

ESTUDIO DE CORRIENTES DESCENDENTES MEDIANTE DINAMICA DE FLUIDOS COMPUTACIONAL (CFD)

Juan P. Arroyo^a, Victorio Sonzogni^a y Gustavo Balbastro^b

^a*CIMEC-INTEC-UNL-CONICET, Güemes 3450, 3000 Santa Fe, Argentina, arroyo_jp@hotmail.com,
sonzogni@intec.unl.edu.ar*

^b*UTN, FR Parana y UTN, FR Santa Fe, Lavaise 610, 3000 Santa Fe, Argentina, gbalbastro@yahoo.com*

Palabras Clave: Corrientes Descendentes, Simulación Numérica, C.F.D., M.E.F.

Resumen. En este trabajo se muestran algunos resultados preliminares del modelado numérico de corrientes descendentes. El objetivo es evaluar el efecto de éstos fenómenos sobre las construcciones, midiendo las presiones causadas por éstos sobre las estructuras, producto de la misma corriente descendente, y de la formación de vórtices horizontales, con sus consecuencias sobre la estructura. Para el modelado numérico 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. El método de discretización utilizado es el de los Elementos Finitos Estabilizados mediante la formulación SUPG/PSPG (Streamline-Upwind Petrov-Galerkin / Pressure Stabilizing Petrov-Galerkin) para las ecuaciones de Navier-Stokes no estacionarias incompresibles, con un modelo de turbulencia del tipo L.E.S. (Large Eddy Simulation)

Se pretende obtener datos que permitan considerar si la técnica utilizada puede servir a los efectos de la evaluación de presiones sobre construcciones.

1. INTRODUCCIÓN

Los fenómenos meteorológicos que producen vientos extremos, que van desde los sistemas desarrollados que provocan vientos fuertes en atmósfera en estabilidad neutra, hasta los sistemas convectivos asociados a tornados y corrientes descendentes, tienen un gran potencial de daño sobre las construcciones. Desde distintos puntos de vista sus efectos deben ser tenidos en cuenta en el diseño de construcciones convencionales, hasta otras menos comunes que van desde estructuras para protección de cultivos hasta centrales nucleares o plantas químicas. En cada caso, el daño puede provocar desde pérdidas económicas, que condicionan la viabilidad de un emprendimiento, hasta pérdidas humanas y efectos ambientales desastrosos. Por eso, el desarrollo de herramientas que permitan 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. En los casos no cubiertos por los reglamentos, el ingeniero habitualmente debe recurrir a estudios sobre 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. Otra forma de encarar el estudio es mediante técnicas de mecánica computacional. La así llamada Dinámica de Fluidos Computacional (CFD) permite simular numéricamente el comportamiento de fluidos como el aire y predecir su acción sobre las construcciones con adecuado realismo. Estos problemas numéricos sin embargo, requieren de grandes potencias de cálculo, y esto es posible gracias a la disponibilidad de computadoras de alta performance, tales como los clusters tipo Beowulf, capaces de procesar en paralelo y resolver problemas de gran tamaño, como son los que resultan de los flujos turbulentos.

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.

Las corrientes descendentes presentan desafíos para su estudio debidos a sus características y 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, donde los movimientos verticales son importantes, entre otras diferencias que tienen con los vientos que podríamos denominar normales.

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 las corriente descendentes. 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. CORRIENTES DESCENDENTES

Las corrientes descendentes son fenómenos meteorológicos que se crean dentro de una tormenta, al tener ésta un volumen de aire y lluvia frío, que desciende dentro de la misma, y que al adquirir cierta velocidad, atraviesa la base de la nube en dirección al suelo, hasta impactar con

éste y separarse en todas direcciones, produciendo fuertes presiones sobre la superficie donde impacta, ya sea tierra o agua, y fuertes vientos superficiales. Estas corrientes superficiales, al encontrarse con el aire del entorno, crean vórtices horizontales, que pueden ocasionar grandes daños a las estructuras, árboles, etc. (Figura 1). La intensidad de los daños es semejante a las de un tornado, teniendo el flujo de viento, en ambos casos, la característica de ser una columna de aire, pero en el caso del tornado, ésta gira.

