

# Validación mediante CFD de los coeficientes de presión de una tenso estructura obtenidos en un túnel de viento

Gamboa-Marrufo Mauricio<sup>1</sup>, Rosado-Hau Nidiana, Pacheco-Pacheco Abraham

*Fecha de recepción: 5 de noviembre de 2013 – Fecha de aprobación: 17 de diciembre de 2013*

## RESUMEN

Para analizar las cargas inducidas por el viento sobre una construcción cuya geometría es compleja, sobre todo en las regiones donde los fenómenos meteorológicos son constantes, es necesario llevar a cabo ensayos experimentales y otros análisis para la determinación de estas cargas tan precisamente como sea posible. En este trabajo se presenta la metodología seguida para determinar los coeficientes de presión sobre una tenso-estructura mediante la dinámica de fluidos por computadora (CFD, por sus siglas en inglés); al comparar estos resultados con aquellos obtenidos por medio de pruebas en túnel de viento, se encontraron diferencias promedio en los coeficientes de presión de 0.1 y 0.07, cuando el viento incidía paralela y perpendicularmente a la cresta de la estructura, respectivamente. La metodología aquí presentada es una herramienta alterna para que los ingenieros civiles puedan obtener información importante relativa a la interacción viento-estructura cuando las geometrías de estas últimas están fuera del alcance de los códigos de construcción.

**Palabras clave:** tenso-estructuras, túnel de viento, CFD, coeficiente de presión.

## CFD Validation of pressure coefficients of a tensile structure obtained with wind tunnel tests

### ABSTRACT

In order to analyze the loads induced by the wind upon a building with a complex geometry, above all in regions where meteorological events are frequent, it is necessary to carry out experimental tests and other analysis to determine these loads as accurate as possible. This work presents the methodology to determine the pressure coefficients over a tensile structure using Computer Fluid Dynamics (CFD); when comparing these results with pressure coefficients acquired using wind tunnel tests, maximum pressure coefficient mean differences of 0.1 and 0.07 were obtained when the wind impinged parallel and perpendicular to the crest edge of the structure, respectively. The presented methodology is an alternative tool for civil engineers to obtain important information about the wind – structure interaction when the geometries of the latter are out of the scope of the construction codes.

**Key words:** tensile structures, wind tunnel, CFD, pressure coefficients.

---

<sup>1</sup>Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán; Av. Industrias no Contaminantes por Anillo Periférico Norte s/n. Apdo. Postal 150 Cordemex. Cd. Mérida, Yucatán, México. Tel: (52) 999 930-0550 Ext. 1074, Fax: (52) 999 930-0579. Correo electrónico: gmarrufo @uady.mx.

Nota: El período de discusión está abierto hasta el 1° de julio de 2014. Este artículo de investigación es parte de Ingeniería–Revista Académica de la Facultad de Ingeniería, Universidad Autónoma de Yucatán, Vol. 17, No. 3, 2013, ISSN 1665-529-X.

## **Introducción**

Las tenso-estructuras son sistemas de alta precisión que deben tener la curvatura y el pretensado adecuado para soportar las cargas a las que quedan sujetas (viento, nieve, etc.) por lo que para su diseño, se debe realizar un análisis exhaustivo de las condiciones de carga para asegurar su integridad estructural. Para determinar las cargas inducidas por el viento sobre las estructuras, en Ingeniería Civil, comúnmente se emplean códigos, éstos, son fáciles de aplicar para construcciones con formas regulares. Sin embargo, para las construcciones con formas irregulares o aquellas situadas en ambientes complejos, la determinación de las cargas inducidas por el viento se vuelve más complicada y fuera del alcance de los códigos. Para estos casos, una solución, es emplear túneles de viento para determinar las cargas de viento en las partes de la estructura más sensibles y para fines de diseño, el uso de software por computadora es más conveniente (Gamboa-Marrufo et al., 2011; Hunte, 2010).

La dinámica de fluidos computacionales (o CFD, por sus siglas en inglés) consiste en el análisis del movimiento de los fluidos y, en ocasiones, de otros fenómenos asociados (transferencia de calor, reacciones químicas, arrastres de sólidos, etc.) empleando la computadora. Su objetivo es la búsqueda de una solución numérica de las ecuaciones diferenciales parciales que rigen el movimiento de los fluidos a través de la discretización y la resolución de dichas ecuaciones ya sea mediante técnicas como diferencias finitas, volumen finito o elemento finito, cuya interacción permita determinar la hidrodinámica de un fluido en el rango de estudio. Además de la información básica que se puede obtener análogamente de las pruebas experimentales en túnel de viento, estos programas proporcionan información complementaria del comportamiento de los fluidos que resultaría difícil de conocer experimentalmente, tales como las energías de turbulencia, las cuales no serían fáciles de determinar o requerirían de instrumentación altamente compleja y costosa para hacerlo.

