J., Sonzogni V., y Balbastro G. Modelado numérico de tornados. *Proceeding of 3th Congreso de Matemática Aplicada, Computacional e Industrial, Bahía Blanca, Argentina*, 2011.
- Balbastro G. *Coefficientes de Presión en Cubiertas Abovedadas Aisladas*. Tesis de Doctorado, U.T.N., F.R.S.F., Argentina, 2009.
- GID. The personal pre and post processor program, 2011. CIMNE, [www.gid.cimne.upc.es](http://www.gid.cimne.upc.es).
- Jischke M. y Parang M. On tornado funnels. *Research of the University of Tennessee and University of Oklahoma*, 1978.
- Maruyama T. A numerically generated tornado-like vortex by large eddy simulation. *Proceedings of 7th Asia Pacific Conference on Wind Engineering, Taipei, Taiwan*, 2009.
- MatLab. The language of technical computing, 1984. MathWorks, [www.mathworks.com](http://www.mathworks.com).
- Matsui M. y Tamura Y. Influence of swirl ratio and incident flow conditions on generation of tornado-like vortex. *Proceedings of 5th European and African Conference on Wind Engineering, Florence, Italy*, 2009.
- Monji N. y Mitsuta Y. A laboratory experiment on the multiple structure in tornado-like vortices. *Annual report of D.P.R.I. Kyoto University*, 1985.
- Nomura T., Miyata S., y Hasebe H. An attempt of finite element flow simulation of tornado vortices. *Proceedings of 7th Asia Pacific Conference on Wind Engineering, Taipei, Taiwan*, 2009.
- PETSc-FEM. A general purpose, parallel, multi-physics fem program, 1999. CIMEC, [www.cimec.org.ar/petscfem](http://www.cimec.org.ar/petscfem).
- Schwarkopff M. y Rosso L. Riesgo de tornados y corrientes descendentes en argentina. *CIR-SOC*, 1993.
- Wikipedia. La enciclopedia libre, 2001. [Www.wikipedia.org](http://www.wikipedia.org).