Se pueden distinguir dos clases de corrientes descendentes, las secas, asociadas a tempestades de truenos con poca lluvia, y las mojadas o húmedas, que son creadas por tempestades de truenos con gran cantidad de precipitación. Los Microbursts y los Macrobursts son corrientes descendentes en escalas muy pequeñas y muy grandes respectivamente. Las corrientes descendentes son conocidas en aviación y en la náutica, ya que crean los vientos verticales que son peligrosos en aterrizajes de aviones y los vientos horizontales que son peligrosos para las embarcaciones a vela. Todo el proceso tiene una escala temporal del orden de algunos minutos, pudiendo reconocerse distintas etapas en su evolución (Figura 2).



Figura 1: Daños producidos en árboles pequeños por el paso de una Corriente Descendente

Para resolver muchos de los problemas ingenieriles, y en particular para aerodinámica de las construcciones, se utiliza la mecánica de fluidos computacional (CFD) que ha demostrado ser exitosa en la resolución de los mismos (Balbastro, 2009). La técnica numérica utilizada para la discretización del modelo es la de método de elementos finitos. Para el tratamiento de la turbulencia, hay distintas alternativas. Una herramienta práctica es mediante simulación de grandes vórtices (L.E.S., por Large Eddy Simulation), que es el modelo de turbulencia que hemos empleado.

3. MODELO NUMÉRICO

Dado que no es sencillo lograr tener mediciones a escala natural del fenómeno de corrientes descendentes, es que se utilizan dispositivos experimentales para su simulación en laboratorio. Por otra parte hay modelos matemáticos que tratan de representar las condiciones imperantes

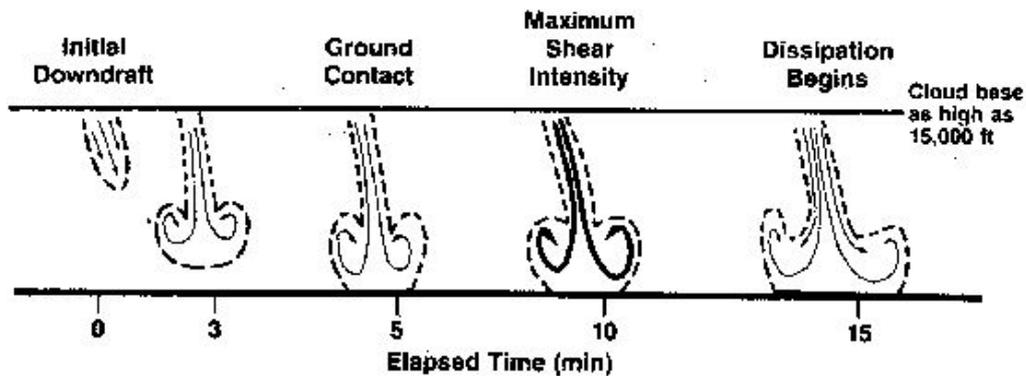


Figure 10. Evolution of a microburst. Microburst winds intensify for about 5 min after ground contact and typically dissipate about 10 to 20 min after ground contact.

Figura 2: Esquema de Formación de una Corriente Descendente

en este tipo de fenómeno, tales como los propuestos por [Ponte y Riera \(2007\)](#) y [Riera \(2010\)](#).

El modelo numérico empleado en este trabajo para simular la corriente descendente, consiste en un dominio prismático, con una relación de lados 4:1 (base-altura, medido desde el centro de aplicación de la corriente descendente), que permite considerar que las caras verticales del modelo no inciden en el comportamiento del flujo. El diámetro de la sección donde aplicamos en flujo de entrada es de 0,25. (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 efecto de Coriolis, dada la pequeña escala espacial del fenómeno.

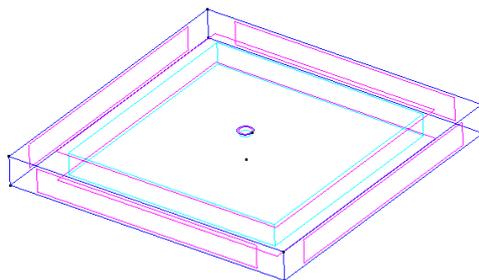


Figura 3: Geometría del dispositivo para simular Corrientes Descendentes

Esta geometría se discretizó mediante el método de elementos finitos, utilizando el software GID ([GID, 2011](#)). El modelo consta de aproximadamente 990.000 elementos tetraedros. El paso de tiempo empleado es $\Delta t = 0,01$ y se calcularon 1500 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, ρ la densidad, μ la viscosidad dinámica, p la presión y g la fuerza de la gravedad.