Las simulaciones numéricas, empleando la técnica CFD, siempre han venido acompañadas por una fase experimental que ha servido para darle certidumbre (validación) a los resultados obtenidos de la simulación; por ejemplo, los trabajos realizados por Lo et al. (2013), Kim et al. (2010) y Palmer et al. (2003) presentan estudios de validación de resultados. Watabe et al. (2002) llevaron a cabo pruebas en túnel de viento, análisis mediante CFD y mediciones directas sobre la estructura de una torre. En sus resultados comparativos de estos 3 métodos para

calcular las cargas sobre la estructura, determinaron que: los coeficientes de presión promedio obtenidos en el túnel de viento fueron muy cercanos los obtenidos en las mediciones sobre la torre real, la desviación estándar de los coeficiente de presión obtenidos con las mediciones sobre el prototipo (estructura real)son más pequeñas que las obtenidas con las mediciones realizadas en el túnel de viento. Los coeficientes de presión promedio presentaron resultados similares aplicando los 3 métodos para su obtención: simulación CFD, pruebas en túnel de viento y mediciones sobre el prototipo. Dagnew, et al. (2009) realizaron estudios sobre la evaluación numérica de las presiones de viento en modelos de edificios estandarizados por el CAARC (Commonwealth Advisory Aeronautical Research Council); el estudio reveló la conveniencia de las herramientas CFD para la evaluación preliminar de las cargas de viento a las que estaría sometido un edificio y la determinación de las características aerodinámicas de edificios con geometrías complejas.

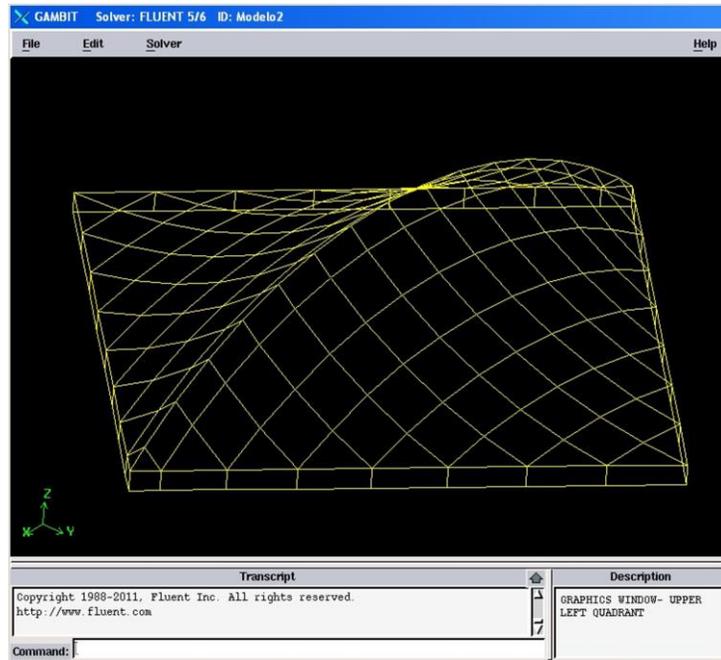
## **Metodología**

### *Procedimiento de simulación de la tenso-estructura*

En los paquetes de software existentes de CFD, el usuario debe especificar las condiciones del problema que se va a resolver, así como proveer a la computadora de ciertos parámetros de resolución para que el programa consiga encontrar una correcta solución del problema. Para realizar el análisis se requieren de 3 etapas: pre-proceso, en el que se definen la geometría a emplear y el mallado; proceso, en el que se define los modelos físicos, propiedades de los fluidos, condiciones de frontera, condición inicial, control de parámetros y se solucionan las ecuaciones y; el post-proceso, donde se presenta el análisis y la visualización de los resultados.

En este trabajo se emplea el software Fluent para la realización de la simulación. La metodología seguida en este trabajo se describe a continuación:

**PRE-PROCESO:** El pre-proceso es la etapa en la que se define el modelo geométrico y se establecen los parámetros que definirán la forma en que se resolverán las ecuaciones del fluido. La guía de usuario del programa Fluent (Fluent Inc. 2001) recomienda el uso de los programas Gambit o T-Grid para la modelación geométrica, sin embargo, se pueden emplear programas auxiliares en la realización de algunas secciones en particular. Tomando en cuenta lo anterior, se decidió emplear el programa de Autocad como programa auxiliar en la generación de los modelos geométricos para facilitar el diseño de la geometría, ya que el proyecto está enfocado para su uso por los diseñadores de obras civiles.



**Figura 1.** Modelo con geometría corregida.

Generación de la geometría: Para el diseño de la geometría en Autocad se emplearon únicamente sólidos en la generación de la misma, ya que el formato utilizado para la exportación de estos elementos es de fácil lectura en el programa receptor. Además, se dispusieron una serie de orificios en la geometría diseñada ya que ésta se utilizó para la generación del modelo físico que fue utilizado en los ensayos en el túnel aerodinámico.

Corrección de la geometría: La geometría generada en Autocad fue importada al Gambit; la figura 1 muestra la geometría empleada una vez que fue importada al Gambit. La importación generó errores en la geometría que tuvieron que ser corregidos para continuar con el proceso de modelación. Entre los errores que aparecieron se pueden mencionar: defectos en bordes, dobles nodos y errores en la conectividad de los elementos, entre otros. La corrección consistió en ir degradando el modelo, que inició como un volumen, a sus partes más elementales como son las caras y las líneas. En cada una de las degradaciones se fueron haciendo las correcciones pertinentes hasta que se obtuvo la geometría que sirvió para la generación de los modelos geométricos.

En este trabajo se presentan 2 casos particulares de la simulación del viento sobre el modelo; primero se estudió la incidencia frontal del viento con la geometría (líneas de corriente paralelas a la cresta del modelo, figura 2), y segundo, cuando el viento incide lateralmente en la geometría (líneas de corriente perpendiculares a la cresta del modelo, figura 3).

En las simulaciones no se pudo trabajar con la geometría completa debido a la alta demanda de recursos computacionales para la resolución numérica de los casos de estudio, por lo que fue necesario reducir el modelo, es decir, se empleó una sección del modelo aprovechando que cuenta con planos de simetría. En el modelo con incidencia frontal del viento, se trabajó con la sección perteneciente al lado positivo del plano “XZ” (figura 2, con los ejes de referencia colocados en el centro de la estructura). En cuanto al modelo con incidencia lateral del viento, se trabajó con la sección perteneciente al lado negativo del plano “YZ” (figura 3, con los ejes de referencia colocados en el centro de la estructura).

Delimitación del dominio y discretización lineal: Aprovechando la forma en que se discretizó la superficie de la geometría, se decidió usar un mallado por multibloques. En resumen, los modelos volumétricos o *modelos V* se obtuvieron generando líneas a partir de la geometría de tal manera que delimitaron una región, estas líneas fueron convertidas a caras y posteriormente a volúmenes, y la unión de estos volúmenes es lo que dio origen al modelo *V*. *Los modelos V*, para las dos direcciones de incidencia, se diseñaron con los límites extremos en forma de cuchilla, este diseño se utilizó para mantener al mínimo las transiciones entre los elementos de la malla así como evitar la deformación de dichos elementos que son factores que impedirían, en la simulación, la convergencia a la solución (figura 4).

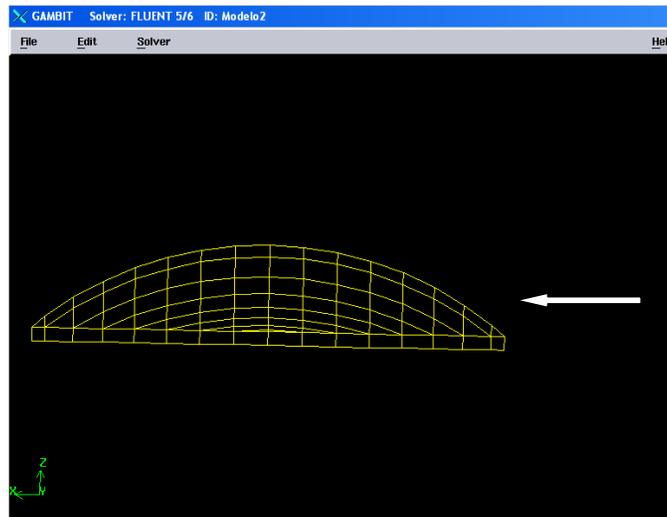


Figura 2. Primer caso de estudio, líneas de corriente paralelas a la cresta del modelo o viento incidente frontalmente.