Las condiciones de contorno son: en el piso del modelo "non slip", el techo del modelo es "slip", y las caras verticales son libres. En el centro del area de entrada se colocó una presión de referencia $p = 0$ y una velocidad de entrada $u = 27,5$ con una distribución

$$f = \phi(x)\psi(t) \quad (3)$$

donde $\phi(x)$ es una función espacial con una forma de semionda de seno, aplicada en un intervalo de tiempo menor al tiempo total (esto es para simular el comienzo de la corriente descendente, hasta su disipación y las consecuencias una vez que este se disipa) y $\psi(t)$ es una función temporal que sigue una distribución como la mostrada en la Figura 4.



Figura 4: Distribución de la velocidad de entrada

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 5 a 13 se muestran algunos resultados obtenidos de la evolución de una corriente descendente. En las Figuras 5 a 7 se muestran los resultados obtenidos de velocidades, dentro del dispositivo.

Mientras que en las Figuras 8 a 13 se muestran los resultados obtenidos de presiones sobre el piso del dispositivo y vistos en forma lateral.

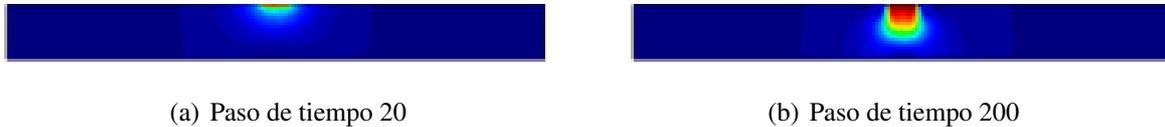


Figura 5: Perfil de Velocidades

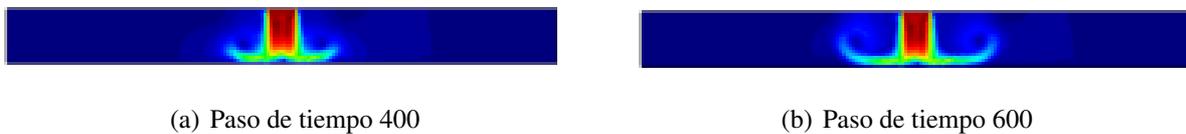


Figura 6: Perfil de Velocidades

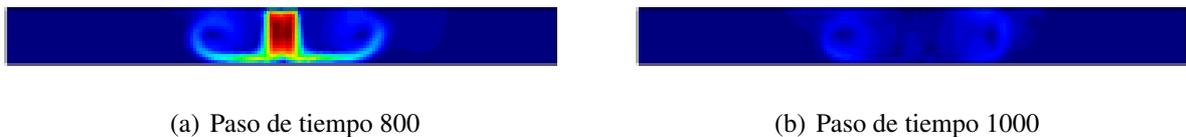


Figura 7: Perfil de Velocidades

Como puede verse en los perfiles de presiones, sobre el piso del dispositivo (Figuras 8 a 10), al generarse la corriente descendente e impactar contra el piso, se genera una zona de altas presiones, disipándose en forma radial. Esto en edificios o construcciones puede llegar a ser importante por el esfuerzo a los que son sometidos, mientras que en aviación, esta presión producto de la corriente descendente puede hacer caer la aeronave y estrellarla contra la superficie.

También se aprecia en los perfiles de presiones vistos desde el lateral (Figuras 11 a 13), que al impactar la corriente descendente contra la superficie y formar los vórtices horizontales, se generan centros de baja presión a los laterales de los mismo, que son peligrosos por el mismo cambio de presión y por los torbellinos que generan cambios en la dirección del aire.