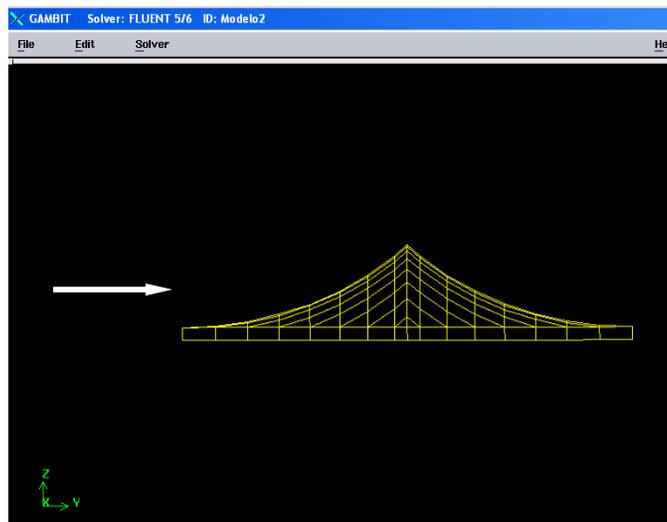


Figura 3. Segundo caso de estudio, líneas de corriente perpendiculares a la cresta del modelo o viento incidente lateralmente.

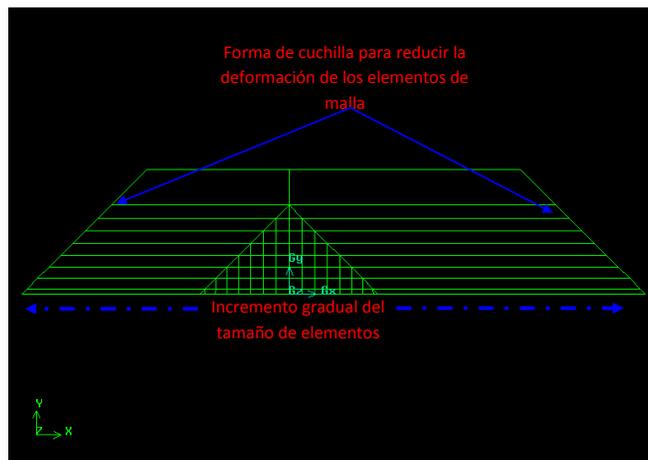


Figura 4. Esquema del empleo de los límites en cuchilla en los modelos.

**Tabla 1.** Condiciones de frontera

Condiciones de contorno		
Nombre	Contorno	Propiedad
Figura	Wall	Velocidad cero en su superficie, de modo que el flujo no lo atraviesa.
Techo		
Piso		
Entradafront	VelocityInlet	Contorno de entrada de flujo a una velocidad definida.
Salidafront	Outflow	Contorno de salida de flujo. Se aplica cuando se desconocen propiedades a la salida.
Paredlat	Symmetry	Pared sin fricción. Plano de simetría.
Simetría		

En un modelo geométrico mientras más densa sea la malla utilizada, mas aproximados serán los resultados de la simulación a la realidad, pero también, mientras más elementos se manejen, más memoria será necesaria para resolverla, por lo que para realizar la discretización de las líneas que conformaron el volumen, se tuvo mucho cuidado de no sobrepasar estos límites para evitar problemas en la simulación. Al revisar la calidad de los elementos en los modelos para las dos direcciones de incidencia del viento, se observó que las zonas críticas se encontraban en un rango intermedio que es adecuado por la complejidad de la geometría. Especificaciones del tipo de zona: las condiciones de frontera que se emplearon en este trabajo se muestran en la tabla 1.

En el modelo con incidencia lateral del viento fueron manejadas las mismas condiciones de frontera pero ajustándolas a la dirección del modelo.

**PROCESO:** Para la ejecución del programa Fluent, lo primero que se debe definir es la versión del solucionador, para este caso se eligió el 3D. Aunque el método “Segregatedsolver” es utilizado principalmente para flujos de baja velocidad, se ha empleado el método “Coupledsolver” ya que da una mejor aproximación para mallas muy finas. Se ha seleccionado la formulación “Implicit” sobre la “Explicit” ya que converge más rápido a la solución del problema. El flujo se ha determinado como estacionario, ya que se desean registrar las velocidades y presiones medias que, una vez estabilizadas sobre el modelo, cambian poco. El cálculo se basó en los nodos de los volúmenes ya que presentan una mejor aproximación por la cantidad de puntos en los que se resuelven las ecuaciones.

**Definición de modelos:** se omitió la ecuación de energía y se empleó en la simulación el modelo de turbulencia “Realizable k-epsilon” ya que ha demostrado, debido a su nueva formulación basada en datos experimentales, que proporciona una mejor aproximación en situaciones de flujo que involucran

recirculación, rotación y capas limites bajo gradientes de presión adverso (Fluent Inc. 2001). En la simulación de los modelos se usó la función de pared “Non – Equilibrium Wall Function” debido a su capacidad para tomar, en flujos complejos, la separación y la reinserción donde el flujo medio y la turbulencia están sujetos a severos gradientes de presión y rápidos cambios. El fluido seleccionado de estudio fue el aire con densidad constante de 1.2225 kg/m<sup>3</sup> y viscosidad de 1.7894 x 10<sup>-5</sup>. La presión de operación elegida fue 0.

**Condiciones de inicio:** La velocidad de entrada del viento, fue de 15 m/s que es equivalente a los vientos producidos en una tormenta tropical.

Los factores de sub-relajación que se emplearon en los modelos fueron:

- Energía cinética turbulenta (Turbulencenergy): 0.8
- Razón de disipación de la turbulencia (Turbulencedissipationrate): 0.8
- Viscosidad turbulenta (Turbulentviscosity): 1.0

En la simulación de los modelos se han utilizado discretizaciones de segundo orden ya que se quería tener una cierta precisión que la discretización de primer orden no proporcionaría.

Los resultados que se obtuvieron de este trabajo se compararon con los coeficientes de presión obtenidos por Gamboa-Marrufo, et al., en 2011. El cálculo de los coeficientes de presión requieren de una velocidad y una presión a la que quedan referidos todos los coeficientes, estos valores fueron tomados de la velocidad y presión que fueron generados a la entrada del flujo.

$$Cp = \frac{P - P_{\infty}}{\frac{1}{2} \rho V_{\infty}^2}$$

Donde:

P = Presión en el punto de estudio



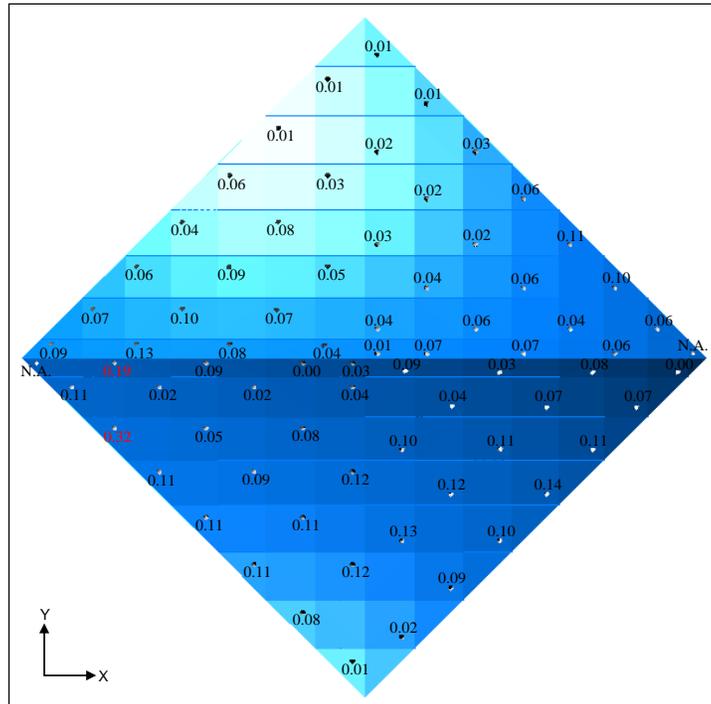


Figura 6. Diferencia entre resultados del túnel y simulación, incidencia lateral.

### Conclusiones

De acuerdo con los resultados obtenidos, se puede determinar que los parámetros utilizados en las simulaciones CFD (Computational fluid dynamic o dinámica de fluidos computacionales) cumplen con las expectativas para su uso en estructuras con geometrías complejas que se ven afectadas por el viento, como es el caso de la tenso-estructura que fue el modelo de análisis para este trabajo.