En las Figuras 15 a 16 se observan los vectores de velocidad, en distintos instantes de tiempo, pudiendo compararlas con la imagen obtenida de una corriente descendente. (Figura 14)

5. CONCLUSIONES

Estos resultados preliminares de modelado numérico de Corrientes Descendentes, nos permiten observar el comportamiento de la Corriente Descendente, y poder verificar que el comportamiento del modelo numérico es el esperado, comparándolo con los resultados publicados en la bibliografía. También podemos concluir que el dominio computacional elegido es correcto, y que el mismo permite estudiar a la corriente descendente el toda su duración sin interferencias

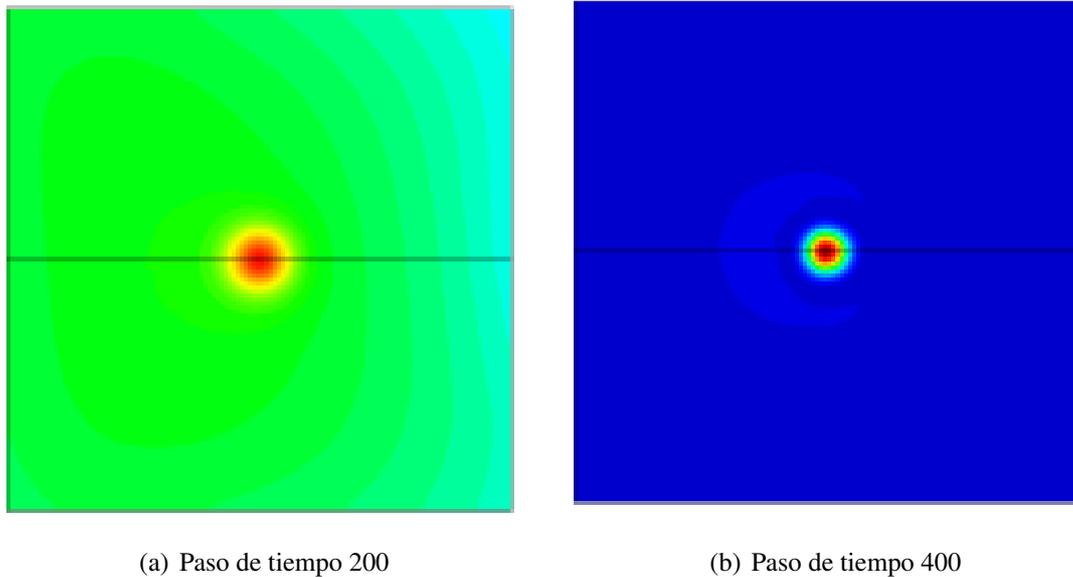


Figura 8: Perfil de Presiones - Vista Superior

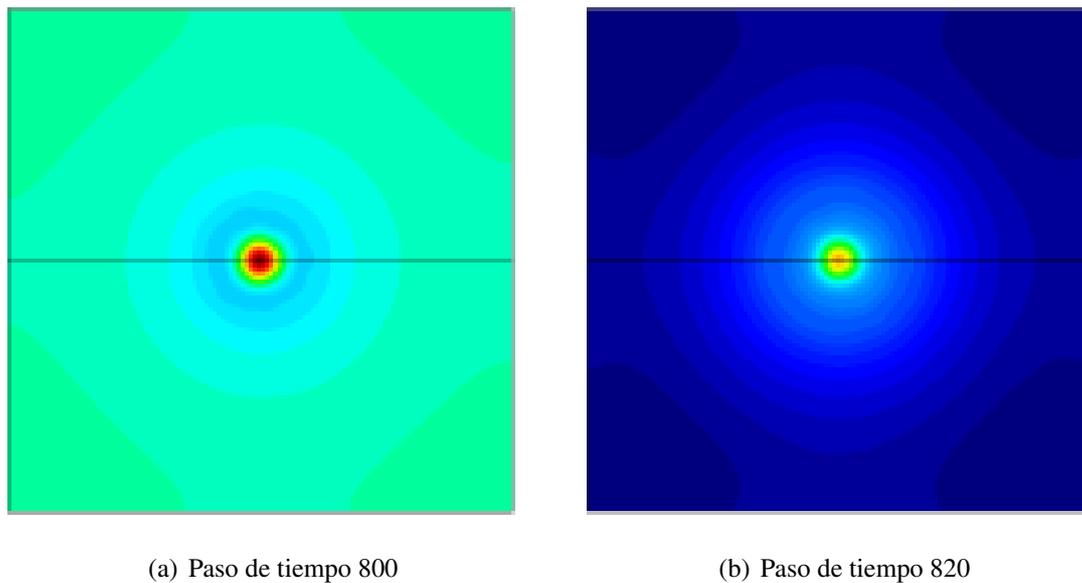


Figura 9: Perfil de Presiones - Vista Superior

ni alteraciones de resultados. El uso de programas de CFD de elementos finitos, con técnicas de L.E.S. para la representación de la turbulencia ha resultado adecuado para este estudio.

A partir de esto, el objetivo del proyecto es el de poder estimar numéricamente las presiones sobre las estructura o construcciones, cuando estas están sometidas a los esfuerzos producidos por la corriente descendente, ya sea por las altas presiones, al estar la construcción debajo de la corriente, o por los fuertes vientos superficiales que se producen al impactar la corriente contra la superficie. También es importante observar el comportamiento de la estructura cuando ésta está sometida a las bajas presiones que se producen por los vortices horizontales. Esta estimación