Entre los resultados obtenidos se pueden mencionar que las diferencias entre los dos métodos de modelación comparados (simulación numérica utilizando CFD y túnel aerodinámico) fue en promedio de 0.1 en un rango de presiones que fueron desde -0.65 hasta 0.51, para el modelo de incidencia frontal y de 0.07 en un rango de 0.00 a -0.64, para el modelo de incidencia lateral. Tomando en cuenta que se están resolviendo ecuaciones diferenciales para representar el comportamiento del flujo en el prototipo, estas diferencias resultan en ambos casos aproximadamente un 10% del rango de los valores

entre los que se encuentran las magnitudes de las presiones.

Las diferencias mayores entre los coeficientes de presión obtenidos con los dos tipos de modelación comparados se generaron en los bordes de la estructura. Se recomienda la utilización de mallas más finas en estas áreas para obtener mayor precisión en ellas, de igual forma se puede emplear un modelo de turbulencia más elaborado, como lo es el Modelo de esfuerzos de Reynolds; sin embargo se requerirán la resolución de siete ecuaciones de transporte para flujo en 3-D incrementado el tiempo de convergencia de dicha solución y la capacidad del equipo de cómputo. Con el equipo de cómputo utilizado en este trabajo, una computadora de bajo costo como es la Laptop Dell Precision M70, se obtuvieron resultados próximos a los obtenidos en las pruebas utilizando un túnel de viento, sin la necesidad de este equipo que no siempre se encuentra disponible para su utilización y con un costo mayor de operación.

### Referencias

1. Dagnew, A. K., G. T. Bitsuamalk, y R. Merrick. «Computational evaluation of wind pressures on tall buildings.» *11th Americas Conference on Wind Engineering, San Juan, Puerto Rico.*, 2009: <http://www.iawe.org/Proceedings/11ACWE/11ACWE-Dagnew.pdf>.
2. Fluent Inc. «Fluent 6.0 User's Guide: Nomenclature, Bibliography & Index.» 2001.

3. Gamboa-Marrufo, Mauricio, Krisztian Hincz, y Victor Tun Cruz. «Mediciones de presiones aerodinámicas en una estructura de membrana.» *Ingeniería, Revista académica de la Facultad de Ingeniería de la Universidad Autónoma de Yucatán*, 2011: 167-175.
4. Hunte, Stanley. *Testing the application of CFD for building design: Towards a CFD application as a design tool*. Amsterdam: Faculty of Civil Engineering, Delft University of Technology, Master Thesis, 2010.
5. Kim, Taeyeon, Kwanho Kim, y Byungseon Sean Kim. «A wind tunnel experiment and CFD analysis on airflow performance of enclosed-arcade markets in Korea.» *Building and Environment* (Elsevier), nº 45 (2010): 1329-1338.
6. Lo, James L., Davis Banks, y Atila Novoselac. «Combined wind tunnel and CFD analysis for indoor airflow prediction of wind-driven cross ventilation.» *Building and Environment* (Elsevier), nº 60 (2013): 12-23.
7. Palmer, G., B. Vázquez, G. Knapp, y N. Wright. «The practical application of CFD to wind engineering problem.» *Eighth International IBPSA Conference*. Eindhoven, Netherlands, 2003, [http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03\\_0995\\_1000.pdf](http://www.ibpsa.org/proceedings/BS2003/BS03_0995_1000.pdf). 995-1000.
8. Reiter, S. «Validation Process for CFD Simulations of Wind Around Buildings.» *Proceedings of the European Built Environment CAE Conference*, 2008: <http://hdl.handle.net/2268/20400>.
9. Watakabe, Morimasa, y otros. «Comparison of wind pressure measurements on tower-like structure obtained from full-scale observation, wind tunnel test, and the CFD technology.» *Journal of Wind Engineering and Industrial Aerodynamics* (Elsevier), nº 90 (2002): 1817-1829.

---

Este documento debe citarse como: Gamboa-Marrufo Mauricio, Rosado-Hau Nidiana, Pacheco-Pacheco Abraham. (2013). **Validación mediante CFD de los coeficientes de presión de una tenso estructura obtenidos en un túnel de viento**. *Ingeniería, Revista Académica de la FI-UADY*, 17-3, pp 215-222, ISSN 1665-529-X.