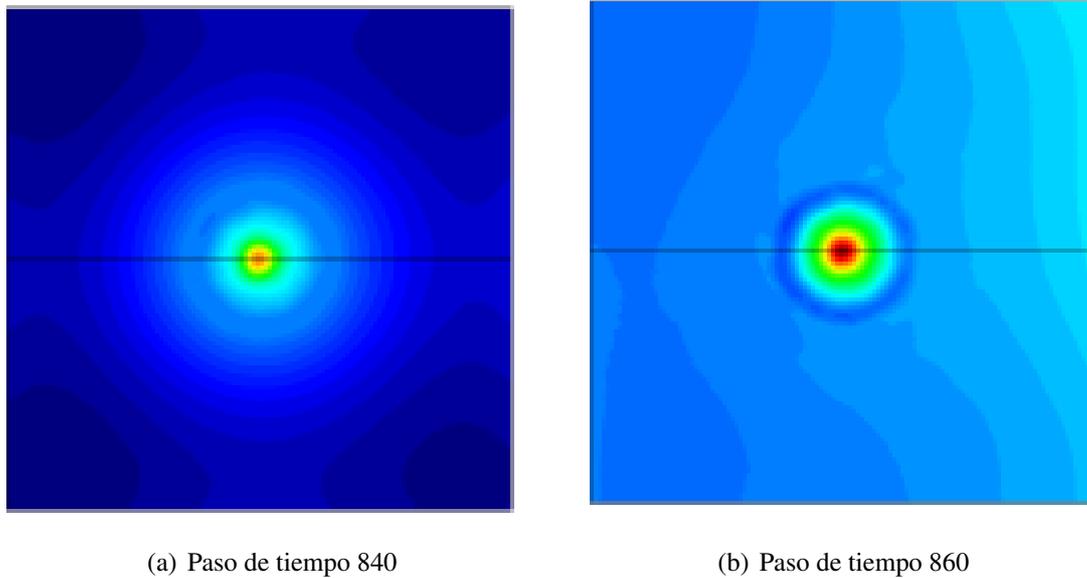


Figura 10: Perfil de Presiones - Vista Superior

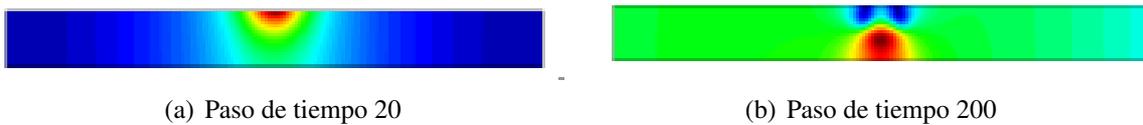


Figura 11: Perfil de Presiones - Vista Lateral

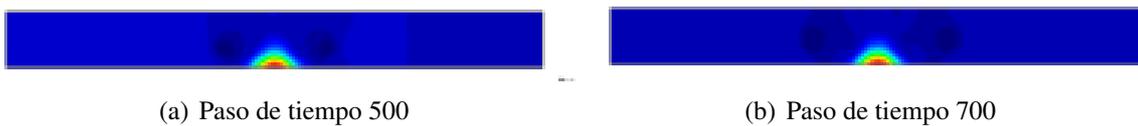


Figura 12: Perfil de Presiones - Vista Lateral

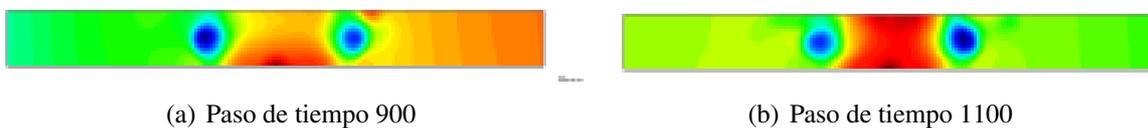


Figura 13: Perfil de Presiones - Vista Lateral

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.

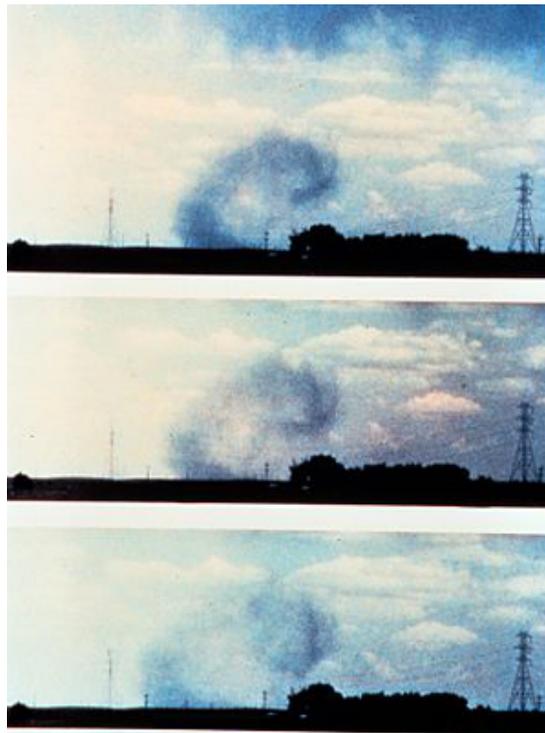


Figura 14: Vórtices formados por una corriente descendente - Fuente: Wikipedia

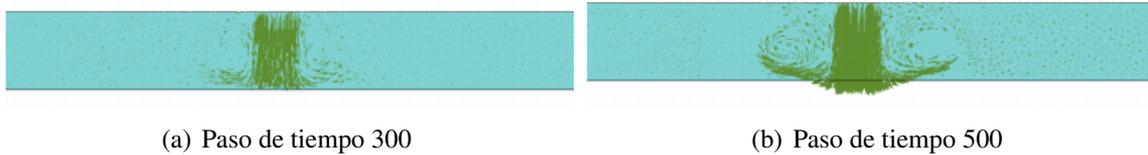


Figura 15: Vectores de Velocidades

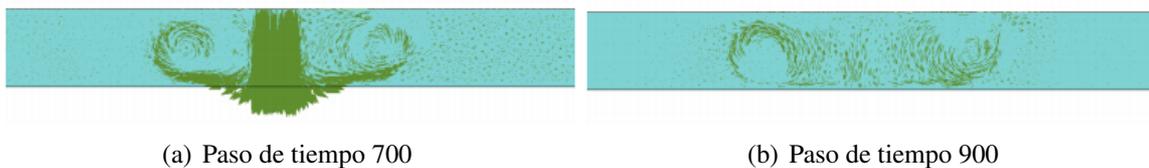


Figura 16: Vectores de Velocidades

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

- Balbastro G. *Coeficientes 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.
- MatLab. The language of technical computing, 1984. MathWorks, www.mathworks.com.
- PETSc-FEM. A general purpose, parallel, multi-physics fem program, 1999. CIMEC, www.cimec.org.ar/petscfem.
- Ponte J. y Riera J. Wind velocity field during thunderstorms. *Wind and Structures*, 2007.
- Riera J. Wind velocity field during thunderstorms, extreme wind velocities in mixed wind climates and new data from intense downbursts. *Proceedings of 14th Australasian Wind Engineering Society*, 2010.